LASERY W KONSERWACJI DZIEŁ SZTUKI I ZABYTKÓW

ZASADY – EKSPLOATACJA – BEZPIECZEŃSTWO

PRINCIPLES – EXPLOITATION AND SAFETY

LASERS IN CONSERVATION OF ART WORKS AND MONUMENTS - AD 2015

Laser.indb 1 2015-03-04 13:30:39

LASERY W KONSERWACJI DZIEŁ SZTUKI I ZABYTKÓW
ZASADY – EKSPLOATACJA – BEZPIECZEŃSTWO

PRINCIPLES – EXPLOITATION AND SAFETY
LASERS IN CONSERVATION OF ART WORKS AND MONUMENTS – AD 2015

Wydawca / Publisher:
Międzyuczelniany Instytut Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki
Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie i Krakowie

Autorzy / Authors:
Andrzej Koss, Jan Marczak

ISBN 978-83--922954-7-1

Edytor / Editor:
Marek Strzelec

Projekt, skład, druk, oprawa:
Oficyna Drukarska Jacek Chmielewski
ul. Sokołowska 12a, 01-142 Warszawa
tel. (22) 632-83-52, (22) 631-30-50
fax (22) 631-49-40
info@oficyna-drukarska.pl, www.oficyna-drukarska.pl

Laser.indb 2 2015-03-04 13:30:48

„Light is, in short, the most refined form of matter”

Louis de Broglie

„Światło jest, krótko mówiąc, najszlachetniejszą formą materii”

Louis de Broglie

Laser.indb 3 2015-03-04 13:30:48

SPIS TREŚCI

ROZDZIAŁ 1 / WSTĘP 7

1.1 WPROWADZENIE 7
1.2 WPŁYW ŚRODOWISKA NATURALNEGO 16
1.3 METODY USUWANIA NAWARSTWIEŃ 26
1.4 LASER W KONSERWACJI DZIEŁ SZTUKI – RYS HISTORYCZNY 39
1.5 GENEZA, BADANIA, ETYKA I OGRANICZENIA 46
1.5.1 GENEZA 46
1.5.2 KONIECZNOŚĆ BADAŃ 47
1.5.3 ZAGADNIENIA ETYCZNE I OGRANICZENIA PRAKTYCZNE 50
BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 1 53

ROZDZIAŁ 2 / LASER – ZASADA DZIAŁANIA 57

2.1 WIADOMOŚCI PODSTAWOWE 57
2.1.1 WPROWADZENIE 57
2.1.2 STRUKTURA ATOMU 60
2.1.3 ABSORPCJA PROMIENIOWANIA 63
2.1.4 EMISJA SPONTANICZNA 68
2.1.5 EMISJA WYMUSZONA 70
2.1.6 INWERSJA OBSADZEŃ POZIOMÓW ENERGETYCZNYCH 73
2.1.7 WSPÓŁCZYNNIKI EINSTEINA: A_E, B_{12}, B_{21} 78
2.1.8 POMPOWANIE OPTYCZNE 80
2.1.9. CZAS ŻYCIA ATOMÓW WZBUDZONYCH 83
2.1.10 KRÓTKIE PODSUMOWANIE 85
2.2. GENERACJA I WZMOCNIENIE PROMIENIOWANIA LASEROWEGO 89
2.2.1. PRZEBIEG AKCJI LASEROWEJ 89
2.2.2 WZMOCNIENIE 94
2.2.3. REZONATORY OPTYCZNE I MODY 97
2.2.3.1. RODZAJE REZONATORÓW OPTYCZNYCH 99
2.2.3.2. MODY WZDŁUŻNE 105
2.2.3.3. MODY POPRZECZNE 107
2.3. SYSTEMY PRACY LASERA 111

CONTENT

CHAPTER 1 / INTRODUCTION 7

1.1 FOREWORD 7
1.2 ENVIRONMENTAL IMPACT 16
1.3 ENCRUSTATION REMOVAL METHODS 26
1.4 LASER IN CONSERVATION OF WORKS OF ART - HISTORY 39
1.5 ORIGIN, RESEARCH, ETHICS AND LIMITATIONS 46
1.5.1 ORIGIN 46
1.5.2 NEED FOR RESEARCH 47
1.5.3 ETHICAL ISSUES AND PRACTICAL LIMITATIONS 50
REFERENCES TO CHAPTER 1 53

CHAPTER 2 / LASER – OPERATING PRINCIPLE 57

2. 1 BASIC INFORMATION 57
2.1.1 FOREWORD 57
2.1.2 STRUCTURE OF THE ATOM 60
2.1.3 ABSORPTION OF RADIATION 63
2.1.4 SPONTANEOUS EMISSION 68
2.1.5 STIMULATED EMISSION 70
2.1.6 POPULATION INVERSION OF ENERGY LEVELS 73
2.1.7 EINSTEIN COEFFICIENTS: A_E, B_{12}, B_{21} 77
2.1.8 OPTICAL PUMPING 80
2.1.9. LIFETIME OF EXCITED ATOMS 82
2.1.10 SHORT SUMMARY 85
2.2 GENERATION AND AMPLIFICATION OF LASER RADIATION 89
2.2.1 LASING PROCESS 89
2.2.2 AMPLIFICATION 94
2.2.3 OPTICAL RESONATORS AND MODES 97
2.2.3.1 TYPES OF OPTICAL RESONATORS 99
2.2.3.2 AXIAL MODES 105
2.2.3.3 TRANSVERSE MODES 107
2.3 LASER OPERATION SYSTEMS 111
2.3.1 LASER CONSTRUCTION 111
2.3.2 NATURE OF LASING 112

Laser.indb 4 2015-03-04 13:30:48

2.3.1. BUDOWA LASERA 111
2.3.2. CHARAKTER AKCJI LASEROWEJ 112
2.3.2.1 PRACA CIĄGŁA LASERA 115
2.3.2.2. IMPULSOWA PRACA LASERA – GENERACJA SWOBODNA 116
2.3.2.3. GENERACJA IMPULSÓW GIGANTYCZNYCH – MONOIMPULSÓW 119
2.3.3. PORÓWNANIE GENERACJI SWOBODNEJ I MONOIMPULSOWEJ 125
2.3.4 GENERACJA IMPULSÓW PIKO- I FEMTOSEKUNDOWYCH 126
2.3.5. JAK KRÓTKA JEST FEMTOSEKUNDA? 131
2.4. PODSTAWOWE CECHY ŚWIATŁA LASEROWEGO 134
2.4.1. ŚWIATŁO KONWENCJONALNE A LASEROWE 134
2.4.2. KIERUNKOWOŚĆ PROMIENIOWANIA 136
2.4.3. MONOCHROMATYCZNOŚĆ – JEDNOBARWNOŚĆ PROMIENIOWANIA 140
2.4.4. KOHERENCJA – SPÓJNOŚĆ WIĄZKI LASEROWEJ 143
2.4.5. SPEKTRALNE NATĘŻENIE NAPROMIENIENIA 147
2.5. WIELKOŚCI FIZYCZNE OPISUJĄCE PROMIENIOWANIE OPTYCZNE 149
2.5.1. ZESTAWIENIE WIELKOŚCI FIZYCZNYCH 149
2.5.2 DEFINICJE WIELKOŚCI FIZYCZNYCH – RADIOMETRYCZNYCH 150
2.5.3 OSZACOWANIA GĘSTOŚCI ENERGII I MOCY W PRAKTYCE 163
2.6 RODZAJE LASERÓW 166
2.6.1 UWAGI WSTĘPNE 166
2.6.2 LASERY NA CIELE STAŁYM 167
2.6.2.1 GENERACJA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PROMIENIOWANIA LASEROWEGO 171
2.6.2.2 LASERY PRZESTRAJALNE NA CIELE STAŁYM 172
2.6.3 LASERY GAZOWE 174
2.6.4 WSPÓŁCZESNE LASERY NA CIELE STAŁYM 177
2.7 AKTUALNE KIERUNKI BADAŃ – PODSUMOWANIE 180
BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 2 188

2.3.2.1 CONTINUOUS LASER OPERATION 115
2.3.2.2 PULSED LASER OPERATION- FREE GENERATION 116
2.3.2.3 GENERATION OF GIANT PULSES - MONOPULSES 119
2.3.3 COMPARISON OF FREE RUNNING AND MONOPULSE GENERATION 125
2.3.4 GENERATION OF PICO- AND FEMTOSECOND PULSES 126
2.3.5 HOW SHORT IS A FEMTOSECOND? 131
2.4. BASIC CHARACTERISTICS OF LASER LIGHT 134
2.4.1 CONVENTIONAL LIGHT VS LASER LIGHT 134
2.4.2 RADIATION DIRECTIVITY 136
2.4.3 ONE COLOUR – MONOCHROME RADIATION 140
2.4.4 LASER BEAM COHERENCE 143
2.4.5 SPECTRAL IRRADIANCE INTENSITY 147
2.5 PHYSICAL QUANTITIES DESCRIBING THE OPTICAL RADIATION 149
2.5.1 SUMMARY OF PHYSICAL QUANTITIES 149
2.5.2 DEFINITIONS OF PHYSICAL – RADIOMETRIC QUANTITIES 150
2.5.3 ESTIMATING ENERGY AND POWER DENSITY IN PRACTICE 163
2.6 LASER TYPES 166
2.6.1 PRELIMINARY REMARKS 166
2.6.2 SOLID-STATE LASERS 167
2.6.2.1 GENERATION OF HIGHER HARMONICS OF LASER RADIATION 171
2.6.2.2 TUNABLE SOLID-STATE LASERS 172
2.6.3 GAS LASERS 174
2.6.4 MODERN SOLID-STATE LASERS 177
2.7 CURRENT TRENDS IN RESEARCH – SUMMARY 180
REFERENCES TO CHAPTER 2 188

Laser.indb 5 2015-03-04 13:30:48

ROZDZIAŁ 3 / BEZPIECZEŃSTWO PRACY Z LASERAMI 191
3.1 WPROWADZENIE 191
3.2 ŚWIATŁO LASEROWE – ZAGROŻENIA 195
3.3 PROMIENIOWANIE LASEROWE A OKO 206
3.3.1. OKO 206
3.3.2. DŁUGOŚĆ FALI 208
3.4 RODZAJE ODDZIAŁYWAŃ PROMIENIOWANIA LASEROWEGO Z TKANKĄ BIOLOGICZNĄ 214
3.4.1 EFEKTY TERMICZNE 216
3.4.2 EFEKTY FOTOCHEMICZNE 217
3.4.3 EFEKTY NIELINIOWE 218
3.5 ZAGROŻENIA PIERWOTNE 219
3.5.1 ZAGROŻENIA OKA 219
3.5.2 ZAGROŻENIA SKÓRY 222
3.6 NORMY BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS PRACY Z LASERAMI I PODSTAWOWE DEFINICJE 222
3.6.1 OSZACOWANIA NOMINALNEJ ODLEGŁOŚCI ZAGROŻENIA WZROKU 231
3.6.2 INSTRUMENTY OPTYCZNE 235
3.6.3. PRZEDMIOT NORMY 237
3.7 ZAGROŻENIA WTÓRNE – BEZPOŚREDNIE I POŚREDNIE 238
3.7.1 ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO 238
3.7.2 ZAGROŻENIA SPOWODOWANE PROMIENIOWANIEM TOWARZYSZĄCYM 240
3.7.3 ZAGROŻENIE HAŁASEM 240
3.7.4 ZAGROŻENIA ELEKTRYCZNE, POŻAROWE I INNE 241
3.8 KLASY BEZPIECZEŃSTWA LASERÓW 243
3.8.1 KLASY LASERÓW 244
3.9 ŚRODKI BEZPIECZEŃSTWA STOSOWANE DO LASERÓW 249
3.9.1 WYMAGANIA PRAKTYCZNE 249
3.9.2 ETYKIETY OSTRZEGAJĄCE 253
3.9.3 ILUSTRACJA SYTUACJI NIEBEZPIECZNYCH 260
3.9.4 PRZYKŁADY ZABEZPIECZEŃ PRZED PROMIENIOWANIEM W PRAKTYCE 261
BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 3 265
PUBLIKACJE AUTORÓW MONOGRAFII 266

CHAPTER 3 / OPERATIONAL LASER SAFETY 191
3.1 FOREWORD 191
3.2 LASER LIGHT - THREATS 195
3.3 LASER RADIATION AN THE EYE 206
3.3.1. EYE 206
3.3.2. WAVELENGTH 208
3.4 TYPES OF INTERACTION OF LASER RADIATION WITH BIOLOGICAL TISSUE 214
3.4.1 THERMAL EFFECTS 216
3.4.2 PHOTOCHEMICAL EFFECTS 217
3.4.3 NON-LINEAR EFFECTS 218
3.5 PRIMARY HAZARDS 219
3.5.1 EYE HAZARDS 219
3.5.2 SKIN HAZARDS 222
3.6 SAFETY STANDARDS WHEN WORKING WITH LASERS AND BASIC DEFINITIONS 222
3.6.1 EVALUATION OF NOMINAL OCULAR HAZARD DISTANCE 231
3.6.2 OPTICAL INSTRUMENTS 235
3.6.3. OBJECT OF THE STANDARD 237
3.7 SECONDARY HAZARDS - DIRECT AND INDIRECT 238
3.7.1 ATMOSPHERIC ENVIRONMENT POLLUTION 238
3.7.2 ACCOMPANYING RADIATION HAZARDS 240
3.7.3 NOISE HAZARD 240
3.7.4 ELECTRICAL, FIRE AND OTHER HAZARDS 241
3.8 LASER SAFETY CLASSES 243
3.8.1 LASER CLASSES 244
3.9 SAFETY MEASURES APPLIED TO LASERS 249
3.9.1 PRACTICAL REQUIREMENTS 249
3.9.2 WARNING LABELS 253
3.9.3 ILLUSTRATION OF DANGEROUS SITUATIONS 260
3.9.4 EXAMPLES OF PRACTICAL RADIATION PROTECTION MEASURES 261
REFERENCES TO CHAPTER 3 265
AUTHORS PUBLICATIONS 266

Laser.indb 6 2015-03-04 13:30:48

ROZDZIAŁ 1 / WSTĘP

1.1 WPROWADZENIE

Od początków ludzkości, najpierw przez poznanie, a następnie przez świadome poznawanie i rozwijanie wiedzy, różne dziedziny nauki zawsze towarzyszyły sztuce a szczególnie sztuce konserwacji. Działy nauki, takie jak chemia, fizyka czy matematyka, w mniejszym lub większym stopniu, mniej lub bardziej świadomie, związane były i są do dnia dzisiejszego ze sztuką dawną i współcześnie tworzoną. O ile przed kilkoma tysiącami lat była to wiedza znana nielicznym, o czym dowiadujemy się dziś z równie niewielu przekazów, to od średniowiecza chemia, fizyka a zwłaszcza optyka towarzyszą sztuce. Wiedza w wielu przypadkach traktowana była jako wiedza tajemna i mało dostępna.

Zachowanie dziedzictwa kulturowego w postaci dzieł sztuki i obiektów zabytkowych jest szczególnym obowiązkiem ludzkości, jako depozytariuszy dorobku cywilizacji i jako bezcenne źródło informacji o historii cywilizacji, sztuki materialnej i niematerialnej. Szczególnie ważne dla zrozumienia dziedzictwa kultury są badania naukowe, a szczególnie

CHAPTER 1 / INTRODUCTION

1.1 FOREWORD

Since the dawn of mankind, first by means of discovery, and then by conscious learning and development of knowledge, different domains of science have always accompanied art, and particularly conservation science. Branches of science such as chemistry, physics and mathematics, to a lesser or greater extent, more or less consciously, have been and are still associated today with ancient and contemporary art. While several thousand years ago it was arcane knowledge available to a happy few, which we learn today from equally few sources preserved, since the Middle Ages chemistry, physics and especially optics accompany art. In many cases knowledge was treated as an arcane and not readily available knowledge.

Preservation of cultural heritage in the form of works of art and historical objects is a special obligation of humanity, as depository of civilisation property and a priceless source of information on the history of tangible and intangible art. What is particularly important

Laser.indb 7 2015-03-04 13:30:48

wkład nauk fizycznych i chemicznych w odkrywaniu bogatej informacji zawartej w dziełach sztuki. Zachowanie więc dziedzictwa kulturowego oraz jego pielęgnacja jest obowiązkiem każdej społeczności przekazującej przyszłym pokoleniom te wartości. Obowiązek ten rozszerza się o współpracę interdyscyplinarną, wymagającą ścisłej współpracy pomiędzy artystami konserwatorami, archeologami, historykami sztuki, kuratorami muzeów z jednej strony a chemikami, fizykami i architektami, uczestniczącymi w tym wyjątkowo interesującym obszarze badań i tworzenia metod dla zachowania, ochrony i powstrzymania procesów zmian i degradacji dzieł sztuki i zabytków.

Głównym problemem naszych czasów jest zabezpieczenie dziedzictwa kulturowego przed wieloma naturalnymi i antropogenicznymi (generowanymi przez człowieka) źródłami jego niszczeń. Emisja do atmosfery gazów spalinowych, cząstek pyłu, sadzy i związane z tym opady kwaśnych deszczy, a także czynniki biologiczne mają zasadniczy wpływ na zbiory muzealne i dzieła eksponowane na wolnym powietrzu. Agresywny atak chemiczny niszczy każdy element dzieła wystawiony na zanieczyszczenia, zwłaszcza w dużych i uprzemysłowionych aglomeracjach miejskich, a utrata substancji zabytkowej rzeźb w elementach ozdobnych staje się dramatyczna. Wszystkie te obiekty tracą

for understanding the cultural heritage, it is research, with an equally important contribution to discover the abundant information contained in written works made by the physical and chemical sciences. Therefore, preservation of cultural heritage and caring for it is the responsibility of each and every community. This obligation extends to an interdisciplinary activity which requires close collaboration between, on one side, expert conservators, archaeologists, art historians, curators of museums, and chemists, physicists and architects on the other, all involved in this extremely interesting field of research and creation of methods for preservation, protection and prevention against alteration and degradation processes influencing the works of art.

The main problem of our times is to protect the cultural heritage from various natural and anthropogenic (human-generated) sources that damage it. Emissions to the atmosphere of combustion gases, particles of dust, soot and the consequent precipitation of acid rain, as well as biological factors have a major impact on museum collections and on the works exhibited in the open. Aggressive chemical attack destroys every element of the work that is exposed to pollution, especially in large and industrialised

Laser.indb 8 2015-03-04 13:30:48

z upływem czasu swój wyraz i obraz artystyczny. W wyniku coraz szybszego i pogłębiającego się zanieczyszczenia środowiska naturalnego, zwłaszcza w ostatnich trzech kwartałach ubiegłego wieku, eksponowane powierzchnie pomników stojących na wolnym powietrzu ulegają degradacji z szybkością od 1% do 5% w ciągu roku. Nakładają się na te zjawiska zmiany związane z procesami starzenia materiałów budujących obiekty. Podobna sytuacja ma miejsce w muzeach i galeriach, w których zalecany jest znacznie niższy poziom zanieczyszczeń takimi substancjami, jak: tlenki azotu, dwutlenek siarki i niektóre węglowodory, niż dla środowiska zewnętrznego akceptowalnego w ochronie zdrowia ludzkiego. Stąd głównymi zadaniami konserwatorów jest, oprócz identyfikacji użytych materiałów, identyfikacji dzieła czy zabytku, ocena ich stanu zachowania i analiza zniszczeń zabezpieczenie lub przeciwdziałanie dalszej degradacji.

W praktyce konserwatorskiej mamy do czynienia z wieloma skomplikowanymi obiektami o szczególnie złożonej budowie technologicznej, zróżnicowanej odporności na wodę i czynniki chemiczne i zjawiska fizyczne. Współcześnie, do analizy chemicznej warstw wierzchnich, warstw malarskich, oceny stanu zachowania, badań strukturalnych dzieł sztuki oraz do usuwania warstw zanieczyszczających opracowano wiele

urban agglomerations, and the loss of historical substance of sculptures in ornamental elements becomes dramatic. All of these objects lose, as the years went by, their expression and artistic aspect. As a result of increasingly accelerating and exacerbating environmental pollution, especially in the last three quarters of the last century, the exposed surfaces of the outdoor monuments suffer degradation at a rate of 1% to 5% per year. The situation is similar in museums and galleries, where the recommended level of contamination with substances such as nitrogen oxides, sulphur dioxide, and some hydrocarbons is much lower than for the external environment acceptable in the protection of human health. Hence, the main tasks of conservators, apart from identification of artefacts and materials used, include assessment of the state of preservation and analysis of the destruction of the work, as well as protection or counteraction against further degradation.

The conservation practice deals with many complex objects of particularly complex technological construction, diversified resistance to water, chemical agents and physical phenomena. Nowadays, many specialised devices based on physical methods using laser technology were designed for the purposes

Laser.indb 9 2015-03-04 13:30:48

specjalistycznych urządzeń w oparciu o metody fizyczne wykorzystujące technikę laserową. Do największych zalet analitycznych metod fizycznych stosujących spójne promieniowanie laserowe jest ich bez-inwazyjność (brak pobierania próbek), oraz mobilność aparatury pozwalającej na badania w miejscu eksponowania dzieła. Dla celów diagnostycznych dzieł sztuki opracowano wiele specjalistycznych technik laserowych, przy czym każda z nich oferuje konserwatorowi różne zalety i różne możliwości. Głównym celem tych analiz jest identyfikacja ważnych składników chemicznych dzieł sztuki oraz scharakteryzowanie ich stanu zachowania lub określenie wpływu czynników zewnętrznych w postaci tworzenia się nawarstwień na ich powierzchni, mających, poza wpływem na zmiany wyglądu, wpływ na ich strukturę budowaną z różnorodnych materiałów.

Dostępne do niedawna metody oczyszczania powierzchni w konserwacji dzieł sztuki opierały się o mechaniczne lub chemiczne techniki, wybierane zwykle przez indywidualnego konserwatora, zależne od jego wiedzy i dostępnych metod. Tradycyjne techniki czyszczenia w praktyce bardzo trudno jest jednak kontrolować z powodu ograniczonej możliwości wpływu na oddziaływanie używanych preparatów chemicznych i ich neutralizację w strukturze materiałów. W oddziaływaniach mechanicznych,

of chemical analysis of surface layers, paint layers, assessment of the state of preservation, structural studies of works of art and removal of polluting layers. The main advantages of physical methods of analysis using coherent laser radiation include their non-invasiveness (no sample collection), and mobility allowing in situ analyses. Many specialised laser techniques have been developed for the purposes of works of art diagnosis, each of them offering different advantages and options to the conservator. The main objective of these analyses is to identify major chemical components of works of art, and to characterise their state of preservation or to determine the impact of external factors in the shape of surface encrustation, influencing not only on the appearance, but also on their structure, formed from various materials.

Methods of surface cleaning in art restoration available until recently were based on mechanical or chemical techniques usually selected by each conservator, depending on his knowledge and available methods. Traditional cleaning techniques are, however, very difficult to monitor in practice, because of limited possibilities of our influence on interaction and neutralisation of applied chemical agents. Mechanical methods are usually considered as

Laser.indb 10 2015-03-04 13:30:48

tak w przypadku niskich lub wysokich ciśnień, niezależnie od rodzaju użytego materiału ściernego czy wody, mamy do czynienia z metodami które należy zakwalifikować do niszczących. Przeprowadzane prace czyszczenia na delikatnych, jak również bardzo skomplikowanych i zróżnicowanych pod względem materiałowym obiektach, wymagają rozszerzonych ekspertyz ustalających wzajemne oddziaływanie użytej substancji lub minimalizacji zawsze występujących zniszczeń, np. przy oczyszczaniu mechanicznym. W praktyce konserwatorskiej spotykamy wiele skomplikowanych obiektów o szczególnie złożonej budowie technologicznej i indywidualnym stanie zachowania, wynikającym z wpływu różnorodnych czynników i nałożeniu się zmian w samym budulcu użytym do ich wykonania. Ogranicza to możliwość zastosowania metod konwencjonalnych, a każdy detal wymaga odrębnych parametrów czyszczenia.

Od trzech dekad, z ogromnym powodzeniem wykorzystuje się nową metodę, metodę fizyczną usuwania nawarstwień z wykorzystaniem światła, emitowanego przez różnego rodzaju lasery. Odpowiednia wartość energii dostarczonej w impulsowej wiązce laserowej zapewnia odparowanie związków, szczególnie organicznych, zawartych w nawarstwieniach, co pozwala na ich bezpieczne usunięcie. W usuwaniu nawarstwień z rzeźb

destructive, regardless of abrasive materials or tools. Cleaning work carried out on delicate objects, as well as on those very complex and diverse in terms of material, require extensive expert opinions including mutual impact of substances used or minimisation of damage that occurs always for example during mechanical cleaning. In conservation practice one encounters many complex objects with particularly sophisticated technological construction and individual state of preservation, resulting from the impact of various factors and overlapping changes in the very building material that was used to construct them. This limits the possibility of using conventional methods, and each detail requires separate cleaning parameters.

For three decades, a new method has been used with great success, namely the method involving physical removal of layers with the use of light emitted by lasers of various types. An appropriate value of energy supplied in the pulse laser beam allows evaporation of compounds, especially of organic ones, contained in particular layers, which makes it possible to remove them at greatly reduced risk. When it comes to removing layers of stone sculptures, yellowed varnish from paintings, the laser method is

Laser.indb 11 2015-03-04 13:30:48

kamiennych, pożółkłych werniksów z obrazów, metoda laserowa ma bardzo wiele dotychczas nie osiąganych cech, albowiem jest: bezkontaktowa, selektywna, lokalna, kontrolowana, samo-ograniczająca się, o natychmiastowym sprzężeniu zwrotnym, zachowująca najdelikatniejszy relief – ślad pędzla lub dłuta. W wielu przypadkach jest komplementarna.

Specyficzne cechy promieniowania laserowego zostały korzystnie zademonstrowane i wykorzystane w szerokim spektrum problematyki konserwacji dzieł. Usuwanie nawarstwień laserem prowadzi do bardzo precyzyjnej i kontrolowanej ablacji – usuwania nawarstwień obcych z powierzchni różnych materiałów. Pozwala to na zastosowanie laserowej techniki czyszczenia do usuwania wielu różnorodnych nawarstwień, warstw brudu, a także przemalowań. Spójność promieniowania laserowego pozwoliła na zastosowanie trójwymiarowego zobrazowania holograficznego i kontroli interferometrycznej zachowywania się dzieła w różnych sytuacjach. Laserowa wibrometria dopplerowska dostarcza informacji o ewentualnych odspojeniach warstw malarskich czy fresków, a tomografia laserowa służy do określania defektów strukturalnych i kontroli „on line" usuwania werniksów z ogromną precyzją. Możliwość pracy laserów na wielu długościach fal oraz szereg technik spektroskopowych,

contactless, selective, localised, controlled, self-limiting, with immediate feedback, preserving even the minutest relief - a stroke of a brush or chisel. In many cases it is complementary.

Specific characteristics of laser radiation have been advantageously demonstrated and used in a wide range of conservation of works. Removing encrustation with a laser leads to a very precise and controlled ablation, or removal of the surface layers of different materials. This allows the use of laser cleaning technique for removing a wide variety of encrustations, dirt layers, and overpaints. Coherence of the laser radiation allowed the use of three-dimensional holographic imaging and the interferometric control of the work behaviour in various situations. Laser Doppler vibrometry provides information on possible detachments of layers of paint or frescoes, while laser tomography is used to determine structural defects and for "on-line" control of high precision varnish removal. The ability of lasers to work on multiple wavelengths and a number of spectroscopic ttechniques, such as laser-induced fluorescence, laser-induced breakdown spectroscopy and Raman spectroscopy allows determination of the material composition. World approved lasers – arranged interaction of light, which provide a

Laser.indb 12 2015-03-04 13:30:48

jak: laserowo indukowana fluorescencja, laserowo indukowana spektroskopia emisyjna i spektroskopia Ramana, umożliwia określanie składu materiałowego. Świat zaakceptował lasery – uporządkowane oddziaływanie światła dające zasadniczy wkład w rozwiązywanie wielu zadań do tej pory nierozwiązywalnych, zwłaszcza w nieniszczącej analizie i diagnostyce oraz restauracji i monitorowaniu stanu zachowania dzieł sztuki.

Zastosowanie techniki laserowej daje możliwości prawie pełnej kontroli procesu przy usuwaniu nawarstwień z powierzchni dzieł. Selektywne i precyzyjne operowanie impulsowej wiązki światła stanowi podstawową zaletę nieniszczącego działania na nawarstwienia mniej lub bardziej przylegające do powierzchni dzieła. Specyficzne właściwości laserów, coraz niższe koszty urządzeń i zmniejszanie rozmiarów różnych systemów laserowych doprowadziły do coraz szerszego i rosnącego ich zastosowania w konserwacji w ostatnich piętnastu latach. Ponieważ zainteresowanie tą tematyką wzrasta, ważne jest uświadomienie społeczności konserwatorów zalet i wad impulsowego promieniowania laserowego, w porównaniu do tradycyjnych metod czyszczenia obiektów. Badania materiałowe oczyszczanych kamieni wykazały, że głównym problemem konserwatorów czyszczących rzeźby kamienne wystawione na zanieczyszczenia

crucial contribution to solving many hitherto unsolvable tasks, especially in non-destructive analysis and diagnosis, as well as restoration and monitoring of preservation of works of art.

The use of laser technology makes it possible to almost completely control the process of removing encrustations from the surface of works. Selective and precise operation of pulsed light beam is the key advantage of the non-destructive impact on deposits that are more or less adherent to the surface of artwork. Specific properties of lasers, increasingly lower cost of devices and reduced size of various laser systems made their use in conservation ever more common and frequent in the last fifteen years. As the interest in this subject is on the rise, it is important to make the community of conservators aware of the advantages and disadvantages of pulsed laser radiation compared to traditional methods of cleaning objects. Materials tests of cleaned stones have shown that the main problem of conservators who were cleaning stone sculptures exhibited to air pollution is to preserve the delicate patina that may be lost as a result of using cleaning methods other than the laser technology which are aggressive and not fully controlled.

Laser.indb 13 2015-03-04 13:30:48

atmosferyczne jest zachowanie delikatnej patyny, która może być utracona w wyniku użycia innych niż technika laserowa, agresywnych, nie w pełni kontrolowanych metod czyszczenia.

Po ponad pięćdziesięciu latach od pierwszej próby, oparte na laserach techniki konserwacji spotykają się w Europie ze znacznym zainteresowaniem, co podkreśla wzrastająca liczba analiz studialnych przedstawianych na tematycznych konferencjach LACONA (Lasers in the Conservation of Artworks), a także w czasopismach naukowych.

Analiza dzieła, konserwacja i jego zabezpieczenie jest całościowym procesem dostarczającym konserwatorom wielu skomplikowanych i trudnych zagadnień, a oczyszczanie – usuwanie obcych lub szkodliwych nawarstwień jest jednym z krytycznych etapów tego procesu. Stosowanie i rozwój nowoczesnych analiz i technik w konserwacji wymaga nie tylko wysokiego poziomu umiejętności, ale także wiedzy z wielu dziedzin, w połączeniu z wyczuciem estetyki. Procedury konserwatorskie wykorzystywane są do zachowania natury materiałów i stanu obiektów, do naprawy lub restauracji efektów złego wytworzenia, użycia lub niszczenia, oraz do ochrony lub minimalizacji przyszłych zmian. Z drugiej strony, każde działanie konser-

After more than forty years after the first test, laser-based conservation techniques enjoy considerable interest in Europe, the trend which is reflected in the increasing number of case studies presented at thematic conferences called LACONA (Lasers in the Conservation of Artworks), as well as in scientific journals.

Analysis of work, its conservation and protection is a holistic process that makes conservators face many complex and grave issues, with cleaning – removal of extraneous or destructivedeposits - being one of the critical steps in this process. The use and development of modern analyses and techniques in the field of conservation requires not only a high level of skill, but also knowledge in many disciplines, combined with a sense of aesthetics. Conservation procedures are used to preserve the nature of materials and condition of the objects, for repair or restoration in case of effects of inappropriate manufacture, use or destruction, and to protect against future changes or to minimise them. On the other hand, any conservation action should be carried out in accordance with the code of ethics of professional conservation associations, in a way permitting to preserve the authenticity and integrity of the original. These rules, doctrines

Laser.indb 14 2015-03-04 13:30:48

watorskie powinno być prowadzone zgodnie z kodeksem etycznym profesjonalnych stowarzyszeń konserwatorskich w taki sposób, aby zachować autentyczność i integralność oryginału. Zasady te, doktryny i kodeks postępowania praktycznego stanowią próby stworzenia wzorców i wytyczania lub regulowania praktyki w konserwacji i restauracji dzieł sztuki i zabytków.

Dziedzictwo kultury jest podstawą tożsamości narodów. Polska w tej właśnie społeczności narodów europejskich ma wielowiekowe, wielokulturowe, bardzo bogate dziedzictwo materialne i duchowe pochodzące zarówno z oddziaływania kultur zachodu jak i ze wschodu. Społeczność ekspertów – konserwatorów napotyka na trudne wyzwanie uchronienia tego historycznego i artystycznego spadku od degradacji. Jest to obowiązek wymagający stosowania najbardziej zaawansowanych wynalazków nauki i techniki niezbędnych do rozwiązania z reguły jednostkowych, bardzo zróżnicowanych problemów, wynikających z przyczyn naturalnych i antropogenicznych.

Do wcześniej opublikowanych przez autorów monografii zatytułowanych: „Application of Lasers in Conservation of Monuments and Works of Art, ISBN 83-922954-0-4 (2005r.), oraz “Scientific Research – applications of lasers in conservation

and code of practical conduct represent attempts to create models and setting or regulating the practice in conservation and restoration.

Cultural heritage is the basis of the national identity. In the community of European nations, Poland has a centuries-old, multicultural, very rich material and spiritual heritage from both the West and the East. Community of conservation experts faces a tough challenge to protect this historical and artistic legacy against degradation. It is an obligation that requires application of the most advanced inventions of science and technology necessary to solve, usually individually, a large variety of problems arising from natural and anthropogenic causes.

The authors of the previously published monographs entitled: „Application of Lasers in Conservation of Monuments and Works of Art, ISBN 83-922954-0-4 (2005), and “Scientific Research – applications of lasers in conservation of artworks – posters”, ISBN: 978-83-922954-5-7 (2010.) [1,2], have now written another monograph dedicated to the very lasers used in the analysis and conservation-cleaning of works of art and to the safety of their use.

Laser.indb 15 2015-03-04 13:30:48

of artworks – posters", ISBN: 978-83-922954-5-7, (2010r.) [1,2], autorzy dołączają trzecią monografię poświęconą samym laserom stosowanym w analizie i konserwacji-oczyszczaniu dzieł sztuki oraz bezpieczeństwu ich użytkowania.

1.2 WPŁYW ŚRODOWISKA NATURALNEGO

Jeśli przyjrzymy się fotografii przedstawionej poniżej, związki frazeologiczne mogące ją opisać „twardy jak głaz" czy „milczy jak głaz" wydają się być odpowiednio użyte. Jednak z fizycznego i estetycznego punktu widzenia nie jest to jednak prawda. Kamienna głowa wydaje się „płakać i topnieć", dzięki czemu zachowuje swoją „żywość", a co za tym idzie - kruchość. Zanika jej przydatność jako elementu dekoracyjnego i pogarsza się jej stan zachowania oraz estetyka. Ta kamienna rzeźba wołała o pomoc! Poziomy destrukcji obiektów i rzeźb kamiennych stojących na wolnym powietrzu w obszarach zabudowanych wciąż się zwiększają – określamy to pojęciem „deterioracji*".

W odniesieniu do skał i obiektów kamiennych deterioracja oznacza pogarszanie się ich stanu

* Termin deterioracja (łac. deterior = gorszy) oznacza obniżenie przydatności lub sprawności; pogorszenie; zepsucie. Wielki Słownik Frazeologiczny Języka Polskiego, Wydawnictwo: Świat Książki, Warszawa 2003r.

1.2 ENVIRONMENTAL IMPACT

If you look at the photo shown below, collocations such as a "hard as a rock" or "silent as a stone," do not seem out of place. However, in physical and aesthetic terms it is not so. The stone head seems to "cry and melt away", thus retaining its "liveliness" and, consequently, its fragility. It is losing its usefulness as a decorative element and its state of preservation, or aesthetics, is decreasing. This stone sculpture called out for help! Levels of destruction of stone objects and sculptures standing outdoor in urban areas are continuously rising - this process is referred to as "deterioration*".

With respect to rock and stone objects it signifies the deterioration of their physical, chemical and even aesthetic condition as a result of the impact of polluted atmosphere or as secondary effects triggered by such pollution. Deterioration of the state of preservation of stone is due to many reasons, causing destruction and weakening of

* The term deterioration (lat.. deterior = worse) means a reduction in usefulness or performance; worsening; corruption. Wielki Słownik Frazeologiczny Języka Polskiego, Wydawnictwo: Świat Książki, Warsaw 2003

Laser.indb 16 2015-03-04 13:30:49

fizycznego, chemicznego a nawet estetycznego na skutek działania zanieczyszczonej atmosfery lub w wyniku działania efektów wtórnych, będących wynikiem takiego zanieczyszczenia. Pogarszanie się stanu zachowania kamienia obejmuje wiele przyczyn, powodujących niszczenie i osłabianie wyrobów kamiennych. Zniszczenia te spowodowane są w znacznej mierze zanieczyszczeniem powietrza. Głównym zanieczyszczeniem środowiska naturalnego są gazy spalinowe, sadza i kurz wyrzucane do atmosfery przez kominy i unoszone z powierzchni ziemi prądami powietrza. Z opon jednego samochodu ubywa rocznie niekiedy kilka kilogramów gumy, a z asfaltowej jezdni ściera się w ciągu roku warstwa o grubości około 2 mm. Największym jednak źródłem pyłów są kotłownie, elektrownie, elektrociepłownie oraz przemysł, zwłaszcza w słabo przewietrzanej, ciasnej aglomeracji miejskiej. Nowoczesny przemysł i samochodowe gazy spalinowe są źródłem powstawania kolejnych grup substancji, których działanie np.

Rys. 1.2.1. *Przykład destrukcyjnego wpływu „kwaśnych deszczy" na rzeźbę wykonaną z piaskowca. Sukiennice w Krakowie. Fot. wykonana w 1995r.*

Fig. 1.2.1. *An example of the destructive impact of "acid rain" on a sculpture made of sandstone. Cloth Hall (Sukiennice) in Krakow. Photo taken in 1995.*

stone products. Such destruction is caused largely by air pollution. The main pollutant of the environment are exhaust gases, soot and dust thrown into the atmosphere through chimneys and lifted from the earth surface by air currents. Tires of one car sometimes have a few kilograms of rubber less after a year, while asphalt roadways yearly lose a layer approximately 2 mm thick due to friction. However, the greatest source of particulates are boiler houses, power plants, thermal power plants and industry, especially in poorly ventilated and cramped urban agglomerations. Modern industry and car exhaust gasses lead to the formation of new groups of substances the impact of which, for example biological, is immeasurably stronger than in the case of the particulates, with effective ways to remove them being proportionately more difficult or even unknown.

Laser.indb 17 2015-03-04 13:30:49

biologiczne jest bez porównania silniejsze od pyłów, a skuteczne sposoby usuwania odpowiednio trudniejsze lub wręcz nieznane.

Dotychczas rozpoznano przeszło 100 substancji zanieczyszczających środowisko i potencjalnie szkodliwych nie tylko dla człowieka. Można je zgrupować w sposób następujący:

- węglowodory powstające przy spalaniu produktów naftowych i olejów napędowych;
- tlenek węgla stanowiący ok. 2/3 wszystkich lotnych trucizn pochodzących ze spalin silników;
- tlenki azotu i siarki (rocznie odprowadza się w Europie do atmosfery kilkadziesiąt milionów ton SO_2!).

Konsekwencją tych procesów są agresywne, kwaśne deszcze zanieczyszczające środowisko, niszczące do-

Rys. 1.2.2. *a) – Wpływ osadzania się sadzy, kurzu i cząstek zanieczyszczających na wygląd popiersi ozdabiających pałac Czapskich – siedziba Akademii Sztuk Pięknych w Warszawie. b) – Głowa kobiety w trakcie oczyszczania impulsowym promieniowaniem laserowym. Fot. A. Koss.*

So far, more than 100 substances that pollute the environment and are potentially harmful not only to humans have been discovered. They can be grouped as follows:

- hydrocarbons produced in the course of combustion of petroleum products and diesel;
- carbon monoxide constituting approx. 2/3 of all volatile poisons coming from the exhaust of engines;

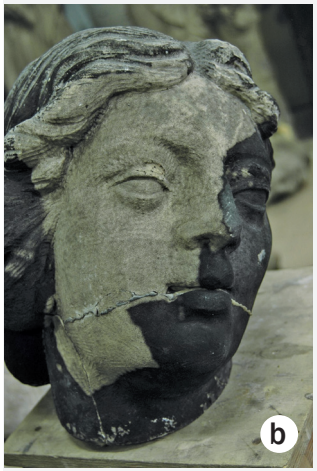


Fig.1.2.2. *a) - Effect of deposition of soot, dust and pollutants on the look of busts that adorn the Czapski Palace - headquarters of the Academy of Fine Arts in Warsaw. b) - A head of a woman undergoing cleaning with pulsed laser radiation. Photo by A. Koss.*

- nitrogen and sulphur oxides (several million tons of SO_2 are discharged to the atmosphere in Europe per year!).

Such processes lead to aggressive, acid rain that pollute the environment and destroy both material and cultural goods. Calcium carbonate and sulphuric acid form calcium sulphate (unstable gypsum) and carbonic acid, that in turn decomposes

Laser.indb 18 2015-03-04 13:30:49

bra materialne i kulturowe. Węglan wapnia z kwasem siarkowym tworzą siarczan wapnia (nietrwały gips) oraz kwas węglowy, rozkładający się z kolei na cząsteczkę wody i dwutlenek węgla [3,4]. Należy pamiętać, że kamienne powierzchnie porowate, chropowate i spękane są znacznie bardziej podatne na destrukcję niż powierzchnie gładkie. Szczególnie niebezpieczne pod tym względem są dwutlenek siarki i tlenki azotu, które w połączeniu z wodą tworzą bardzo agresywne kwasy. Kwasy, wsiąkając w głąb porowatych elewacji i rzeźb kamiennych i reagując z niektórymi minerałami, powodują np. krystalizację soli. Zmieniają w znacznej mierze skład chemiczny, parametry fizyczne i chemiczne kamienia, a także jego wygląd zewnętrzny. W przypadku niektórych soli szczególnie groźna bywa ich siła krystalizacji, działająca podobnie jak woda w procesie zamarzania.

Przedstawiona sytuacja gwałtownej destrukcji środowiska naturalnego człowieka, jego dóbr materialnych i kulturowych ma miejsce dopiero od dwóch stuleci. Jednak ostatnie siedemdziesiąt, sto lat w zaniedbywanej kontroli rozwoju przemysłu i kontroli emisji gazów do atmosfery spowodowało większe jego spustoszenie niż poprzednie pięćset lat. Tego typu zanieczyszczenia atmosfery powodują również odbarwienia, zwłaszcza wapieni wielobarwnych, a tym samym zmiany

into a molecule of water and carbon dioxide [3,4]. It should not be forgotten that porous stone surfaces, rough and cracked, are much more susceptible to destruction than smooth surfaces. Sulphur dioxide and nitrogen oxides are particularly dangerous in this regard, as, when combined with water, they form very aggressive acids The acids, soaking into porous façades and stone sculptures and reacting with some minerals, cause for example crystallisation of salt. They change to a large extent the chemical composition, physical and chemical parameters of the stone, as well as its appearance. Some salts are particularly dangerous due to the strength of crystallisation, acting similarly to water when freezing.

The described situation of rapid destruction of the natural environment of man together with its material and cultural goods has been occurring for only two centuries. However, the neglected control of industrial development and control of atmospheric emissions during the last seventy or one hundred years, caused more destruction than the previous five hundred years. Atmospheric pollution of this type also cause discolouration, especially in multi-coloured limestone, and thereby change their colour contrast. The rocks containing

Laser.indb 19 2015-03-04 13:30:49

kontrastu ich barw. W skałach zawierających węglan wapnia dość często zauważa się krystalizację wykwitów gipsowych, mających wpływ nie tylko na wygląd estetyczny, ale także na zmianę struktury wewnętrznej wapienia. Piaskowce o spoiwie węglanowym ulegają ponadto ziarnistemu rozpadowi (dezintegracji) i powierzchniowemu łuszczeniu (eksfoliacji), natomiast pozbawione takiego spoiwa pokrywają się czarną, szarą lub brunatną patyną. Dynamika zmian stopnia zanieczyszczenia atmosfery w rozmaitych miejscach jest różna, a prędkość, z jaką kamień ulega deterioracji jest znaczna i niekiedy większa niż w przypadku samego wietrzenia.

Powyższe rozważania dotyczyły niszczenia kamiennych rzeźb spowodowanego głównie zanieczyszczeniem powietrza i wody. Występują również i inne mechanizmy niszczenia kamieni, wywołane w sposób mechaniczny, np. wzrostem korzeni roślin, a także efekty działania metabolicznego mikroorganizmów. Wyroby kamienne niszczeją także w wyniku działania bakterii, grzybów, glonów i porostów. Proces ten określany jest mianem biodeterioracji. Jednym z produktów metabolizmu porostów jest kwas szczawiowy, który z kolei reaguje z węglanem wapnia, powodując wytrącanie się szczawianu wapnia, ulegającego krystalizacji nawet do głębokości kilku centymecalcium carbonate often present crystallisation of gypsum efflorescence that alter not only the aesthetic appearance, but also the internal structure of limestone. Sandstones with carbon binder also undergo a process of decomposition (disintegration) and surface peeling (exfoliation), while sandstones with no such binder are being covered with black, grey or brown patina. The dynamics of changes of air pollution levels varies for each area, and the speed of deterioration of stone is significant and sometimes greater than the weathering itself.

The above considerations relate to the deterioration of stone sculptures mainly due to air and water pollution. There are also other mechanisms of stone deterioration of mechanical origin, for example due to the growth of plant roots, as well as metabolic effects of microorganisms. Stone products deteriorate also due to the effect of bacteria, fungi, algae and lichens. This process is called biodeterioration. One of the metabolism products of lichen is oxalic acid, which in turn reacts with calcium carbonate, causing precipitation of calcium oxalate which crystallises as deep as several centimetres from the surface. Lichens and algae that cover stone surfaces accumulate large amounts of water, which, when penetrating into the stone, causes

Laser.indb 20 2015-03-04 13:30:49

trów od powierzchni. Porosty i glony pokrywające powierzchnie kamienia kumulują bardzo duże ilości wody, która, wnikając w głąb kamienia, w cyklicznym procesie nawilżania i schnięcia powoduje postępujący rozkład ich struktury. Kwasy organiczne wytwarzane przez grzyby i porosty niszczą skały węglanowe i piaskowce, a nawet bardzo wytrzymały granit i bazalt. Grzyby żyją nie tylko na powierzchniach kamiennych, ale także w ich głębi. Pozwala na to porowatość kamiennych obiektów i ułatwiony dostęp powietrza i wilgoci. Działanie kwasów organicznych może prowadzić do zmiany stopnia utlenienia jonów żelaza i magnezu, powodując przede wszystkim powierzchniowe łuszczenie kamienia. Tego typu ubytki są bardzo wyraźne w przypadku rzeźb i elementów architektonicznych wykonanych z piaskowca. Bardzo aktywnie działają na kamień grupy mikroorganizmów pod ogólną nazwą bakterii samożywnych (chemolitotroficznych) i cudzożywnych, a ich roli nie należy bagatelizować. Samożywne bakterie azotowe utleniają nieorganiczne związki azotu. Potwierdzono laboratoryjnie rozkład kamienia spowodowany przez te bakterie w środowisku, w którym źródłem amoniaku i azotanów było silnie zanieczyszczone powietrze. Z kolei destrukcyjne działania bakterii cudzożywnych odgrywają wielką rolę przy wietrzeniu skał i minerałów. Niektóre z nich produkują kwasy organiczne i fenole, zdolne rozpuszczać

progressive degradation of their structure in an alternating process of wetting and drying, Organic acids produced by fungi and lichens destroy not only carbonate rocks and sandstone, but also very durable granite and basalt. Fungi live not only on the surfaces of stone, but also inside them. This is possible due to the porosity of stone objects and easier air and moisture access. Organic acids may contribute to a change in the oxidation level of iron and magnesium, resulting primarily in surface peeling of stone. Such attritions are very pronounced in the case of sculptures and architectural elements made of sandstone. Stone is very actively affected by groups of microorganisms bearing the general name of autotrophic (chemolithotrophic) and heterotrophic bacteria, which should not be underestimated. Autotrophic nitrogen bacteria oxidise inorganic nitrogen compounds. Laboratory tests confirmed the decomposition of stone caused by these bacteria in the environment, where ammonia and nitrates were provided by heavily contaminated air. The destructive actions of heterotrophic bacteria, in turn, play a major role when it comes to weathering of rocks and minerals. Some of them produce organic acids and phenols that are able to dissolve many of the most common rock-forming minerals, such as feldspars. It turned out that dust and dirt

Laser.indb 21 2015-03-04 13:30:49

wiele podstawowych minerałów skałotwórczych, np. skalenie. Okazało się, że kurz i brud w wystarczającym stopniu podtrzymują cudzożywną aktywność tych właśnie mikroorganizmów. Wpływ zanieczyszczenia powietrza i aktywność mikroorganizmów jest na tyle ogromna, że wszystkie te czynniki mają istotny udział w dynamice zmian właściwości fizycznych i chemicznych kamienia, a w końcu na rozpad rzeźb – dzieł sztuki i elewacji kamiennych. Stopień wewnętrznej destrukcji kamienia może okazać się już bardzo zaawansowany i nieodwracalny, zanim na powierzchni pojawią się jakiekolwiek widoczne zmiany.

Eksponowane powierzchnie pomników stojących na wolnym powietrzu ulegają, jak już powiedziano, degradacji z szybkością od 1% do 5% w ciągu roku, (rys.1.2.1 i 1.2.2). Zjawisko niszczenia kamienia narasta w przyspieszonym tempie w wyniku coraz większego zanieczyszczenia atmosfery. Rzeźby z marmuru, piaskowca czy wapienia niszczeją w wielu zurbanizowanych obszarach na całym świecie w następującej kolejności:

1. Ciemnienie powierzchni kamiennych i ich konwersja w siarczan wapnia;
2. Pęcznienie warstw wierzchnich;
3. Pękanie warstw zewnętrznych i w konsekwencji dalsza, głębsza degradacja;

sufficiently support the heterotrophic activity of those microorganisms. The impact of air pollution and microbial activity is so great that all these factors significantly contribute to the dynamics of changes of physical and chemical properties of stone, and eventually to the disintegration of sculptures - works of art and stone façades. Before there are any visible changes on the surface, the degree of internal destruction of stone may turn out to be very advanced and irreversible.

Exposed surfaces of outdoor monuments, suffer degradation, as already stated, at a rate of between 1% and 5% per year (fig.1.2.1 and 1.2.2). The phenomenon of stone deterioration is growing at an accelerated rate as a result of the increasing air pollution. Sculptures in marble, sandstone or limestone suffer degradation in many urban areas throughout the world in the following order:

1. Darkening of stone surfaces and their conversion into calcium sulphate;
2. Swelling of surface layers;
3. Cracking of outer layers and, consequently, further, deeper degradation;
4. Absorption of moisture - “acid rain” in the newly uncovered subsequent layer.

Laser.indb 22 2015-03-04 13:30:49

4. Absorpcja wilgoci – „kwaśnych deszczy” w świeżo odkrytej kolejnej warstwie.

Nie jest niczym nowym stwierdzenie, że zapobieganie jest zawsze lepsze niż leczenie. Aby zapobiec zniszczeniu i degradacji dzieł sztuki i starożytnych arcydzieł, konieczna jest oczywiście znajomość wpływu środowiska na takie obiekty. Środowisko, w jakim się one znajdują jest zróżnicowane, o ciągle zmiennej dynamice zanieczyszczeń. Jednak efekty zniszczeń kumulują się i nakładają. W Tabeli 1.2.1 przedstawiono główne zanieczyszczenia atmosfery i ich wpływ na zachowanie się różnych materiałów i obiektów dziedzictwa.

It has been said many times before that prevention is always better than treatment. To prevent damage and degradation of the works of art and of ancient masterpieces, it is obviously necessary to know the influence exercised by environmental factors on such objects. The environment in which they are located is varied, with a continuously variable dynamics of pollution. However, the effects of destruction are cumulative and overlapping. Table 1 presents major air pollution types and their impact on the behaviour of different materials and heritage objects.

Laser.indb 23 2015-03-04 13:30:49

Tabela 1.2.1. Istotne zanieczyszczenia – źródła i efekty ich wpływu.

Zanieczyszczenie	Źródła emisji	Niekorzystne efekty
Dwutlenek siarki (SO_2)	Spalanie paliw kopalnych, głównie węgla (na zewnątrz)	• Matowi metale • Degraduje farby, barwniki, błony fotograficzne, papier, pergamin • Osłabia tkaniny
Dwutlenek azotu (NO_2)	Spaliny samochodowe, spalanie gazu w kuchenkach, bojlerach i w procesach przemysłowych, rozkład azotków w celulozie, fotochemiczne reakcje innych NO_x	• Wybiela barwniki • Osłabia tkaniny • Niszczy błony fotograficzne
Ozon (O_3)	Fotokopiarki, drukarki laserowe, elektrostatyczne filtry cząstek, reakcje fotochemiczne	• Krakuje gumę • Wybiela barwniki • Degraduje papier/ pergamin
Siarkowodór (H_2S)	Spaliny samochodowe (katalizatory), naturalne procesy geochemiczne, wulkanizowana guma, nasiąknięcie wodą materiałów organicznych	• Matowi metale, głównie srebro
Karbonylki (kwas mrówkowy, formaldehyd, kwas octowy itp. C=O)	Schnące farby, drewno i wyroby drewniane, rozkład celulozy, żywice, tworzywa termoplastyczne	• Koroduje metale, szczególnie stopy miedzi, ołowiu i cynku • Niszczy próbki wapienne, mineralne i inne materiały
Cząstki stałe	Ruch uliczny, ścieranie, pyłki, spalanie, insekty, sole.	• Niszczy obiekty poprzez osadzanie środków kwasowych/zasadowych

Table 1.2.1. Significant pollution types - sources and the effects of their influence.

Pollution type	Emission sources	Adverse effects
Sulphur dioxide (SO_2)	Combustion of fossil fuels, mainly coal (outside)	• Tarnishes metals • Degrades paints, dyes, photographic film, paper, parchment • Weakens fabrics
Nitrogen dioxide (NO_2)	Car exhaust, combustion of gas in stoves, boilers, during industrial processes, distribution of nitrides in cellulose, photochemical reactions of other NO_x	• Bleaches dyes • Weakens fabrics • Damages photographic film
Ozone (O_3)	Photocopiers, laser printers, electrostatic particle filters, photochemical reactions	• Produces cracks in rubber • Bleaches dyes • Degrades paper / parchment
Hydrogen sulphide (H_2S)	Car exhaust (catalysts), natural geochemical processes, vulcanised rubber, water soaking into organic materials	• Tarnishes metals, especially silver
Carbonyls (formic acid, formaldehyde, acetic acid, etc. C=O)	Drying paint, wood and wood products, decomposition of cellulose, resins, thermoplastics	• Corrodes metals, especially Cu-Pb-Zn alloys • Destroys limestone, minerals and other materials
Particulates	Traffic, abrasion, pollen, combustion, insects, salts.	• Deposition of acidic / alkaline substances

Laser.indb 24 2015-03-04 13:30:49

Zanieczyszczenia atmosfery wpływają na dzieła sztuki w różny sposób i z różną szybkością, przy różnej wilgotności i temperaturze środowiska. Wymaga to szeroko zakrojonych badań wpływu zanieczyszczeń atmosfery na zachowanie się dzieł sztuki. Jak dotąd przedstawiono niewiele prac na temat efektów globalnych i długookresowych. Dowiedziono jednak, że niektóre zanieczyszczenia, szczególnie NO_x, SO_2 i niektóre węglowodory są głównymi cząstkami zanieczyszczeń odpowiedzialnymi za degradację dzieł. Zalecane graniczne wartości tych substancji, podawane przez osoby odpowiedzialne za środowisko w galeriach i muzeach, są znacznie niższe niż te dla środowiska na zewnątrz, akceptowalne w ochronie zdrowia ludzkiego. Aby więc zabezpieczyć dzieła przed niekorzystnym wpływem tych substancji, muszą one znaleźć się pod kontrolą - być monitorowane i usuwane. Pomiar tych substancji na poziomie koncentracji kilku ppb jest zadaniem trudnym. Może on być wykonywany poprzez ich pobieranie i analizy laboratoryjne przy użyciu złożonych, kosztownych i czasochłonnych technik chemicznych i fizycznych. Z tej właśnie przyczyny takie stanowiska nie są dostępne w większości muzeów i sal wystawowych. Metody konwencjonalne wykorzystują np. rurki gazowe, które kolekcjonują próbki powietrza przez dłuższy okres, a następnie wracają do laboratorium w celu wykonania pomiarów.

Air pollution affects the works of art in various ways and at different rates, at different humidity and temperature of the environment. This requires extensive research on the impact of air pollution on the behaviour of the works of art. So far, few works have been presented on global and long-term effects. However, it has been confirmed that certain impurities, particularly NO_x, SO_2 and some hydrocarbons are the main pollutants responsible for the degradation of works. Recommended limits for these substances, provided by persons responsible for the environment in galleries and museums, are much lower than those for the outdoor environment acceptable in the protection of human health. In order to protect works from adverse effects of these substances, they must be under control, i.e. they need to be monitored and removed. Measurement of these substances at the level of concentration of several ppb is a difficult task. It can be done through their collection and laboratory analysis that involve complex, costly and time-consuming chemical and physical techniques. This is why such stands are not available in most museums and exhibition halls. Conventional methods use e.g. gas tubes that collect air samples over a longer period of time and then go back to the laboratory so that measurements may be conducted. There

Laser.indb 25 2015-03-04 13:30:49

Istnieje więc zapotrzebowanie na tanie, przyjazne dla użytkownika optyczne systemy monitoringu zanieczyszczeń atmosfery w czasie rzeczywistym. Techniki laserowe i systemy optoelektroniczne polegają na wykorzystaniu różnych procesów oddziaływania i pomiarze odpowiedzi substancji zanieczyszczających na światło laserowe. Jest to np. zjawisko absorpcji światła (danej długości fali promieniowania) w pasmach absorpcyjnych danego gazu, rozproszenie Ramana, itp. Metody monitoringu oparte na spektroskopii laserowej, jak np. laserowo indukowanej fluorescencji wydają się być zbyt skomplikowane i kosztowne. Pod uwagę brane są natomiast systemy pomiarowe oparte na absorpcji, wykorzystujące przestrajane diody laserowe lub szerokopasmowe i termiczne źródła takie, jak lampy ksenonowe.

1.3 METODY USUWANIA NAWARSTWIEŃ

Pierwszym etapem w konserwacji dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze jest najczęściej proces analizy szkód i zniszczeń danego obiektu. Kolejnym etapem może być bardzo trudny proces czyszczenia obiektu, czyli usuwania („szkaradnych") czarnych nawarstwień i zanieczyszczeń z kruchych, rozsypujących się rzeźb. Proces czyszczenia może przywrócić stan pierwotny obiektu, ale przede wszystkim służy do

is, therefore, a need for inexpensive, user-friendly optical systems for monitoring atmospheric pollution in real time. Laser technologies and optoelectronic systems use a variety of processes involving treatment and measuring of the impact of pollutants response to laser light. Those include for example the light (particular radiation wavelength) absorption phenomenon in absorption bands of a given gas, the Raman scattering, etc. Monitoring methods based on laser spectroscopy, such as laser induced fluorescence, appear to be too complicated and expensive. What is considered, though, are measuring systems based on absorption that use tunable laser diodes or broadband and thermal sources, such as xenon lamps.

1.3 ENCRUSTATION REMOVAL METHODS

The first step in the conservation of works of art and historical objects in architecture is usually the process of analysing the damage and destruction of the object. The next step may involve a very difficult process of cleaning the object, i.e. of removing ("hideous") black layers and dirt from fragile, crumbling sculptures. The cleaning process may restore the original state of the object, but primarily it serves to reveal its true condition and state of preservation.

Laser.indb 26 2015-03-04 13:30:50

ujawnienia ich prawdziwej kondycji i stanu zachowania. Uszkodzenia niewidoczne pod nawarstwieniem zostają odsłonięte i naprawione. Przyczyny uszkodzeń są zlokalizowane i wyeliminowane, skutkiem czego zostaje zatrzymany lub opóźniony dalszy proces niszczenia, a w konsekwencji wydłużeniu ulega żywotność dzieła sztuki. Czyszczenie jest jednym z ważnych etapów w całym procesie konserwacji. Jeśli przeprowadza się je nieostrożnie, może ono pogorszyć estetykę obiektu lub spowodować jego dalsze uszkodzenie, które prowadzić może do przyspieszonego, dalszego procesu zaniku dzieła. W wyniku coraz szybszego i pogłębiającego się zanieczyszczenia środowiska naturalnego człowieka, obecnie obiekty zabytkowe czyści się coraz częściej. Czyszczenie staje się więc ważniejsze niż kiedykolwiek przedtem, a sam proces powinien zostać przeprowadzony przez wprawnych konserwatorów, używających najbardziej wyszukanych i najnowocześniejszych dostępnych technik.

Począwszy od XIX wieku metody czyszczenia były głównie metodami mechanicznymi, polegającymi na skrobaniu lub skuwaniu zanieczyszczonej warstwy powierzchniowej lub/i użyciu odpowiednich roztworów kwasów i ługów. Ulepszane mechaniczne metody czyszczenia powierzchni wykorzystywano przez kilkadziesiąt lat XX wieku,

The damaged parts that were invisible under the layers are revealed and repaired. Causes of damage are identified and eliminated, which stops or delays the further process of destruction, and consequently extends the life of the work of art. Cleaning is one of the important steps in the whole process of conservation. If it is carried out without due care, it may degrade the aesthetics of the object or cause its further damage, which may lead to further accelerated disintegration of the work. As a result of increasingly faster and exacerbating human environment pollution, historic buildings are now cleaned more frequently. Thus, cleaning becomes more important than ever, and the process itself should be carried out by skilled conservators who use the most sophisticated and advanced techniques available.

Since the 19th century, cleaning methods were mainly mechanical, involving scraping or hammering off the contaminated surface layer and/or using appropriate acids solutions and lyes. Improved mechanical surface cleaning methods have been used for several decades of the 20th century, and they consisted in less invasive mechanical action, using various types of abrasive materials ranging from grains of sand of several tens of microns in diameter, to

Laser.indb 27 2015-03-04 13:30:50

a polegały one na mniej inwazyjnym działaniu mechanicznym, wykorzystując różnego rodzaju ścierniwa, od ziarenek piasku o średnicy kilkudziesięciu mikronów, aż po rozdrobnione łupiny orzechów i oczywiście metody chemiczne wraz ze szczotkowaniem i spłukiwaniem wodą. Ostatni kwartał XX wieku dostarczył konserwatorom bardziej subtelniejszych ścierniw, a także tamponów chemicznych nakładanych na obiekty w postaci kompresów, umożliwiając większą kontrolę procesu chemicznego. Metody te nie były jednak zdolne do usuwania bardzo twardych skorup, zalegających na miękkim podłożu, a tym samym przyzwalały na stosowanie zgrubnych metod mechanicznych, uniemożliwiających zachowanie bezpieczeństwa obiektu i powodujących powstawanie z tego powodu nieodwracalnych strat. Pojawiał się dodatkowy problem, jeśli na kamiennej powierzchni znajdowały się ślady historyczne w postaci polichromii, finezyjnego reliefu lub ślady narzędzia rzeźbiarza.

Konwencjonalne metody czyszczenia wprowadzają kontakt narzędzia z powierzchnią i nie jest możliwe oczyszczenie obiektu bez spowodowania jej uszkodzenia. W najlepszym przypadku uszkodzenia te będą mało widzialne dla gołego oka. W najgorszym przypadku będą skandalicznie rażące, nie tylko umniejszające estetykę obiek-

broken up nut shells, and, of course, chemical methods involving brushing and rinsing with water. The last quarter of the 20th century provided conservators with finer abrasive materials, as well as chemical pads applied onto the objects in the form of compresses, thus allowing greater control of the chemical process. These methods, however, did not allow the removal of very hard crusts laying on soft substrate, and thus acquiesced in the use of deleterious mechanical methods that made it impossible to maintain the security of the object, which resulted in irreparable damage. Additional problem appeared if the stone surfaces contained historical traces such as polychrome, intricate reliefs and traces of the sculptor's tool.

Conventional cleaning methods involve contact between the tool and the surface, which makes it impossible to clean the object without causing damage to it. At best, such damage is hardly visible to the naked eye. In the worst case, it is outrageously glaring, and not only detrimental to the aesthetics of the object, but also making it more vulnerable to further and more rapid disintegration. Mechanical cleaning methods involve a collision of abrasive particles with a layer of dirt. The impact of particles against the encrustation results in breaking

Laser.indb 28 2015-03-04 13:30:50

tu, ale również zwiększające jego podatność na dalszy i szybszy jej zanik. Mechaniczne metody czyszczenia wprowadzają zderzenia cząsteczek ścierniwa z warstwą brudu. Uderzenie cząsteczki w nawarstwienie powoduje przerwanie jego kontaktu z powierzchnią obiektu. Nawarstwienie jest usuwane z powierzchni tak długo, aż konserwator sam nie zakończy procesu czyszczenia. Ten proces może trwać mały ułamek sekundy, lecz gdy warstwa nawarstwienia jest bardziej twarda niż podłoże, będące często w „kruchym stanie", będzie to powodować nieodwracalne straty w substancji zabytkowej – materiale pierwotnym.

Jedną z najbardziej pospolitych metod mechanicznych jest metoda mikro-ścierania, w której używa się mikroskopijnych cząsteczek (różnego rodzaju) w strumieniu skomprymowanego powietrza lub wody. Cząsteczki ścierniwa zwykle są bardziej twarde niż samo nawarstwienie, aby przy uderzeniu ich ostre krawędzie były zdolne odciąć od podłoża brud. Często powstaje jednak taka sytuacja, że nawarstwienie jest bardziej twarde niż znajdująca się pod nią powierzchnia obiektu i stąd ścierniwo nie jest w stanie rozróżnić w sposób inteligentny różnicy właściwości mechanicznych materiałów, a więc nawarstwienia i podłoża. Akcja zdzierania będzie więc kontynuowana, aż cząsteczki ścierające nie zostaną skierowane w inne miejsce.

its contact with the surface of the object. The encrustation is being removed from the surface until the conservator finishes the cleaning process. This process may take a fraction of a second, but if the deposit is harder than the substrate, which is often in "fragile condition", this causes irreversible damage to the historical, i.e. original material.

One of the most common mechanical methods is the micro-abrasion method, which uses microscopic particles (of various types) in a stream of compressed air or water. Abrasive particles tend to be harder than the layer itself, so that in the moment of the collision their sharp edges were able to cut off the dirt from the substrate. Often, however, the encrustation is harder than the surface of the object underneath, and hence the abrasive material is unable to intelligently find the difference between mechanical properties of materials, i.e. of the encrustation and of the substrate. The abrasive action will therefore continue until the abrasive particles are not directed elsewhere.

One example of this type is black crust on limestone, hiding a layer of delicate patina. In this case, cleaning by abrasion, no matter how skilfully done, causes some loss of the patina

Laser.indb 29 2015-03-04 13:30:50

Takim przykładem jest czarne, zeskorupiałe nawarstwienie na wapieniu, pod powierzchnią którego znajduje się warstwa delikatnej patyny. W tym przypadku czyszczenie przez zdzieranie, bez względu na to, jak bardzo zręcznie nie byłoby ono wykonane, spowoduje pewne ubytki materiału patyny. W granicznym przypadku misterne szczegóły powierzchni (zarzeźbienia) mogą zostać utracone. Przykładowy wynik ilustrujący czyszczenie przez zdzieranie przedstawiono na rys.1.3.1a. Czarne nawarstwienie zostało łatwo usunięte z pewnego obszaru, ale pozostało tam, gdzie uformowało się w bardziej twardą skorupę. Dalsza próba usunięcia tych bardziej nieustępliwych osadów (zdzieranie jest kontynuowane w dalszym ciągu na całej powierzchni, nawet na tej już oczyszczonej), będzie powodować powstawanie nierówności, usuwanie patyny i nieodwracalne ubytki substancji zabytkowej z powierzchni. Ilustrację idealnego czyszczenia przedstawiono na rys.1.3.1b.

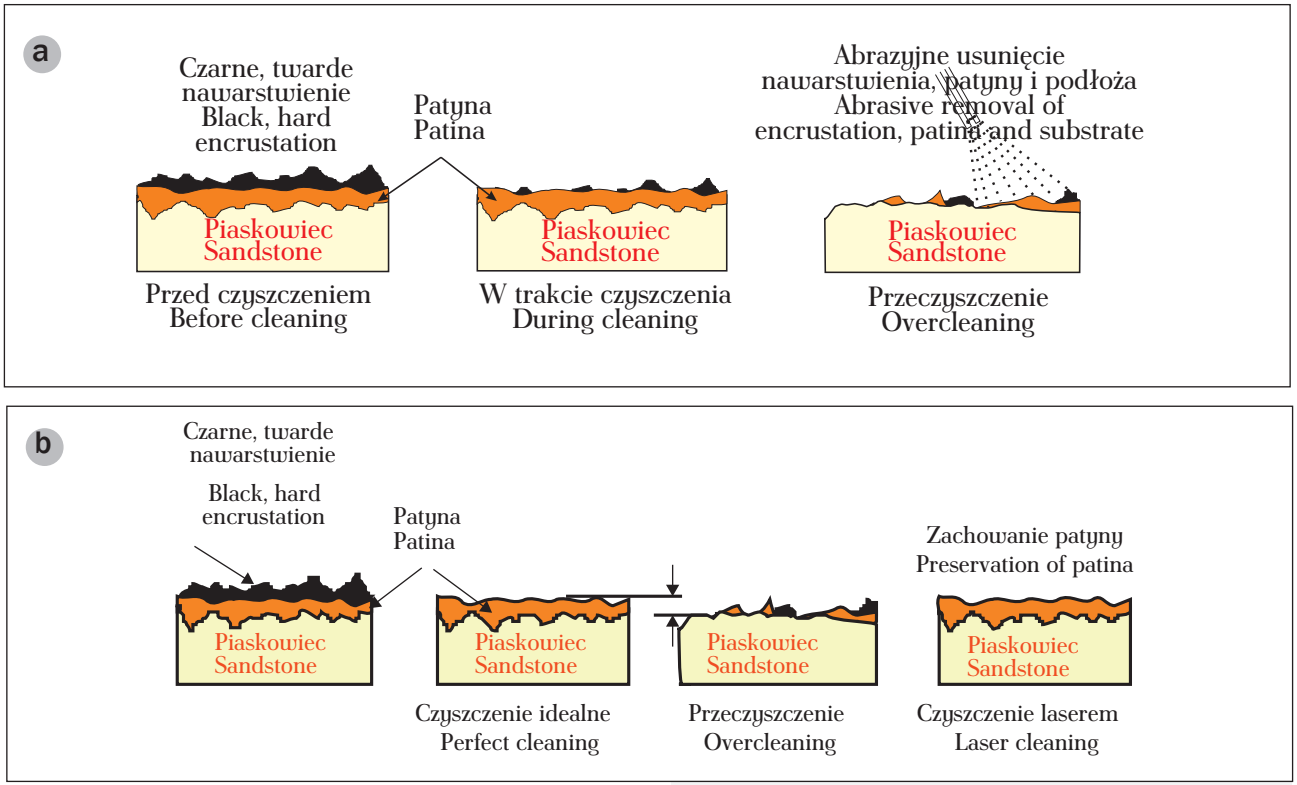
Na rys.1.3.2 zilustrowano efekt końcowy dwóch metod usuwania nawarstwienia z wapienia. Fotografia 1.3.2a przedstawia czyszczenie powierzchni laserem Nd:YAG z Q – modulacją, natomiast fotografia 1.3.2b ilustruje efekt czyszczenia powierzchni metodą konwencjonalną – delikatnym piaskowaniem z wodą pod niewielkim ciśnieniem.

material. In the extreme case, intricate details of the surface may be lost. An example result illustrating cleaning by abrasion is shown in fig.1.3.1a. The black layer was easily removed from a certain area, but it remained where it had formed a more rigid crust. A further attempt to remove the more tenacious deposits (abrasion continues on the whole surface, even on the already cleaned one), results in irregularities, removing of the patina and irreversible loss of historic substance from the surface. An illustration of perfect cleaning is shown in fig.1.3.1b.

Fig.1.3.2 illustrates the final effect of two methods of removing layers from limestone. Photo 1.3.2 presents cleaning of the surface with a Nd: YAG laser with Q - modulation, while photo 1.3.2b illustrates the result of cleaning the surface with a conventional method, i.e. gentle sandblasting with water under low pressure.

Cleaning methods based on water are mostly used to clean stone (water is cheap, readily available, safe for conservators, and the polarity of water molecules makes it effective in removing a wide type of contaminations). Water may be used either in the form of a powerful jet or a fine mist (steam) and is often combined with

Laser.indb 30 2015-03-04 13:30:50



Rys. 1.3.1. *Ilustracja metod czyszczenia. a) konwencjonalnego – abrazyjnego i b) porównanie metody idealnej z laserową.*

Fig.1.3.1. *Illustration of cleaning methods. a) conventional - abrasive b) comparison of the perfect method with the laser one.*

Metody czyszczenia w oparciu o wodę używane są najczęściej do czyszczenia kamienia (woda jest tania, łatwo dostępna, bezpieczna dla konserwatora, a polarność jej molekuł powoduje, że jest efektywna w usuwaniu szerokiego rodzaju zanieczyszczeń). Woda może być zastosowana albo w postaci silnego strumienia lub delikatnej

scrubbing with appropriate brushes to remove the more tenacious dirt deposits. However, penetration of water may be a problem leading to damage, as a result of its freezing and melting, staining, variable salt dissolution, plus the mechanical action of brushing may damage the surface of the object. Water in the form of a jet

Laser.indb 31 2015-03-04 13:30:50

Rys. 1.3.2. *Ilustracja porównania efektu czyszczenia powierzchni wapienia przy wykorzystaniu dwóch metod w konserwacji: a) – ablacyjnej z użyciem impulsowego promieniowania laserowego oraz b) mikro zdzierania – piaskowania.*

Fig.1.3.2. *Illustration of comparison of the surface cleaning result using two conservation methods a) - ablation method using pulsed laser radiation, and b) micro-abrasion - sandblasting.*

mgiełki (pary) i jest często połączona z szorowaniem za pomocą odpowiednich szczotek, aby usunąć bardziej nieustępliwe osady brudu. Jednakże penetracja wody może być problemem prowadzącym do uszkodzeń w wyniku jej zamarzania i topnienia, plamienia, zmienności rozpuszczania soli, a mechaniczne działanie szczotkowania może prowadzić do uszkodzenia powierzchni obiektu. Woda w postaci strumienia wypływającego z dyszy jest kierowana pod ciśnieniem na powierzchnię, a ciśnienie strumienia kontrolowane jest przez konserwatora. Brud jest albo rozpuszczony, zmiękczony i usunięty przez szczotkowanie, albo

coming from a nozzle is directed under pressure onto a surface, and the jet pressure is controlled by the conservator. Dirt is either dissolved, softened and removed by brushing or simply removed by the physical action of the jet. Water jet cleaning should be used where the surface is in good condition, so that the water cannot penetrate inside the object, and the pressure of the jet was not able to physically disrupt surface layers. The penetration of water into an object, e.g. terracotta may trigger changes in its appearance. Penetration of soluble salts from the inside of the material onto its surface,

Laser.indb 32 2015-03-04 13:30:50

po prostu usunięty przez fizyczne działanie strumienia. Czyszczenie strumieniem wody powinno być użyte tam, gdzie powierzchnia jest w dobrej kondycji, tak, aby woda nie mogła penetrować w głąb obiektu, a ciśnienie strumienia nie było w stanie fizycznie rozerwać warstw powierzchniowych. Penetracja wody do wnętrza np. terakoty może dać początek zmianom w jej wyglądzie. Przenikanie rozpuszczalnych soli z wnętrza materiału na jego powierzchnię, a następnie ich krystalizacja po odparowaniu wody prowadzi do formowania „szkaradnych" łat i wianuszków białej soli. Ten krystaliczny wykwit umniejsza stan wizualny obiektu, mimo że nie jest uszkodzeniem. Jednak, jeśli warunki są takie, że odparowanie ma miejsce poniżej powierzchni, wtedy ciśnienie wytworzone wewnątrz porów w procesie krystalizacji soli może być tak duże, że nastąpi jej uszkodzenie. Podstawowe problemy z czyszczeniem obiektów przy użyciu wody to:

- działanie fizyczne; ciśnienie, pod którym doprowadzana jest woda do obiektu lub szczotkowanie może spowodować uszkodzenia delikatnych powierzchni;
- wprowadzanie wody do wnętrza materiału; jej wpływ na obiekt nie może być dostatecznie długo kontrolowany, a jej obecność może prowadzić do problemów jeszcze długo po

and their subsequent crystallisation after evaporation of the water leads to the formation of "hideous" patches and wreath-lets of white salt. This crystalline efflorescence spoils the appearance of the object, although it is not a damage. However, if the conditions are such that the evaporation occurs below the surface, the pressure generated within the pores in the process of salt crystallisation may be large enough to lead to a damage. Basic problems of cleaning objects using water include the following:

- physical action; the pressure under which water is provided to an object or brushing may damage delicate surfaces;
- introducing water inside the material; its impact on the object cannot be controlled long enough, and its presence may lead to problems long after the cleaning process is completed;
- dissolution of surface layer.

If, e.g. a marble sculpture is exposed to polluted air, the areas of its surface are subjected to chemical transformation of calcite to far more soluble gypsum, thereby forming a patina [3-6]. If water is used to clean sculptures, the protective patina will be destroyed.

Laser.indb 33 2015-03-04 13:30:50

zakończeniu procesu czyszczenia;
- rozpuszczenie warstwy powierzchniowej.

Jeśli np. marmurowa rzeźba jest wystawiona na działanie zanieczyszczonej atmosfery, wtedy obszary jej powierzchni zostają poddane transformacji chemicznej od kalcytu aż do dużo bardziej rozpuszczalnego gipsu, tworząc patynę [3-6]. Jeśli do czyszczenia rzeźb użyje się wodę, patyna, która ją chroni ulegnie zniszczeniu.

Inna ważna grupa metod czyszczenia oparta jest o wykorzystanie środków chemicznych. Podstawową ideą jest to, aby wyselekcjonowany czynnik chemiczny reagował i rozpuszczał brudną warstwę bez oddziaływania z rdzennym materiałem obiektu. Na małą skalę, czyszczenie powierzchni kamiennych przy użyciu rozpuszczalników i reagentów może być stosowane z powodzeniem. Na dużą skalę jest to bardzo ryzykowne, zarówno dla obiektu, jak i konserwatora. Do czyszczenia kamienia często używa się roztworów odpowiednich kwasów i kwaśnych soli. Czyszczoną powierzchnię moczy się wcześniej wodą, a kwas dostarczany jest do powierzchni w postaci aerozolu pod niskim ciśnieniem lub w postaci żelu. Zmywany jest bezpośrednio z obiektu przy użyciu niskociśnieniowego strumienia wody, po odpowiednim czasie działania kwasu. Obserwuje się jednak narastające

Another important group of cleaning methods is based on the use of chemicals. The basic idea is that the selected chemical agent reacts and dissolves the dirty layer without reacting with the original material of the object. On a small scale, cleaning stone surfaces with solvents and reagents may be successful. On a large scale, although, it is very risky for both the object and the conservator. Solutions of appropriate acids and acid salts are often used to clean stone. The surface to be cleaned is first wetted with water, and the acid is applied onto the surface in the form of an aerosol under low pressure or as a gel. It is washed off directly from the object by using a low-pressure water jet, after an appropriate time of acid application. However, increasing problems are observed when it comes to the effect that the acid has on the object (despite washing it with water) after a long period after the cleaning, which in many cases may lead to intensified weathering of e.g. stone [7,8]. Stained and bleached spots may also result from chemical reactions occurring inside the stone, where large quantities of substances are released to the surface. Efflorescence, crystalline deposit, weathering and salt disturbance are direct results of the use of chemicals which produce salts when reacting or by dissolving (inorganic) minerals inside the stone and their

Laser.indb 34 2015-03-04 13:30:50

problemy związane z działaniem kwasu na obiekt (pomimo zmycia go wodą) po długim okresie od chwili czyszczenia, co w wielu przypadkach może doprowadzić do wzmożonego wietrzenia np. kamienia [7-8]. Zaplamienia i wybielania mogą być również wynikiem reakcji chemicznych wewnątrz kamienia, w którym uwalniają się na powierzchnię duże ilości substancji. Wykwit, nalot krystaliczny, wietrzenie i zakłócenie solne są bezpośrednimi wynikami stosowania chemikaliów, które reagując wytwarzają sole, albo przez rozpuszczenie minerałów (nieorganicznych) wewnątrz kamienia i powtórne wytrącenie ich na lub w pobliżu powierzchni, lub też przez reakcję pomiędzy dwoma stosowanymi chemikaliami (czasem kwas i zasada są stosowane razem tak, że jeden będzie neutralizował drugi). Silne kwasy nie tylko usuwają niepożądane warstwy brudu, ale również wytrawiają minerały z powierzchni kamiennej. Prowadzi to do zwiększonego zatrzymywania wody, zachęcając do rozwoju mikroorganizmów, takich jak np.: glony i wodorosty, które uszkadzają obiekty. Wszystkie te zjawiska obserwuje się tam, gdzie został zastosowany do czyszczenia roztwór kwasu fluorowodorowego, np. do obiektów wykonanych z piaskowca. Badania przeprowadzone w Glasgow doprowadziły do wniosku, że „oczyszczone chemicznie budynki w mieście są w tym momencie w stanie kwitnienia", [7,8]. Zaobserwowano nalo-

re-precipitation on or near the surface, or by the reaction between two chemicals used (sometimes acid and alkali are used together so that one neutralises the other). Strong acids not only remove unwanted layers of dirt, but also etch minerals from the stone surface. This leads to increased water retention, encouraging the development of microorganisms such as algae and seaweed, which damage objects. All these phenomena are observed where cleaning involved using hydrofluoric acid solution, e.g. for objects made of sandstone. Tests carried out in Glasgow led to the conclusion that "chemically cleaned buildings in the city are now living a period of flowering," [7,8]. Crystalline deposits, colour patches and salinities arising at a faster rate than those produced by mechanical cleaning methods have been observed.

Other disadvantages of the chemical methods include the inability to control movement and penetration range of the acids inside the object itself and the inability to monitor their reactions after their application. The conservator is not able to estimate how deep the solution will penetrate into the object, when the aggressive reaction stops nor how to prevent the solution's migration further into areas that may be susceptible

Laser.indb 35 2015-03-04 13:30:50

ty krystaliczne, zabarwienia i zasalania powstałe w szybszym tempie niż te, które oczyszczono metodami mechanicznymi.

Do innych wad metody chemicznej należy włączyć niezdolność do kontroli ruchu i zasięgu kwasów wewnątrz samego obiektu oraz niezdolność do monitoringu ich reakcji po zastosowaniu. Konserwator nie jest w stanie oszacować, jak głęboko użyty roztwór spenetruje obiekt, kiedy nastąpi zatrzymanie agresywnej reakcji lub w jaki sposób przeszkodzić, aby roztwór nie migrował dalej do obszarów, które mogą być podatne na uszkodzenia. Konserwator nie jest również w stanie określić wizualnie wyniku reakcji łączenia się brudu z obiektem, aż reagent nie zostanie zmyty wodą i po jakim czasie obiekt może być już nieodwracalnie uszkodzony. Dziś, aby uniknąć głębszej penetracji kwasów do wnętrza i ograniczyć działanie środków chemicznych na obiekt, używa się kompresów. Niekiedy środki chemiczne miksuje się z absorberem w postaci proszku, aby utworzyć pastę, którą nakłada się na powierzchnię obiektu. Podczas gdy taka pasta schnie, absorbuje brud z obiektu, a po kilku godzinach „szlam" zaczyna odpadać. Resztki kompresu usuwa się mechanicznie, a powierzchnię obiektu czyści się dejonizowaną wodą. Jeden z najbardziej pospolitych okładów chemicznych używanych w proce-

to damage. Conservator is also unable to visually determine the result of the reaction of the connection between dirt and the object until the reagent is washed off with water, nor after what time the object may be irreparably damaged. Today compresses are used to avoid further penetration of acids inside and to reduce the effect of chemicals on the object, Sometimes chemicals are mixed with absorber powder to form a paste, which is then applied onto the surface of the object. When drying, the paste absorbs dirt from the object, and after a few hours the "sludge" begins to fall off. Remnants of the compress are removed mechanically, and the surface of the object is cleaned with deionised water. One of the most common chemical compresses used in the process of stone cleaning is made of deionised water and magnesium metasilicate. Using a compress to clean stone is advantageous in that wetting of the surface is carried out in such a manner that the penetration of water into the stone is minimal, and the destruction of salts and minerals does not present such a large problem. The use of chemical compresses introduces, nevertheless, the physical contact with the object, and there still remains the problem of the lack of full control of the cleaning process.

Laser.indb 36 2015-03-04 13:30:50

sie czyszczenia kamienia wykonuje się z dejonizowanej wody i metakrzemianu magnezowego. Stosowanie okładu do czyszczenia kamienia ma tę zaletę, że moczenie powierzchni następuje w taki sposób, że penetracja wody do kamienia jest minimalna, a niszczenie soli i minerałów nie przedstawia już tak dużego problemu. Stosowanie okładów chemicznych wprowadza mimo wszystko kontakt fizyczny z obiektem i w dalszym ciągu pozostaje problem braku pełnej kontroli przebiegu procesu czyszczenia.

Każda z opisanych metod czyszczenia (mechaniczna i chemiczna) ma zalety i wady. W rękach zręcznego i doświadczonego konserwatora, który rozumie i zna naturę wprowadzanych materiałów i zasad ich użycia, odpowiednio użyta technika w usuwaniu warstw brudu kończy się powodzeniem. Jednak każda z tych technik wprowadza pewną formę interwencji podczas styku z obiektem – mechaniczną lub chemiczną. Nie jest więc możliwe całkowite usunięcie warstwy brudu z obiektu bez spowodowania zmian jej powierzchni, jakkolwiek subtelnie nie zostałoby to wykonane. Nie jest możliwe usunięcie brudnych warstw z kamienia używając metody czyszczenia: powietrze – ścierniwo, bez powodowania zderzeń pomiędzy cząsteczkami ścierniwa a powierzchnią kamienia. Kontrola grubości usuwanego nawar-

Each of the cleaning methods (mechanical and chemical) described has both advantages and disadvantages. In the hands of a skilled and experienced conservator who understands and knows the nature of the materials introduced as well as rules of their use, a properly used technique of removing layers of dirt is successful. However, each of these techniques introduces some form of intervention at the time of contact with the object - of mechanical or chemical nature. It is therefore impossible to completely remove the layer of dirt from the object without causing changes in its surface, no matter how delicately it is done. It is not possible to remove dirty layers from the stone by using cleaning methods involving air and abrasive materials, without causing collisions between particles of abrasive material and the stone surface. A major problem is presented by controlling the thickness of the encrustation to be removed and monitoring the cleaning process. The real condition of the surface cleaned is often invisible, being obscured by abrasive material in the form of powder, water or chemicals. In many cases, the cleaned surface becomes visible only when the damage has already been done. Visual linkage between the operator and the cleaned object is impossible. These fundamental problems mean that there

Laser.indb 37 2015-03-04 13:30:50

stwienia i monitorowanie procesu czyszczenia stanowi zasadniczy problem. Prawdziwy stan oczyszczanej powierzchni jest często niewidoczny, zasłonięty przez ścierniwo w postaci proszku, wodę i chemikalia. W wielu przypadkach czyszczona powierzchnia staje się widoczna dopiero wtedy, gdy uszkodzenie już zostało dokonane. Wizualne sprzężenie operatora z czyszczonym obiektem jest niemożliwie. Te podstawowe problemy oznaczają, że zawsze będą obiekty, które są zbyt kruche aby być czyszczone za pomocą metod konwencjonalnych i eksponaty, które nie mogą być czyszczone do odpowiedniego wymaganego poziomu z obawy uszkodzenia ich powierzchni.

Konieczne jest więc opracowanie subtelniejszych metod czyszczenia, aby konserwator mógł stwierdzić:

Co powinno zostać usunięte z obiektu? Co będzie zachowane? Jaki jest rodzaj usuniętego materiału? W jaki sposób?

Wynika to z faktu, że rozróżnienie pomiędzy optymalnym czyszczeniem i przeczyszczeniem jest często całkiem subtelne. Oryginalna powierzchnia czyszczonego obiektu powinna pozostać niezmieniona. Dostępność technik oferujących kontrolę i niezbędną precyzję podczas procesu oczyszczania powierzchni jest więc ogra-

will always be objects that are too fragile to be cleaned using conventional methods as well as exhibits that cannot be cleaned to the proper required level for fear of damage to their surface.

It is therefore necessary to develop finer cleaning methods, so that the conservator was able to say:

What should be removed from the object? What will be preserved? What is the type of material removed? In what way?

This is due to the fact that the distinction between optimal cleaning and overcleaning is often quite subtle. The original surface of the object to be cleaned should remain unchanged. The availability of techniques offering control and necessary precision in the course of surface cleaning process is therefore limited and means that the best possible method should be matched to each object.

Theoretically, the essential and unconditionally followed rule is to leave the tested object intact. In practice it is rarely achievable.

Laser.indb 38 2015-03-04 13:30:50

niczona i oznacza, że do danego obiektu powinno się dobierać metodę najlepszą z możliwych.

Teoretycznie naczelną i bezwarunkowo stosowaną zasadą jest pozostawienie badanego obiektu w stanie nienaruszonym. W praktyce jest to rzadko możliwe do osiągnięcia.

1.4 LASER W KONSERWACJI DZIEŁ SZTUKI – RYS HISTORYCZNY

Idea selektywnego usuwania z powierzchni nawarstwień, farb i lakierów, brudnych plam i innych zanieczyszczeń za pomocą promieniowania laserowego nie jest nowa. Przedstawił ją w 1965r. Arthur Schawlow, jeden z pionierów i twórców lasera, używając narzędzia nazwanego „gumką laserową" – „laser eraser" [9]. Zademonstrował on selektywne odparowanie absorbujących, czarnych pigmentów tuszu drukarskiego z białej kartki papieru, wykorzystując impulsowy laser rubinowy. Pierwsze próby usuwania nawarstwień z rzeźb kamiennych zostały przeprowadzone przez Johna Asmusa na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, podczas czyszczenia portalu lwa w Ducale Palazzo w Wenecji [10]. Pomimo iż efekt oczyszczania był imponujący, to przez długi czas laserowa metoda wykorzystywana była bardzo rzadko. Nowe podejście w konserwacji – czyszczeniu dzieł sztuki przez

1.4 LASER IN CONSERVATION OF WORKS OF ART - HISTORY

The idea of selective removal of encrustations, paints and varnishes, dirty stains and other impurities from the surface by means of laser radiation is not a new one. I was introduced in 1965 by Arthur Schawlow, one of the pioneers and creators of the laser, using a tool called "laser eraser" [9]. He demonstrated the selective evaporation of absorbing black pigments of printing ink from a white sheet of paper, using ruby pulsed laser. The first attempts to remove encrustations from stone sculptures were made by John Asmus in the early seventies of the last century, in the course of cleaning the lion portal in Palazzo Ducale in Venice [10]. Although the cleaning result was quite impressive, the laser method was used only rarely for a long time. A new approach in conservation - cleaning of works of art for many years could not pass beyond the experimental stage. It was mainly due to the limitations of the design technology of an adequate pulsed laser system. Pulsed lasers available at that time, namely ruby and Nd: YAG with a low pulse repetition rate, in the absence of appropriate systems to bring the laser beam to the object, could not compete with conventional methods. In addition, their very low

Laser.indb 39 2015-03-04 13:30:50

kilkanaście lat nie mogło pokonać fazy eksperymentalnej. Spowodowane ono było głównie ograniczeniami technologii wykonania odpowiedniego impulsowego systemu laserowego. W tamtym okresie dostępne impulsowe lasery: rubinowy i Nd:YAG o niskiej częstości repetycji impulsów, przy braku odpowiednich systemów doprowadzenia wiązki laserowej do obiektu nie mogły konkurować z metodami klasycznymi. Ponadto, ich bardzo niska sprawność, zwłaszcza lasera rubinowego, stosunkowo duża zawodność i wysoki koszt nie rokowały jakiejkolwiek nadziei przyjaznej wprowadzeniu technologii laserowej. Nowa metoda nie miała skali odniesienia dla określonego obszaru zastosowań w porównaniu z tradycyjnymi metodami. Wprowadzanie technologii laserowej trwało prawie dwie dekady, a spowodowane było głównie małą wydajnością laserów, sceptycyzmem i ostrożnością konserwatorów, a także dużym kosztem nowej technologii. W tym okresie laserowa technologia nie wychodziła praktycznie z laboratoriów, a pojedynczych przypadków czyszczenia laserem nie można było uznać za pełne jej wdrożenie [11-14].

Dopiero pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku zaobserwowano wzrastające zainteresowanie konserwatorów, archeologów, naukowców i historyków sztuki badaniami i wykorzystywaniem metod laserowych w odniesieniu do problemów

efficiency, especially in the case of the ruby laser, a relatively low reliability and high cost left little hope as to the introduction of laser technology. The new method did not have a reference scale for a specific area of application in comparison with the traditional methods. It took almost two decades to introduce laser technology, which was mainly due to low performance of lasers, scepticism and cautious approach of the conservators, as well as to high costs of the new technology. The laser technology at the time was virtually confined to laboratories, since single cases of laser cleaning could not be considered to be a fully-fledged implementation [11-14].

It was only the late eighties of the last century that saw an increasing interest among the conservators, archaeologists, scientists and art historians in the research and use of laser methods in relation to Cultural Heritage problems. This was mainly associated with an increase in the understanding of the process of laser cleaning itself, and with the further development of laser technology. This led to formation of a very active, interdisciplinary community across Europe, working in research on the use of modern laser techniques in a wide range of diagnostic and conservation tasks. The new technique and technology was

Laser.indb 40 2015-03-04 13:30:50

Dziedzictwa Kultury. Związane to było głównie ze wzrostem zrozumienia samego procesu laserowego oczyszczania, a także dalszym rozwojem technologii laserowej. Stworzyło to w całej Europie bardzo aktywną, interdyscyplinarną społeczność, pracującą w badaniach nad wykorzystaniem nowoczesnych technik laserowych w szerokim zakresie zadań diagnostycznych i konserwatorskich. Testowano i oceniano nową technikę i technologię w wielu ważnych zadaniach oczyszczania: kamieni, metali, malowideł, papieru; w diagnostyce strukturalnej fresków i malowideł; laserowej analizie składu materiałów itp. Wiele programów finansowanych przez Komisję Europejską (4PR, 5PR, EUREKA) wniosło wkład w opracowanie laserowych przyrządów i technik. Akcje G7 i G8 COST realizowały główne zadania: nadzoru nad postępem osiągniętym w opracowaniach nowego oprzyrządowania, gromadzenia ocen technik laserowych na podstawie badań studialnych (case studies), rozszerzenia konserwacji laserowej na całą Europę, przygotowania zaleceń dla najlepszych praktyk i wytycznych dla bezpieczeństwa. Dziś techniki laserowe są z powodzeniem wykorzystywane w konserwacji szeregu arcydzieł w wielu krajach europejskich, wykazując niespotykaną dotąd ogromną zaletę zachowania warstw historycznych, szczególnie na kamieniu i metalu. Zadbano również o transfer technologii, aby wielu producen-

tested and assessed in a number of important cleaning tasks of stones, metals, paintings, paper; in the structural diagnostics of frescoes and paintings; laser analysis of the composition of materials, etc. Many of the programs funded by the European Commission (FP4, FP5, EUREKA) have contributed to the development of laser instruments and techniques. The main tasks of the G7 and G8 COST actions were the supervision of the progress achieved in the development of new instrumentation, the collection of laser techniques evaluations on the basis of case studies, the extension of laser conservation to the entire territory of Europe, the preparation of recommendations for best practices and guidelines for safety. Nowadays, laser techniques are successfully used for conservation of a number of masterpieces in many European countries, showing an unprecedented great advantage of preserving historical layers, especially on stone and metal. Technology transfer was also provided so that many manufacturers of laser systems were able to produce new systems on the basis of the results of research projects. On the other hand, the increasing number of professional restorers is getting acquainted with the new instruments and methods. It becomes clear that due to the specific characteristics of laser radiation, the

Laser.indb 41 2015-03-04 13:30:50

tów systemów laserowych mogło wyprodukować nowe systemy na podstawie wyników projektów badawczych. Z drugiej strony, wzrastająca liczba profesjonalnych restauratorów zostaje zapoznana z nowymi instrumentami i metodami. Staje się jasne, że ze względu na specyficzne cechy promieniowania laserowego, skala czasu potrzebna na rozpowszechnienie innowacyjnych metod w społeczności konserwatorskiej wymaga długiego okresu inwestowania i nowych programów badawczych. Do 1995 roku wyniki naukowe dotyczące wykorzystania technologii laserowej prezentowane były na różnych i licznych konferencjach, a także na spotkaniach konserwatorskich bez możliwości prawdziwych interdyscyplinarnych debat i wymian doświadczeń na ten temat.

W 1995 roku na Krecie została zorganizowana po raz pierwszy międzynarodowa konferencja LACONA (Lasery w Konserwacji Dzieł Sztuki) [15-20], poświęcona temu zagadnieniu. Zostały tam zaprezentowane pozytywne wyniki wielu badań czyszczenia kamienia, metalu, pergaminu i malowideł, a także przedstawiono dalsze prognozy związane z rozszerzeniem tej technologii na inne obiekty wykonane z innych materiałów. Została również zaprezentowana liczna literatura, cytowana w referatach z wcześniejszych prac badawczych (do roku 1995), a związana z wykorzystaniem promieniowa-

approximate time needed for the dissemination of innovative methods among the community of conservators requires a long period of investment and new research programs. Until 1995, the scientific results related to the use of laser technology have been presented at various and numerous conferences as well as conservators' meetings with no possibility of real interdisciplinary debates and exchanges of experience on the subject.

In 1995, the first international conference LACONA (Laser in the Conservation of Artworks) [15-20], devoted to this subject was held on the island of Crete. It featured presentations of positive results of many tests involving cleaning of stone, metal, parchment and paintings, and of future predictions as to the extension of this technology to other objects made of other materials. A vast body of literature, cited in papers, from earlier research studies (up to 1995) associated with the use of laser radiation in the conservation of works of art has also been presented. This conference has become an essential reference for further development and dissemination of laser technology in the field of conservation. Further studies were presented at the following LACONA conferences, held regularly every two years. Approval of the community of

Laser.indb 42 2015-03-04 13:30:50

nia laserowego w konserwacji dzieł sztuki. Konferencja ta stała się podstawowym odniesieniem do dalszego rozwoju i rozpowszechniania technologii laserowej w konserwacji. Dalsze badania przedstawiane były na kolejnych konferencjach LACONA, odbywających się cyklicznie co dwa lata. Akceptacja w środowisku naukowym i konserwatorskim została zdefiniowana jako pewnego rodzaju rewolucja w procedurach konserwacji, co zostało udokumentowane przez wzrastającą liczbę badań opublikowanych w różnych dziedzinach nauki, jak również w czasopismach interdyscyplinarnych. Najważniejsze jest, że w wyniku tego zbiorowego wysiłku, który połączył naukową społeczność wielu krajów, zaprezentowano ogromny postęp prezentowany od eksperymentowania w laboratoriach aż do codziennej praktyki na bezcennych obiektach Dziedzictwa Kultury.

Co jest takiego specyficznego w laserach? Odpowiedź zawiera się w fakcie, że te potężne źródła światła mogą być wykorzystane na wiele sposobów, wykorzystując różne rodzaje zjawisk oddziaływania światła z materią. Stwarzają elastyczne narzędzia do nieniszczących i bezdotykowych analiz oraz diagnostyk strukturalnych dzieł w restauracji. W badaniach podstawowych wykorzystywane są głównie techniki spektroskopowe: laserowo indukowana fluorescencja (LIF); laserowo indukowana

scientists and conservators has been defined as a kind of revolution in conservation procedures, which was documented by a growing number of studies published in various scientific fields, as well as in interdisciplinary journals. Most importantly, as a result of this collective effort that brought together the scientific community of various countries, a huge progress has been presented from the experiments in laboratories to the daily practice involving priceless objects of the Cultural Heritage.

What is so special about lasers? The answer lies in the fact that these powerful light sources may be used in many ways, using various phenomena involving the interaction of light and matter. They provide flexible tools for non-destructive and non-contact analysis and structural diagnostics of works under restoration. Basic research mainly uses spectroscopic techniques, including laser-induced fluorescence (LIF); laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS); Raman spectroscopy and infrared spectroscopy (IR) as tools for characterising materials (e.g. LIF for pigments, varnishes, binders, LIBS for pigments, stratigraphic analysis, real-time monitoring, etc.). Other laser techniques (3D scanning, holography, holographic

Laser.indb 43 2015-03-04 13:30:50

spektroskopia przebicia (LIBS); spektroskopia Ramana i spektroskopia w podczerwieni (IR) jako narzędzia do charakteryzowania materiałów (np. LIF dla pigmentów, werniksów, lepiszcz; LIBS dla pigmentów, analiz stratygraficznych, monitoringu w czasie rzeczywistym itp.) Inne techniki laserowe (skanowanie 3D, holografia, interferometria holograficzna, wibrometria Dopplera) dostarczają informacji o defektach strukturalnych; zobrazowanie fluorescencyjne pigmentów, czasy zaniku i szerokości ich widm, zobrazowanie wielospektralne (IR-VIS) i kolorymetria – wszystkie są wykorzystywane do detekcji stanu zachowania warstw obiektu, pigmentów w malowidłach. W ostatnich latach opracowano również szereg nowych technologii obrazowania optycznego, tworząc ekscytującą bazę dla badań łączących wiele dyscyplin naukowych. Jedną z nich jest koherencyjna tomografia optyczna. Tomografia optyczna z użyciem światła częściowo spójnego (OCT – *Optical Coherence Tomography*) jest jedną z najnowocześniejszych, nieinwazyjnych technik diagnostycznych stosowanych od kilkunastu lat w medycynie [21-23], a od kilku lat w badaniach materiałowych [24], w tym w konserwacji zabytków [25-29]. Tomograf optyczny wykorzystywany jest w konserwacji do nieinwazyjnego, jedno, dwu i trójwymiarowego obrazowania obiektów, ze szczególnym naciskiem na zobrazowanie warstw malarskich, werniksów, ich

interferometry, Doppler vibrometry) provide information on structural defects; fluorescent imaging of pigments, decay times and width of their spectra, multispectral imaging (IR-VIS) and colorimetry - all of them are used to detect the state of preservation of the object layers and of pigments in paintings. In recent years, a number of new optical imaging technologies has been developed, thus creating an exciting base for research combining various scientific disciplines. One of them is the optical coherence tomography. Optical tomography using partially coherent light (OCT - Optical Coherence Tomography) is one of the most advanced non-invasive diagnostic techniques used for over a decade in medicine [21-23], and for several years in the tests of materials [24], including the conservation of monuments [25-29]. Optical tomography is used in conservation for non-invasive, one, two and three-dimensional imaging of objects, with a particular emphasis on the imaging of paint layers, varnishes, their damage, layer separations, overpaintings, as well as during “on line” control of removing, for example, yellowed and cracked varnish using laser ablation [30-34].

Today, cleaning by pulsed laser radiation is considered to be the most universal method

Laser.indb 44 2015-03-04 13:30:50

uszkodzeń, rozwarstwień, przemalowań a także podczas kontroli „on line" usuwania np. pożółkłego i spękanego werniksu metodą ablacji laserowej [30-34].

Dziś czyszczenie za pomocą impulsowego promieniowania laserowego postrzegane jest jako najwszechstronniejsza metoda stosowana do usuwania: czarnych, zeskorupiałych nawarstwień z marmuru, wapienia, piaskowca, terrakoty, gipsu i alabastru; przemalowań z jednobarwnych tkanin dekoracyjnych i czarnych siarczków srebra z nici srebrnych z pozłotą; pleśni i grzybów z tkanin, skór, pergaminu i papieru; zwapnień z wyrobów glinianych i ołowianych; korozji z brązu, aluminium, żelaza i licznych stopów metalowych; skorup z witraży; graffiti z betonu; zanieczyszczeń z budowli historycznych; brudu, werniksu, spoiw i przemalowań z warstw malarskich, a także warstw zanieczyszczających z kości zwierzęcej, kości słoniowej, macicy perłowej, a nawet ptasich piór.

Laser nie jest jednak panaceum na wszystkie kłopoty konserwatorskie. Istnieją obiekty, do których nadaje się on idealnie i obiekty, do których nie nadaje się wcale. Jeśli używa się lasera nieodpowiednio lub nieostrożnie (podobnie jak każdego innego narzędzia), może on spowodować nieodwracalne uszkodzenie obiektu, ale jeśli używany

to remove the following: black, crusted layers from marble, limestone, sandstone, terracotta, plaster and alabaster; overpaintings from monochromatic decorative fabrics and black silver sulphides from gilt silver threads; mildew and mould from fabric, leather, parchment and paper; calcifications from products made of clay and lead; corrosion from brass, aluminium, iron and various metal alloys; crusts from stained glass; graffiti from concrete; contaminations from historic buildings; dirt, varnish, binders and overpaintings from paint layers, as well as layers of pollutants from animal bone, ivory, mother of pearl, and even feathers.

Laser is not, however, a universal remedy for all the conservators' problems. There are objects for which it is perfect and there are others, for which it is not suitable at all. If the laser is used improperly or recklessly (as is the case with any other tool), it may cause irreversible damage to the object, but if used carefully and by a skilled conservator, the laser offers great precision and perfect control, that was previously - at the times of conventional methods - unavailable.

Laser.indb 45 2015-03-04 13:30:50

jest ostrożnie i przez wprawnego konserwatora, wtedy laser oferuje wspaniałą precyzję i doskonałą kontrolę, niedostępną wcześniej przy użyciu metod klasycznych.

1.5 GENEZA, BADANIA, ETYKA I OGRANICZENIA

1.5.1 GENEZA

Nie ulega wątpliwości, że w czasie ewolucji ostatnich tysięcy lat rodzaj ludzki oparł swą tożsamość kulturalną na wyimaginowanym przedstawieniu siebie samego i swojej roli w życiu, na organizacji społeczeństwa, na rozpoznaniu natury i rzeczy. Poprzednie cywilizacje, przechodząc do czasów nowożytnych, dały nam ogromne dziedzictwo pozostałości archeologicznych, historycznych budowli, pomników, kościołów i innych miejsc religijnych, kolekcji sztuki w muzeach i galeriach, zapisanych emocji i antycznych dokumentów. Są one podstawą tożsamości kulturalnej każdego narodu i kraju, który rozpoznaje z dziedzictwa przeszłości np. pochodzenie języków, wyrażenia kulturowe i tradycję religijną. Jest to szczególnie ważne dla Polski i krajów europejskich, gdzie sekwencje cywilizacji, zmienność okresów historycznych, ruchliwość etniczna i koncentracja wielu narodów na ograniczonym

1.5 ORIGIN, RESEARCH, ETHICS AND LIMITATIONS

1.5.1 ORIGIN

There is no doubt that during the past thousands years of evolution, men based their cultural identity on the imaginary presentation of themselves and their role in life, on the organisation of society and on discovering the nature and things. Previous civilisations, already in modern times, have given us a huge legacy of archaeological remains, historic buildings, monuments, churches and other places of religious cult, art collections in museums and galleries, recorded emotions and ancient documents. They are the basis of the cultural identity of every nation and country that recognises in the legacy of the past for example the origin of languages, cultural expressions and religious tradition. This is especially important for Poland and European countries, where the sequences of civilisation, variability of historical periods, ethnic mobility and concentration of many nations within a limited area, led to an extremely rich and complex accumulation of archaeological remains and variety of museum collections. The abundant prehistoric and historical

Laser.indb 46 2015-03-04 13:30:50

obszarze dały ekstremalnie bogate i złożone nakładanie się pozostałości archeologicznych i różnorodność zbiorów muzealnych. Bogactwo dziedzictwa prehistorycznego i historycznego daje krajom europejskim, a w tym Polsce wiodącą rolę w zachowaniu i konserwacji tak złożonej różnorodności dzieł sztuki, z których większość narażona jest na ciągłe niebezpieczeństwo uszkodzenia lub nawet zniszczenia. Jest to konsekwencją wielu czynników, a większość z nich związana jest z naszym zachowaniem i zwyczajami. Niektóre z nich pochodzą od zjawisk naturalnych i takich klęsk żywiołowych, jak trzęsienie ziemi, powódź, ale większość problemów ze zniszczeniami obiektów zabytkowych na wolnym powietrzu pochodzi od zanieczyszczeń przemysłowych. Przy lokalizacji w pomieszczeniach zamkniętych, zniszczenia są w równym stopniu związane z zawartymi w powietrzu cząstkami jak i zanieczyszczeniami. Era przemysłowa jest względnie młoda, ale jej wpływ na dzieła sztuki był ogromny, przyspieszając problemy ze zniszczeniami w Europie i większości krajów rozwiniętych w XX wieku, a rozpoczynając je obecnie w krajach rozwijających się.

1.5.2 KONIECZNOŚĆ BADAŃ

Historyczne i kulturalne znaczenie dzieł sztuki pochodzi od wielu czynników niematerialnych

heritage gives European countries, including Poland, the leading role in the preservation and conservation of such a complex variety of works of art, most of which is exposed to constant danger of damage or even destruction. This is a consequence of various factors, most of which are associated with our behaviour and habits. Some of them derive from natural phenomena and disasters such as earthquakes, floods, but most of the problems related to the damage of outdoor historic buildings results from industrial pollution. In the case of enclosed spaces, the damage is due to both particles suspended in the air and to pollution. The industrial era is relatively young, but its impact on the works of art has been huge, accelerating problems related to damage in Europe and the majority of developed countries in the 20th century, and triggering them now in developing countries.

1.5.2 NEED FOR RESEARCH

Historical and cultural significance of works of art is the result of many factors, both tangible and intangible, including knowledge about them, history of the author and of the work, as well as real, current existence of these works. The last factor is an everyday challenge for a large part of the Cultural Heritage exposed to risk

Laser.indb 47 2015-03-04 13:30:50

i materialnych: wiedzy na ich temat, historii autora i dzieła, realnej i aktualnej egzystencji tych dzieł. Ostatni czynnik jest codziennym wyzwaniem dla znacznej części Dziedzictwa Kulturalnego, narażonego na ryzyko w wielu różnych okolicznościach. To pokazuje, jak pilne jest zwrócenie się o pomoc innowacji na polu konserwacji, ponieważ brak odpowiednich rozwiązań daje konserwatorom tylko dwie możliwości: zastosować środki przybliżone do najlepszych ze względu na pilność działania, lub pozostawić dzieła tak jak są, oczekując na przyszłe właściwe i bardziej przekonujące techniki. Rozważania te systematyzują zasadnicze potrzeby unowocześnienia wiedzy i zapewnienia ochrony i konserwacji każdego elementu zagrożonego dziedzictwa. Ochrona oznacza wprowadzenie z wyprzedzeniem sposobów umożliwiających uniknięcie ryzyka. Konserwacja oznacza realizację przedsięwzięć rozwiązujących problem, stabilizujących warunki i zabezpieczających przed dalszymi problemami. Ogólne definicje potrzeb nie mogą określić szczegółowo złożoności materiałów i trudności do przezwyciężenia, ale przedstawiają one rolę i program dla odpowiedzialnych instytucji, restauratorów, producentów urządzeń technicznych i środków materialnych dla ochrony, diagnostyki i restauracji. Oczywiste jest, że nauka stanowi tego część integralną, ponieważ bez niej mamy

in many various circumstances. It shows how urgent it is to turn to innovation in the field of conservation, as the lack of proper solutions leaves conservators with only two options: either to use means as close to the best ones as possible given the urgency of action, or to leave works as they are, waiting for proper and more conclusive techniques to come in the future. These considerations systematise the basic needs to upgrade knowledge and to ensure protection and conservation of each element of the heritage at risk. Protection means the prior implementation of means to avoid the risk. Conservation means the implementation of actions that will solve the problem, stabilise conditions and prevent further problems. General definitions of needs cannot specify in detail the complexity of materials and difficulties to overcome, but they represent the role and programme for the institutions responsible, restorers, manufacturers of technical equipment and material means for protection, diagnostics and restoration. It is clear that science is an integral part of this, as without it we are dealing only with the opinions. A product, a tool or a method available for conservation is just the final result of a long chain of study, research and implementations, focusing on the problem, using available techniques or sometimes introducing

Laser.indb 48 2015-03-04 13:30:50

do czynienia wyłącznie z opiniami. Produkt, instrument lub metoda dostępna dla konserwacji jest po prostu ostatecznym wynikiem długiego łańcucha studiów, badań i wdrożeń, zogniskowanych na problemie, wykorzystujących dostępne techniki lub czasem wprowadzających nowe, odpowiednie do specyficznych cech problemu. Pod tym względem, wszystkie dyscypliny wnoszą swój wkład do zadań ogólnych i dostępnych dziś zasobów naukowych, określając podejście nowoczesne i w sposób ciągły modyfikowane. Jest to rzeczywisty przypadek integracji interdyscyplinarnej najlepszych osiągnięć w chemii, fizyce, biologii i geologii, a ostatnio z nauki o materiałach i informatyki. Nie jest to paradoksem, ale raczej ekscytującym wyzwaniem myśleć, że najbardziej zaawansowane wyniki nowoczesnej techniki mogłyby być zaangażowane do prac nad tak wartościowymi materiałami i tak skomplikowanymi zadaniami. Taką właśnie jest np. technika czyszczenia laserowego, która bez żadnych wątpliwości jest najważniejszym nowym wkładem nauki w restaurację zabytków kamiennych w ostatnim dziesięcioleciu. Podobnie, inne zasoby naukowe powinny przekształcić się w dostępne produkty, łatwe w użyciu przez dobrze wyszkolonych ludzi tak, aby stać się rzeczywiście użytecznymi dla społeczności konserwatorskiej. W zasadzie jednak wszystko rozpoczyna się od wynalazków na-

new ones that are appropriate to the specific characteristics of the problem. In this regard, all disciplines contribute to general tasks and scientific resources available today, defining the modern and continuously modified approach. This is a real case of multi-disciplinary integration of the best achievements in chemistry, physics, biology and geology, and more recently in materials science and computer science. It is not a paradox, but rather an exciting challenge to think that the most advanced results of modern technology could be employed in research on such valuable materials and such complex tasks. This is for example the case of the laser cleaning technique, which, quite undoubtedly is the most important new contribution of science in the restoration of stone monuments in the last decade. Similarly, other scientific resources should be converted into available products, easy to use by well-trained people in order to become truly useful for the conservation community. Basically, however, everything begins with the scientific inventions in the best research centres, in close cooperation with the responsible museum conservators, conservation institutions, restorers and other stakeholders.

In this respect, the contribution of science of modern processes and materials, including

Laser.indb 49 2015-03-04 13:30:50

ukowych w najlepszych ośrodkach badawczych, w ścisłej współpracy z odpowiadającymi za problemy konserwatorami muzeów, instytucjami konserwatorskimi, restauratorami i innymi zainteresowanymi.

Pod tym względem wkład nauki o nowoczesnych procesach i materiałach, włączając w to Fotonikę i Nanotechnologie, w poprawę wiedzy i procedur konserwacyjnych dopiero się rozpoczął, a oczekiwane są dalsze zastosowania i rozszerzenie oraz konsolidacja transferu najlepszych rozwiązań do końcowych użytkowników, w celu stworzenia standardów profesjonalnych. Jest wiele do zrobienia w tych kierunkach, a wspólne projekty badawcze, łączące w konsorcja doświadczone zespoły z obu dziedzin naukowych wraz z zespołami konserwatorskimi są najlepszymi instrumentami do realizacji celów na poziomie narodowym i europejskim.

1.5.3 ZAGADNIENIA ETYCZNE I OGRANICZENIA PRAKTYCZNE

Bardzo trudno jest omówić zasady etyczne w przypadku nowych kierunków badań, przede wszystkim ze względu na kompleksowość interpretacji wyników i zawsze istniejące czynniki nieznane na starcie badań. Istnieją jednak ważne

Photonics and Nanotechnologies, to the improvement of knowledge and conservation procedures has just began, while further applications and consolidation of transfer of the best solutions for end-users in order to create professional standards are expected. There is much to be done in these respects, and joint research projects, bringing together within consortia experienced teams from both scientific fields including conservation teams are the best tools to achieve the objectives at national and European level.

1.5.3 ETHICAL ISSUES AND PRACTICAL LIMITATIONS

It is very difficult to discuss ethical principles when it comes to new lines of research, mainly due to the complexity of interpretation of the results, and some factors unavoidably unknown at the beginning of research. However, there are important components of a good approach to the works conducted, primarily including knowledge, good intentions, courage, as well as organisational and material conditions. Conservation Committee of the International Council of Museums (ICOM) has published a document entitled “Conservator-Restorer: Definition of the Profession” highlighting the fact

Laser.indb 50 2015-03-04 13:30:50

składniki dobrego podejścia do prowadzonych prac. Przede wszystkim należą do nich: wiedza, dobre intencje, odwaga oraz warunki materialne i organizacyjne. Komitet Konserwacji Międzynarodowej Rady Muzeów (ICOM) wydał dokument zatytułowany „Konserwator-Restaurator: definicja zawodu", który podkreśla fakt, że uznanie i szacunek dla natury poszczególnych obiektów są wartościami fundamentalnymi w każdej pracy konserwatorskiej. Zasadniczym osiągnięciem wszystkich procedur konserwacyjnych powinna być stabilizacja obiektu. Procedury te powinny być dokumentowane i odwracalne. Co więcej, wszystkie dodane materiały i modyfikacje fizyczne lub genetyczne powinny w sposób jawny odróżniać się od oryginalnego obiektu lub środka [35,36]. W Europie, Europejskie Stowarzyszenie Konserwatorów-Restauratorów (E.C.C.O) we współpracy z innymi europejskimi instytucjami kulturalnymi zdefiniowało zalecenia i wytyczne dla społeczności konserwatorskiej/restauratorskiej [37]. Wytyczne te obejmują skomplikowane pytania o etykę we wszystkich dziedzinach konserwacji i opisują sposób pracy konserwatora, który jest często zupełnie różny od prostej naprawy, czyszczenia lub restauracji prowadzonej w przeszłości przez rzemieślnika. Wszystkie zabiegi powinny uwzględniać oryginalny kształt i szczegóły powierzchni, materiały przylegające do dzieła sztuki,

that the recognition and respect for the nature of particular objects are fundamental values in any conservation work. The essential objective of all conservation procedures should be the stabilisation of the object. Such procedures should be documented and reversible. What is more, all materials added and physical or genetic modifications should be visibly different from the original object or means [35,36]. In Europe, the European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations (ECCO) in collaboration with other European cultural institutions defined the recommendations and guidelines for community of conservators and restorers [37]. These guidelines include complex ethical problems in all areas of conservation and describe the working methods of conservators, which often differ diametrically from ordinary repair, cleaning or restoration carried out by a craftsman in the past. All procedures should take into consideration the original shape and surface details, materials adhering to the work of art, as well as the original nature of the remaining material. It is known that no action is reversible, but the most important criterion is as small as possible interference of a conservator with the true nature of an artwork. In conclusion, it is expected that conservators and other experts dealing with historical buildings such as

Laser.indb 51 2015-03-04 13:30:50

a także oryginalną naturę pozostającego materiału. Wiadomo, że brak działania jest odwracalny, ale najważniejszym kryterium jest jak najmniejsza ingerencja konserwatora w prawdziwą naturę dzieła sztuki. Na zakończenie oczekuje się, że konserwatorzy oraz inni eksperci mający do czynienia z obiektami historycznymi, np. archeolodzy, kuratorzy, naukowcy i analitycy, będą pracować wyłącznie w granicach swojego obszaru specjalizacji [38,39]. Na zakończenie należy powiedzieć, że nikt nie powinien rozpoczynać badań w nowej, nieznanej dziedzinie bez dużej dozy wiedzy, odwagi i poczucia odpowiedzialności.

archaeologists, curators, researchers, analysts, will work only within the boundaries of their area of expertise [38,39]. In conclusion, it must be said that no one should begin research in a new, unknown field without considerable resources of knowledge, courage and sense of responsibility.

Laser.indb 52 2015-03-04 13:30:51

BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 1 / REFERENCES TO CHAPTER 1

1. A. Koss, J. Marczak, „Application of lasers in conservation of monuments and works of art", Scientific Reports IAICR, ISBN 83-922954-0-4, Warsaw 2005, 50 pages.
2. A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, Badania naukowe zastosowań laserów w konserwacji dzieł sztuki – postery, Oficyna Wydawnicza W-wa, 2010, 189str., ISBN: 978-83-922954-5-7.
3. Lal Gauri K. and Holdren G.C., Pollutant Effects on Stone Monuments, Environmental Science and Technology, Vol. 15, pp. 386-390, (1981);
4. Skoulikidis T. and Papakonstantinou – Ziotis P., Mechanism of Sulphation by Atmospheric S02 of the Limestones and Marbles of the Ancient Monuments and Statues, British Corrosion Journal, Vol. 16 (2), pp. 63 – 69, (1981);
5. Ashurst J., and Dimes F., Conservation of Building and Decorative Stone, Vol. 2, Butterworth – Heinemann, (1990);
6. Verges – Belmin V., Pseudomorphism of Gypsum after Calcite, a new Textural Feature Accounting for the Marble Sulphation Mechanism, Atmospheric Environment, Vol. 28 (2), pp. 295 – 303, (1994);
7. Bluck B. and Porter J., Sandstone Buildings and Cleaning Problems, Stone Industries, Vol. 26 (2), March, pp. 21 – 27, (1991);
8. Bluck B. and Porter J., Aims and Methods of Sandstone Cleaning, Stone Industries, Vol. 26 (3), April, pp. 21 – 28, (1991);
9. Schawlow A. L., Lasers, Science, Vol.149, pp. 13-22, (1965);
10. Asmus, J. F., Murphy, C.G., Munk, W.H., Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts, in: Developments in laser Technology II, R.F. Weurker (Ed.), Proc. SPIE 41, pp. 19-30, (1993);
11. Asmus, J.F., Properties of laser-cleaned Carrara marble surfaces, in: Preservation of Stone, Geological Society of America, Boulder 19, (1974);
12. Asmus J.F., Light cleaning: laser technology for surface preparation in the arts, Technology and Conservation 3 (3), pp. 14-18, (1978);
13. Asmus, J.F., More light for art conservation, IEEE Circuits and Devices Magazine, March Issue, pp. 6-14, (1986);
14. Asmus, J.F., Lasers in conservation, Conservation News 34, pp. 9-10, (1987);

Laser.indb 53 2015-03-04 13:30:51

15. LACONA I, Heraklion, Greece: Restauratorenblätter Sonderband, Lasers in the Conservation of Artworks, Eds.: M. Koller and R. Brandstätten, Verlag Mayer & Comp, Vienna, (1997);
16. LACONA III, Florence, Italy: Journal of Cultural Heritage, Lasers in the Conservation of Artworks, Eds.: R. Salimbeni and G. Bonsanti, Elsevier, (2000);
17. LACONA IV, Paris, France: Journal of Cultural Heritage, Lasers in the Conservation of Artworks, Ed.: V. Vergès- Belmin, Elsevier, (2003);
18. LACONA V, Osnabrück, Germany: Lasers in the Conservation of Artworks, Eds.: K. Dickmann, C. Fotakis, J.F. Asmus, Springer Proceedings in Physics, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, (2005);
19. LACONA VI, Vienna, Austria: Lasers in the Conservation of Artworks. Eds.: J. Nimmrichter, M. Schreiner, W. Kautek, Springer Proceedings in Physics, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, (2006);
20. LACONA VII, Madrid, Spain, (2009);
21. Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W., Hee M. R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C. A., and Fujimoto J. G., Optical coherence tomography, Science 254, 1178-1181, (1991);
22. Fercher A. F., Hitzenberger C. K., Drexler W., Kamp G., and Sattmann H., In vivo optical coherence tomography, American Journal of Ophthalmology 116, 113-114, (1993);
23. Swanson E. A., Izatt J. A., Hee M. R., Huang D., Lin C. P., Schuman J. S., Puliafito C. A., and Fujimoto J. G., In vivo retinal imaging by optical coherence tomography, Optics Letters 18, 1864-1866, (1993);
24. Stifter D., Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical coherence tomography, Appl. Phys. B-Lasers Opt. 88, 337-357, (2007);
25. Targowski P., Rouba B.J., Gorczyńska I., Wojtkowski M., and Kowalczyk A., Zastosowanie metod optyki koherentnej do nieinwazyjnego badania obiektów zabytkowych, in Ars longa - vita brevis. Tradycyjne i nowoczesne metody badania dzieł sztuki, Materiały z sesji naukowej poświęconej pamięci profesora Zbigniewa Brochwicza, J. Flik, ed. (Wydawnictwo UMK, Toruń 2003, Toruń, 18-19 X, pp. 121-129, (2002-2003);
26. Targowski P., Rouba B.J., Wojtkowski M., and Kowalczyk A., The application of optical coherence tomography to non-destructive examination of museum objects, Studies in Conservation 49, 107-114, (2004);
27. Yang M. L., Lu C. W., Hsu I. J., and Yang C. C., The use of Optical Coherence Tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades, in Archaeometry, M. Pollard, E. Pernicka, J. Burton, and

Laser.indb 54 2015-03-04 13:30:51

M. Martini, eds. (University of Oxford, pp. 171-182, (2004);
28. Liang H., Cid M., Cucu R., Dobre G., Podoleanu A., Pedro J., and Saunders D., En-face optical coherence tomography–a novel application of non-invasive imaging to art conservation, Optics Express 13, 6133-6144, (2005);
29. Completed list of papers on application of OCT to examination of artwork may be found at: Optical Coherence Topography for Examination of Art – Workshop, 3-5 July 2008, Toruń, Poland – Book of Abstracts, www.oct4art.eu
30. Góra M., Targowski P., Rycyk A., Marczak J., Varnish ablation control by Optical Coherence Tomography, Laser Chemistry, 2006, DOI: 10. 1155/2006/10647, http://www.hindawi.com/joumals/lc/7 pages, (2006);
31. Targowski P., Góra M., Rycyk A., Marczak J., Targowski P., Kowalczyk A., From Medical to Art Diagnostics: OCT – a novel tool for varnish ablation control, Proc. SPIE 6429-292V-1, (2007);
32. Targowski P., Marczak J., Góra M., Rycyk A., Kowalczyk A., Optical coherence tomography for varnish ablation monitoring, Proc. SPIE 6618, 661 803-1, (2007);
33. Góra M., Targowski P., Kowalczyk A., Marczak J., and Rycyk A., Fast spectral optical coherence tomography for monitoring of varnish ablation process, Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA VII Proceedings, Pablo Moreno, Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd., pp. 23-27, (2008);
34. Targowski P., Rouba B., Góra M., Tyminska-Widmer L., Marczak J., and Kowalczyk A., Optical Coherence Tomography in Art Diagnostics and Restoration, Applied Physics A: Materials Science & Processing, 92, pp. 1-9, (2008);
35. ICOM, Code of professional Ethics, 2001., http://www.icom.org/ethics.html (dostęp od 22 lutego 2002r.);
36. ICOM, The Conservator- Restorer: a Definition of the profession, 1984. http://www.icom.org/ethics.html (dostęp od 22 lutego 2002r.);
37. Projekt apelu, Recommendation and Guidelines for the adoption of common principles regarding the conservation-restoration of cultural heritage in Europe, ECCO, Rome, 2001;
38. Cronyn, J.M., The Elements of Archaeological Conservation, Routledge, Padstow, 1992;
39. Pye, E., Caring for the past, James & James, London, 2001;

Laser.indb 55 2015-03-04 13:30:51

Laser.indb 56 2015-03-04 13:30:51

ROZDZIAŁ 2 / LASER – ZASADA DZIAŁANIA

2.1 WIADOMOŚCI PODSTAWOWE

2.1.1 WPROWADZENIE

Elektronika kwantowa to dział nauki zajmujący się badaniem wzajemnego oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią – atomami, jonami, molekułami. Zasadniczo oddziaływanie to sprowadza się do trzech podstawowych zjawisk: *absorpcji, emisji spontanicznej* i *emisji wymuszonej* promieniowania. Emisji promieniowania laserowego nie da się wytłumaczyć za pomocą zasad fizyki klasycznej, która zawodzi, gdy stosuje się ją do opisu przekazywania bardzo małych ilości energii i do obiektów o bardzo małych masach. Pod koniec XIX wieku i na początku wieku XX wykonano doświadczenia, które pokazały, że kilka pojęć mechaniki klasycznej jest nie do przyjęcia. Z pomiarów promieniowania ciała doskonale czarnego czy pomiarów widm atomowych i cząsteczkowych wynika, że układy atomowe mogą przyjmować energię tylko w określonych porcjach [1].

CHAPTER 2 / LASER – OPERATING PRINCIPLE

2. 1 BASIC INFORMATION

2.1.1 FOREWORD

Quantum Electronics is a field of science exploring the reciprocal interaction of electromagnetic radiation with matter, including atoms, ions, molecules. Basically, such interaction boils down to the three basic phenomena: *absorption, spontaneous emission* and *stimulated emission* of radiation. Laser radiation emission cannot be explained using the principles of classical physics, which fails when used to describe the transmission of very small amounts of energy and in relation to objects of very low mass. At the end of the 19th century and early 20th century experiments were carried out which showed that some concepts of classical mechanics are inadmissible. Measurements of black body radiation and measurements of atomic and corpuscular spectra show that atomic systems can receive energy only in specific doses [1].

Laser.indb 57 2015-03-04 13:30:51

Teoretyczne podstawy wykorzystania emisji wymuszonej, zachodzącej w układach atomów, cząsteczek lub jonów dla celów generacji i wzmacniania promieniowania elektromagnetycznego przedstawił Albert Einstein w 1917r., [2]. A. Einstein analizował zbiór atomów będący w równowadze termodynamicznej z otoczeniem. Pomiędzy poziomami energetycznymi atomów tego zbioru zachodzą *przejścia dyskretne – kwantowe*, przewidziane i sformułowane na początku dwudziestego wieku, a odpowiedzialne za emisję oraz absorpcję promieniowania elektromagnetycznego. Publikacja Einsteina stanowi podstawę teorii laserów. Podjęte w tej dziedzinie dalsze prace, zarówno teoretyczne jak i doświadczalne, doprowadziły do realizacji pomysłu zastosowania układów kwantowych do wzmacniania i generacji fal elektromagnetycznych: najpierw w obszarze mikrofal w urządzeniu nazwanym – ***MASER***, a później w zakresie optycznym w urządzeniu nazwanym – ***LASER***. Oba wyrazy są akronimami utworzonymi z pierwszych liter angielskich określeń istoty działania urządzeń: – *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation,* oraz od *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation,* co znaczy – wzmocnienie mikrofal lub światła przy wykorzystaniu wymuszonej emisji promieniowania elektromagnetycznego.

The theoretical basis for the use of stimulated emission occurring in systems of atoms, molecules or ions for the purpose of generating and amplifying electromagnetic radiation was presented by Albert Einstein in 1917 [2]. A. Einstein analysed an atom system in thermodynamic equilibrium with the environment. Between the energy levels of atoms of this system, *discrete - quantum transitions* occur, envisaged and formulated at the beginning of the twentieth century, and responsible for the emission and absorption of electromagnetic radiation. The publication by Einstein is the basis of the laser theory. Further works undertaken in this field, both theoretical and experimental, led to the implementation of the idea of using quantum systems to amplify and generate electromagnetic waves: first applied to the microwaves in a device called ***MASER***, and later in optics in a device called ***LASER***. Both words are acronyms formed from the first letters of the term describing operation of the devices: – *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, and Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*

At that time, however, no one was persistent enough to build a suitable light source. Scientists that were Einstein's contemporaries were rather sceptical of his theory.

Laser.indb 58 2015-03-04 13:30:51

W tamtym okresie jednak nikt nie był na tyle konsekwentny, aby zbudować odpowiednie źródło światła. Współcześni Einsteinowi naukowcy odnosili się do jego teorii dość sceptycznie. Pierwszy laser został skonstruowany przez T. Maimana dopiero w 1960r. [3]. W odróżnieniu od konwencjonalnych źródeł światła np. źródeł termicznych (żarówka), laser jest generatorem spójnego promieniowania elektromagnetycznego. Określenie laser zostało po raz pierwszy użyte przez Ch. H. Townsa i A.L. Schawlowa w roku 1957, w publikacji (patencie) opisującej to zjawisko [4]. W potocznym użyciu do słowa „laser" jest często dołączana nazwa materiału laserującego, jak na przykład: laser rubinowy, laser neodymowy, laser Nd:YAG, laser helowo – neonowy (He-Ne), laser na dwutlenku węgla (CO_2), laser ekscimerowy, itp. Jeśli opisywana jest jakaś czynność lub obszar zastosowania, w którym występuje laser, to mówimy np.: spawanie laserowe, oftalmologia laserowa, dalmierz laserowy. W niniejszym rozdziale omawia się podstawy fizyczne działania lasera, a także przedstawia się pewne pojęcia i koncepcje związane z techniką i technologią laserową, które towarzyszyć nam będą podczas wykorzystywania urządzeń laserowych lub samych laserów.

Ten Rozdział monografii dedykujemy Czytelnikom, którzy nigdy nie zetknęli się z laserem i jego

The first laser was designed by T. Maiman only in 1960 [3]. Unlike conventional light sources, e.g. thermal sources (bulb), laser is a generator of coherent electromagnetic radiation. The term ‚laser' was first used by Ch. H. Towns and A.L. Schawlow in 1957, in a publication (patent) describing this phenomenon [4]. Colloquially, the word „laser" is often accompanied by the name of the lasing material, for example: ruby laser, neodymium laser, Nd: YAG laser, helium-neon (He-Ne) laser, carbon dioxide (CO_2) laser, excimer laser etc. When describing an activity or application area where there is a laser, we say for example: laser welding, laser ophthalmology, laser rangefinder. This chapter discusses the physical basis of the laser's operating principle and presents some concepts and ideas related to laser technique and technology that will accompany us during the use of laser devices or lasers themselves.

We dedicate this Chapter of the monograph to those Readers who are not yet acquainted with laser and its principle of operation or who know little about this representative of the most amazing devices of the last century. More inquisitive Readers will find in this monograph literature (in Polish) that they may use to broaden and deepen their knowledge on the subject [5-7].

Laser.indb 59 2015-03-04 13:30:51

zasadą działania lub słyszeli niewiele o jednym z najwspanialszych urządzeń ubiegłego wieku, jakim niewątpliwie jest laser. Bardziej dociekliwym Czytelnikom podajemy literaturę (w języku polskim) umożliwiającą rozszerzenie i pogłębienie wiedzy na ten temat [5-7].

Autorzy w sposób podstawowy i możliwie najprostszy opisują działanie lasera oraz właściwości promieniowania laserowego. Ze względu na jedyne w swoim rodzaju i unikalne cechy promieniowania laserowego (o których będzie mowa dalej), lasery znalazły niezwykle szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, techniki, medycynie, a także w *nieniszczącej analizie w konserwacji i restauracji dzieł sztuki*. Lasery nie tylko stworzyły nowe gałęzie nauki, lecz także zrewolucjonizowały wiele dziedzin, dalekich niekiedy od samej fizyki i elektroniki kwantowej, jak choćby nasze codzienne życie.

2.1.2 STRUKTURA ATOMU

Z podstaw chemii wiemy, że atom stanowi najmniejszą cząsteczkę pierwiastka zachowującą jego własności chemiczne i odwrotnie, każdemu pierwiastkowi odpowiada atom określonego rodzaju. Atom składa się z jądra o dodatnim ładunku elektrycznym i elektronów o ładunkach

The authors describe in a basic, as simple as possible way, the characteristics of laser operation and radiation. Due to the one-of-a-kind and unique characteristics of laser radiation (which will be discussed below), lasers came to be very widely used in various fields of science, technology, medicine, and in *the non-destructive analysis in conservation and restoration of works of art*. Lasers not only created new branches of science, but also revolutionised many areas, sometimes distant from the physics and quantum electronics themselves, such as our very everyday lives.

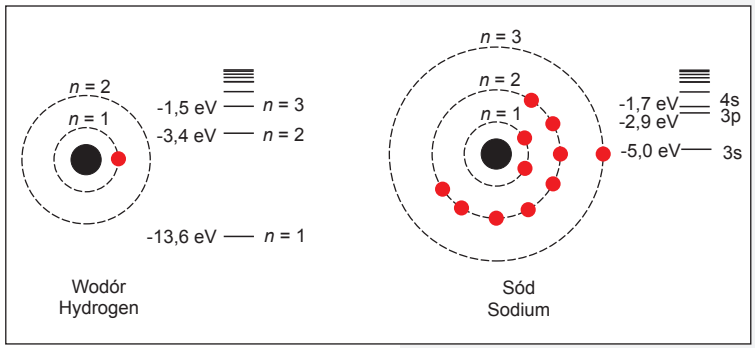
2.1.2 STRUCTURE OF THE ATOM

Basic chemistry tells us that the atom is the smallest particle of an element retaining its chemical properties, and vice versa, each element corresponds with a particular type of atom. The atom consists of a nucleus with a positive electric charge and electrons with negative charges. The size of the atom is determined by the size of its electron shell that basically has no clearly defined boundaries. The diameters of the atoms are of the order of 10^{-8} cm (1 Å). According to the atomic theory of Bohr, the radius of the simplest atom, atom of hydrogen, has a specific value, equal to

Laser.indb 60 2015-03-04 13:30:51

ujemnych. Rozmiary atomu są określone przez rozmiary jego powłoki elektronowej, która zasadniczo nie ma ściśle określonych granic. Średnice atomów są rzędu 10^{-8} cm (1Å). Z atomowej teorii Bohra, promień najprostszego atomu, atomu wodoru, ma określoną wartość, równą promieniowi najmniejszej możliwej orbity kołowej $a_0 \approx 0{,}53$ Å. Elektrony poruszają się po orbitach kołowych wokół jądra, o określonych promieniach odpowiadających dyskretnym stanom energii, rys. 2.1.1.

Najniższa powłoka, najbliższa jądru, odpowiada najniższemu stanowi – najniższemu poziomowi energii. Powłoki o większych średnicach lub wyższych poziomach energii są całkowitymi wielokrotnościami energii stanu podstawowego. Taki opis struktury atomu za pomocą mechaniki klasycznej jest opisem bardzo uproszczonym.



Rys. 2.1.1. *Ilustracja powłok energetycznych i poziomów energii atomu wodoru i sodu. „n" oznacza tzw. główną liczbę kwantową.*

Fig. 2.1.1. *Illustration of energy shells and energy levels of an atom of hydrogen and sodium. „n" stands for the principal quantum number.*

Rzeczywisty ruch elektronu w atomie opisuje się za pomocą mechaniki kwantowej uwzględ-

the radius of the smallest possible circular orbit $a_0 \approx 0{,}53$ Å. Electrons move in circular orbits around the nucleus, with specific radii corresponding to discrete energy states, fig.2-1.

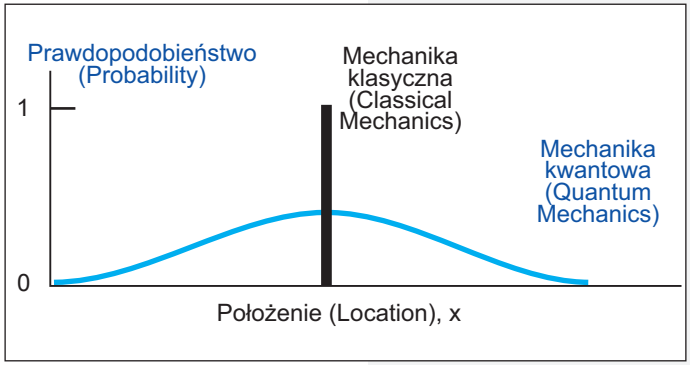
The lowest shell, closest to the nucleus, corresponds to the lowest state - the lowest energy level. Shells of larger diameters or higher energy levels are integer multiples of the basic state energy. Such a description of the structure of the atom through classical mechanics is a very simplified one.

The real motion of the electron in an atom is described by quantum mechanics taking into account the uncertainty associated with the position and velocity of an electron, which results from the Heisenberg uncertainty principle. Classical mechanics is based on a deterministic description of the motion, i.e. it assumes a precise knowledge of the position and velocity of the object. Quantum

Laser.indb 61 2015-03-04 13:30:51

niającej nieokreśloność związaną z położeniem i prędkością elektronu, która wynika z zasady nieoznaczoności Heisenberga. Mechanika klasyczna opiera się o deterministyczny opis ruchu, tzn. zakłada precyzyjną znajomość położenia i prędkości danego obiektu. Mechanika kwantowa przeciwnie, opiera się o teorię stochastyczną, prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w określonym miejscu. Różnice opisu obu mechanik, klasycznej i kwantowej, położenia elektronu w atomie zilustrowano na rys. 2.1.2.

Atom jest układem opisywanym przez prawa mechaniki kwantowej, a jego energia podlega prawom kwantowania. Skwantowane – dyskretne możliwe wartości energii atomu przedstawia się za pomocą poziomych linii (drabinki), a odstępy pomiędzy liniami są proporcjonalne do różnic energii. W przypadku atomu wodoru, rys. 2.1.1, odstępy pomiędzy kolejnymi poziomami energii (liniami) regularnie się zmniejszają – zagęszczają, a w granicznym przypadku scho-



Rys. 2.1.2. *Ilustracja opisu położenia elektronów w atomie za pomocą mechaniki klasycznej i kwantowej.*

mechanics, on the contrary, is based on the stochastic theory, the probability of finding an electron in a particular place. Differences in the description of the two mechanics, classical and quantum one, of the position of an electron in an atom is illustrated in fig.2.1.2.

An atom is a system described by the principles of quantum mechanics, and its energy is subject to the quantization principles. Quantization discrete possible values of atom energy are presented by horizontal lines (ladder), and the spacing between the lines is proportional to the energy differences. In the case of an atom of hydrogen, fig.2.1.1, the spacing between consecutive energy levels (lines) decreases – becoming thicker on a regular basis, and in the limit case it goes down to the so-called threshold ionisation of atom, corresponding to the separation of the electron from the atom. In the case of atoms with two or more electrons, fig.2.1.1, the energy

Fig. 2.1.2. *Illustration of a description of the electrons position in an atom using classical and quantum mechanics.*

Laser.indb 62 2015-03-04 13:30:51

dzą do tzw. progu jonizacji atomu, odpowiadającej oderwaniu elektronu od atomu. W przypadku atomów z dwoma lub większą liczbą elektronów, rys. 2.1.1, diagramy poziomów energii są bardziej złożone, lecz i w tych przypadkach poziomy ulegają zagęszczeniu i schodzą do granicy jonizacji danego atomu (np. sodu), podobnie jak atomu wodoru.

2.1.3 ABSORPCJA PROMIENIOWANIA

Atom i układ atomów, jony lub molekuły znajdują się w ściśle określonych *stanach kwantowych – poziomach energetycznych*, które charakteryzują się dyskretnymi wartościami energii. Jakakolwiek zmiana tego *porządku* odbywa się jedynie w postaci *przejścia*, mającego charakter dyskretny – kwantowy. Przejściu układu atomowego z jednego poziomu energetycznego do drugiego towarzyszy pochłonięcie – *absorpcja* bądź oddanie – *emisja* ściśle określonej *porcji* energii, zwanej *kwantem*, równej różnicy energii między tymi poziomami energetycznymi. Pomiędzy poziomami energetycznymi wyróżnia się dwa rodzaje przejść: przejście *promieniste* i przejście *bezpromieniste*. Przejście promieniste ma miejsce wtedy, kiedy pochłonięta lub oddana przez układ atomowy energia ma postać promieniowania elektromagnetycznego. Przejście bezpromieniste z kolei występuje wtedy, kiedy energia pochłonięta lub oddana przekazana

level diagrams are more complex, but in these cases as well the levels undergo compression to the ionisation limit of specific atom (e.g. sodium), similarly to an atom of hydrogen.

2.1.3 ABSORPTION OF RADIATION

An atom and a system of atoms, ions or molecules are in very specific q*uantum states - energy level*s, which are characterised by discrete energy values. Any change of this *order* is done only in the form of *transition*, of discrete - quantum nature. The transition of an atomic system from one energy level to another is accompanied by taking - *absorption* or giving - *emission* of a very specific *portion* of energy called *quantum*, equal to the energy difference between those energy levels. There are two types of transitions between energy levels: *radiative* transition and *non-radiative* transition. Radiative transition occurs when the energy absorbed or emitted by an atomic system is in the form of electromagnetic radiation. Non-radiative transition occurs when the energy absorbed or returned is transferred to another atomic system (e.g. as a result of collisions of atoms or molecules in gases) or to the nearest environment (e.g. crystal lattice). Radiative transitions between two energy

Laser.indb 63 2015-03-04 13:30:51

zostaje innemu układowi atomowemu (np. w wyniku zderzeń atomów lub cząsteczek w gazach) bądź też bezpośredniemu otoczeniu (np. siatce krystalicznej). Przejścia promieniste między dwoma poziomami energetycznymi oznaczonymi n = 1 i n = 2, których energie wynoszą odpowiednio: E_1 i E_2, rys. 2.1.3, zachodzą dla ściśle określonej częstotliwości ν drgań elektromagnetycznych. Częstotliwość tego promieniowania jest wprost proporcjonalna do energii kwantu. Zależność tę ustalił Niels Bohr w 1913 r. i na jego cześć została ona nazwana kwantowym prawem Bohra, wspólnym dla procesów absorpcji i emisji promieniowania [8]:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h\nu \qquad (2.1.1)$$

gdzie: $E_2 - E_1$ – jest różnicą energii między dwoma poziomami, między którymi nastąpiło przejście kwantowe. Jest to jednocześnie energia kwantu $h\nu$; ν – oznacza częstotliwość rezonansową przejścia; c – prędkość światła w próżni; λ – długość emitowanej fali, a h – jest stałą Planck'a (h = 6,626 · 10^{-34} J·s).

W przypadku przejścia elektronu z wyższego poziomu energetycznego E_2 do niższego E_1 atom oddaje nadmiar swojej energii np. na zewnątrz w postaci kwantu promieniowania o energii $h\nu$. Mamy tu więc do czynienia z emisją fali

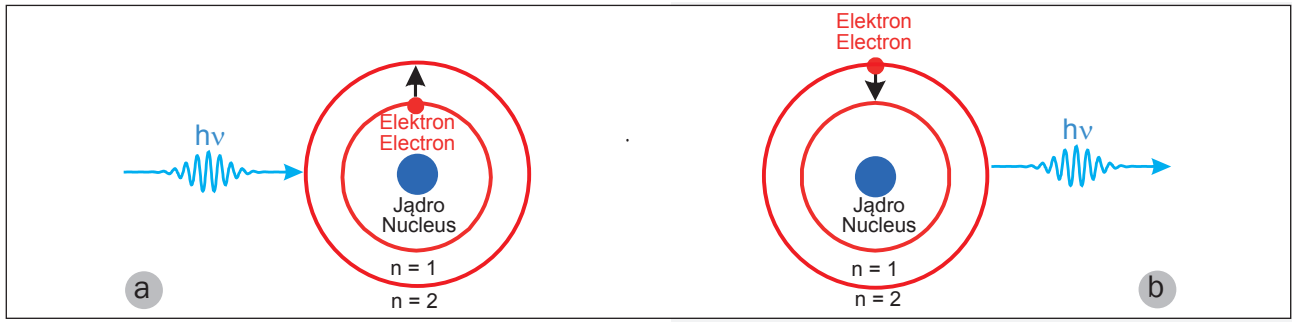
levels labelled n = 1 and n = 2, the energies of which are respectively: E_1 and E_2, fig.2.1.3, they occur for a very specific frequency ν of electromagnetic vibration. The frequency of this radiation is proportional to the quantum energy. This dependence was discovered by Niels Bohr in 1913 and it was in his honour that it was named Bohr's quantum condition, common to the processes of absorption and emission [8]:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h\nu \qquad (2.1.1)$$

where: $E_2 - E_1$ – is the energy difference between the two levels, between which a quantum transition occurred. It is also the quantum energy $h\nu$; ν – is the resonant frequency of the transition; c – speed of light in a vacuum; λ – emitted wavelength, and h – is Planck constant (h = 6,626· 1 0^{-34} J·s).

In the case of the transition of an electron from a higher energy level E_2 to a lower one E_1, the atom gives away the excess of its energy, e.g. to the outside in the form of a quantum of radiation with energy of $h\nu$. This is the emission of an electromagnetic wave. Absorption is a reverse phenomenon. The quantum of radiation supplied from the outside with energy of $h\nu$ and a frequency equal to the resonant frequency of

Laser.indb 64 2015-03-04 13:30:51



Rys. 2.1.3. *Dyskretne – kwantowe przejścia elektronu w atomie wodoru: a) – przejście absorpcyjne; b) – przejście emisyjne.*

Fig. 2.1.3. *Discrete - quantum transition of an electron in hydrogen atom: a) - absorption transition; b) - emission transition.*

elektromagnetycznej. Absorpcja jest zjawiskiem odwrotnym. Dostarczony z zewnątrz kwant promieniowania o energii hv i częstotliwości równej częstotliwości rezonansowej przejścia, przenosi elektron z poziomu energetycznego niższego E_1 do wyższego E_2, podwyższając w ten sposób energię całego atomu. Oba opisane procesy zilustrowano na rys. 2.1.3, przedstawiającym przejścia kwantowe: absorpcyjne, rys. 2.1.3a i emisyjne, rys. 2.1.3b, między sąsiadującymi orbitami elektronu w atomie, oznaczonymi numerami n = 1 i n = 2. Obie orbity odpowiadają poziomom energetycznym odpowiednio: E_1 i E_2. Poziom E_1, jako niższy z dozwolonych, nazywany jest poziomem podstawowym, natomiast E_2 reprezentuje wyższy poziom energetyczny zwany poziomem wzbudzonym. Na rys. 2.1.3, kwant promieniowania oznaczono w sposób umowny linią falistą z odpowiedthe transition, moves the electron from lower E_1 to higher E_2 energy level, thereby increasing the energy of the entire atom. Both of the processes described are illustrated in fig.2.1.3 showing quantum transitions: absorption, fig.2.1.3a and emission, fig.2.1.3b, between adjacent orbits of the electron in an atom, designated by numbers n = 1 and n = 2. Both orbits correspond to the energy levels, respectively: E_2 and E_1. Level E_1 as the lower of the permitted ones, is called the ground level, while E_2 represents a higher energy level called excited level. In fig.2.1.3, a quantum of radiation is conventionally designated by a wavy line with an arrow pointing respectively towards the system - in the case of absorption and away from the system - in the case of emission. The processes of absorption and emission of a quantum may also be represented

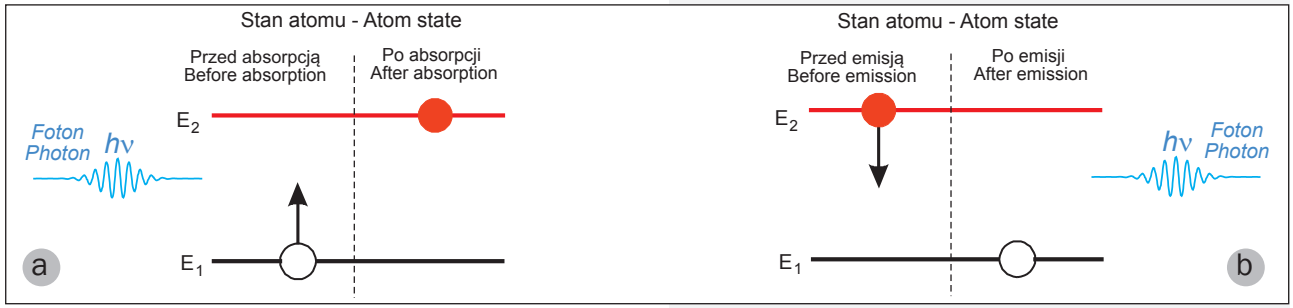
Laser.indb 65 2015-03-04 13:30:51

nio skierowaną strzałką: do układu – w przypadku absorpcji i na zewnątrz układu – w przypadku emisji. Procesy absorpcji i emisji kwantu można również przedstawić na schemacie poziomów energetycznych ilustrowanych w postaci linii poziomych, z których niżej położona linia charakteryzuje poziom o niższej energii, wyżej położona linia poziom o wyższej energii. Sytuację tę zilustrowano na rys. 2.1.4, na którym proces absorpcji i emisji kwantu promieniowania, podobnie jak poprzednio, zachodzi między podstawowym E_1 i wzbudzonym poziomem energetycznym E_2.

Jeśli atom znajduje się w polu działania fotonów zewnętrznych o częstotliwości ν, może on przejść z poziomu E_1 na poziom E_2 (na poziom o wyższej energii). Dla takiego przejścia zachodzi relacja: $E_2 = E_1 + h\nu$. W tym przypadku padający foton oddaje swoją energię do atomu. Oznacza to, że atom

in an energy levels diagram illustrated in the form of horizontal lines, where the line below has a lower energy level, and the one above has higher energy level. This situation is illustrated in fig.2.1.4 where the process of absorption and emission of a quantum of radiation, as before, occurs between the ground E_1 and the excited energy level E_2.

If an atom is in the field of action of external photons with frequency ν, it can go from the E_1 level to the E_2 level (level with higher energy). For such a transition the following relationship takes place: $E_2 = E_1 + h\nu$. In this case, the incident photon emits its energy to the atom. This means that the atom, when absorbing a photon, passes to a higher energy state (fig.2.1.4a). Conversely, an excited atom may give away the excess of its energy (e.g. as a result of relaxation process)



Rys. 2.1.4. *Przejścia kwantowe między dwoma poziomami energetycznymi: a) – absorpcja kwantu promieniowania; b) – emisja kwantu promieniowania.*

Fig. 2.1.4. *Quantum transition between two energy levels: a) - absorption of a quantum of radiation; b) - emission of a quantum of radiation.*

Laser.indb 66 2015-03-04 13:30:51

absorbując foton znajdzie się w wyższym stanie energetycznym (rys. 2.1.4a). Odwrotnie, wzbudzony atom może oddać nadmiar swojej energii (np. w wyniku procesu relaksacji), w postaci fotonu o energii równej $E_2 - E_1 = hv$, przechodząc z górnego poziomu energetycznego E_2 na poziom niższy E_1. Proces relaksacji oznacza, że każdy układ termodynamiczny (w tym i zbiór wzbudzonych atomów) dąży do równowagi energetycznej w danym ośrodku, czyli do jak najniższej energii.

Jeśli promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości v dostarczone jest do atomu lub układu atomów, atomy zaabsorbują energię promieniowania i zmienią swój poziom. Przejdą z poziomu 1 na poziom 2, rys. 2.1.4a, co odpowiada zależności 2.1.1. Taki proces nazywa się *absorpcją* lub bardziej szczegółowo *absorpcją wymuszoną*. Szybkość, z jaką absorbowana jest energia przez atomy jest proporcjonalna do liczby atomów na niższym poziomie energetycznym oraz do gęstości energii padającego promieniowania. Opisuje to zależność 2.1.2,

$$n_{abs} = B_{12} \cdot N_1 \cdot q(v) \qquad (2.1.2)$$

gdzie: B_{12} – jest stałą proporcjonalności zwaną współczynnikiem Einsteina na absorpcję wymuszoną, lub prawdopodobieństwem absorpcji wy-

as a photon of energy of $E_2 - E_1 = hv$, passing from the higher energy level E_2 to the lower level E_1. The process of relaxation means that every thermodynamic system (including a system of excited atoms) tends towards energy balance in a given system and to the lowest energy level.

If electromagnetic radiation with frequency v is delivered to an atom or atoms, the atoms will absorb the radiation energy and change their level. They will pass from level 1 to level 2, fig.2.1.4a, which corresponds to the dependence in 2.1.1. This process is called *absorption* or, more specifically, *stimulated absorption*. The rate at which energy is absorbed by atoms is proportional to the number of atoms at a lower energy level and to the density of energy of incident radiation. This relationship is described in 2.1.2:

$$n_{abs} = B_{12} \cdot N_1 \cdot q(v) \qquad (2.1.2)$$

where: B_{12} – is a constant of proportionality called the Einstein coefficient for stimulated absorption, or the probability of stimulated absorption per unit of time and per unit range of energy spectral density [$m^3 \cdot Hz/J \cdot s$], N_1 – is the filling - the population of an energy level "1" in [m^3], and $q(v)$ – is the density of the incident

Laser.indb 67 2015-03-04 13:30:51

muszonej w jednostce czasu i w jednostkowym przedziale gęstości spektralnej energii [$m^3 \cdot Hz/J \cdot s$], N_1 – jest obsadzeniem – populacją poziomu energetycznego „1" w [m^3], a $q(\nu)$ – jest gęstością energii promieniowania padającego na jednostkę objętości (liczbą procesów absorpcji w jednostce objętości i jednostce czasu).

2.1.4 EMISJA SPONTANICZNA

Proces emisji spontanicznej towarzyszy nam na co dzień i objawia się to w formie promieniowania elektromagnetycznego – światła. Warunkiem koniecznym emisji światła jest wzbudzenie atomów i molekuł, tj. przeniesienie ich na wyższe poziomy energetyczne. Każde źródło światła – to zbiór wzbudzonych lub stale wzbudzanych atomów, jonów lub molekuł. Proces wzbudzenia odbywa się nie tylko przez bezpośrednią absorpcję kwantów promieniowania, rys. 2.1.4a, lecz również za pomocą innych sposobów dostarczenia energii do układu. Najczęściej i najprościej realizuje się to przez doprowadzenie układu atomowego do odpowiednio wysokiej temperatury, np. w wyniku przepływu prądu w materiale włókna żarówki.

Wzbudzone atomy lub cząsteczki, mając naturalną tendencję do przebywania na niższych poziomach energetycznych, wracają w sposób zupełradiation energy per unit of volume (number absorption processes per unit of volume and unit of time).

2.1.4 SPONTANEOUS EMISSION

The process of spontaneous emission accompanies us every day, which is manifested in the form of electromagnetic radiation, or light. A necessary condition for the emission of light is to excite atoms and molecules, i.e. to move them to higher energy levels. Each source of light is a collection of atoms, ions or molecules that are excited or being constantly excited. The process of excitation takes place not only by the direct absorption of radiation quanta, fig.2.1.4a, but also by means of other ways of supplying energy to the system. It is done most commonly and easiest by inducing the atomic system to a sufficiently high temperature, e.g. as a result of current flow in the material of the bulb filament.

Excited atoms or molecules, due to their natural tendency to stay at lower energy levels, return completely at random and haphazardly to their original state, at the same time emitting, fig.2.1.4b, light quanta. This process is called *spontaneous emission of radiation*. The spectrum of this type of radiation depends only

Laser.indb 68 2015-03-04 13:30:51

nie przypadkowy i bezładny do stanu pierwotnego, emitując przy tym, rys. 2.1.4b, kwanty świetlne. Proces ten nazywa się *spontaniczną emisją promieniowania*. Widmo tego promieniowania zależy jedynie od układu poziomów energetycznych źródła emitującego oraz od rodzaju przejść między nimi. Zakres emitowanych długości fal może występować w obszarze podczerwieni, widzialnym i w nadfiolecie. Omówione wyżej przejścia zachodzą identycznie dla innych przypadków emisji fal świetlnych, np. w popularnych neonówkach, gdzie ciągłe podnoszenie energii atomów gazu na wyższe poziomy energetyczne odbywa się za pomocą wyładowań elektrycznych. Relaksacja wzbudzonych atomów gazu objawia się w postaci światła emitowanego przez neonówkę.

Podsumujmy więc proces emisji spontanicznej. Każdy atom lub układ atomów dąży do znalezienia się w stanie równowagi termodynamicznej, tzn. na najniższym poziomie energetycznym. Kiedy jest poddany pewnej transformacji – *przeniesiony* na wyższy poziom energetyczny E_2, po pewnym czasie, odpowiadającym średniemu czasowi życia na tym poziomie, ulega on *deekscytacji*. Oznacza to, że atom powraca do poziomu energetycznego E_1, emitując promieniowanie o częstotliwości: $\nu = (E_2 - E_1)/h$.

on the system of energy levels of the emitting source and on the type of transitions between them. The range of emitted wavelength may be in the infrared, visible and ultraviolet regions. The transitions discussed above occur in the very same way for other cases of light wave emission, e.g. in commonplace neon lamps, where constant raising of the energy of gas atoms to higher energy levels is done through electric discharges. Relaxation of excited gas atoms is manifested in the form of light emitted by the neon lamp.

Let us summarize, therefore, the process of spontaneous emission. Each atom or system of atoms tends to reach a state of thermodynamic equilibrium, i.e. to be at the lowest energy level. When it is subjected to a transformation – *moved* to a higher energy level E_2, after some time, corresponding to the average lifetime at this level, it undergoes *de-excitation*. This means that the atom returns to the energy level of E_1, emitting radiation at the frequency of: $\nu = (E_2 - E_1)/h$.

In the process of spontaneous emission, the emission rate from the unit volume of n_{sp} to the lower energy level is only proportional to the filling - population N_2 of the higher energy

Laser.indb 69 2015-03-04 13:30:51

W procesie emisji spontanicznej, szybkość emisji z objętości jednostkowej, n_{sp}, do niższego poziomu energetycznego jest jedynie proporcjonalna do wielkości obsadzenia – populacji N_2 wyższego poziomu energetycznego i jest niezależna od gęstości energii promieniowania $q(v)$, stąd:

$$n_{sp} = A_e \cdot N_2 \qquad (2.1.3)$$

gdzie: A_e– jest stałą proporcjonalności zwaną współczynnikiem Einsteina na emisję spontaniczną, lub prawdopodobieństwem emisji spontanicznej w jednostce czasu.

Fotony emitowane przez poszczególne atomy w procesie emisji spontanicznej są niezależne od poszczególnych aktów emisji i tym samym nie ma między nimi ani zgodności fazy ani kierunku emisji.

2.1.5 EMISJA WYMUSZONA

Do tej pory poznaliśmy dwa procesy oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią: *absorpcję promieniowania* i *emisję spontaniczną*. Pozwoli to nam zrozumieć trzeci proces, który interesuje nas najbardziej, a mianowicie proces *emisji wymuszonej*. W celu ilustracji procesu emisji wymuszonej posłużymy się, analogicznym do rys. 2.1.4, dwupoziomowym

level and is independent of the radiation energy density $q(v)$, hence:

$$n_{sp} = A_e \cdot N_2 \qquad (2.1.3)$$

where: A_e – is a constant of proportionality called Einstein's coefficient of spontaneous emission, or the probability of spontaneous emission per unit of time.

Photons emitted by each atom in the process of spontaneous emission are independent of particular emission processes and therefore there is no coincidence of phase nor of emission direction between them.

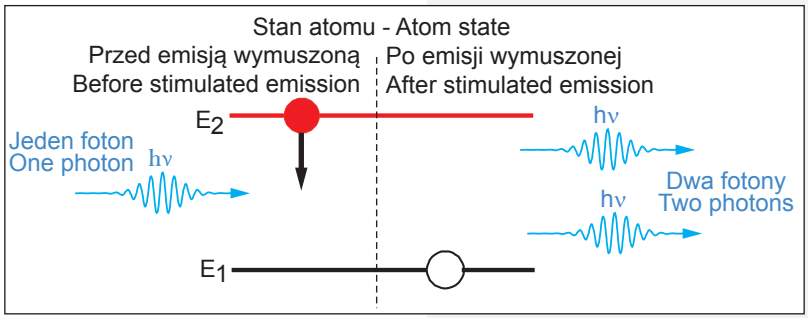
2.1.5 STIMULATED EMISSION

So far, two processes of interaction of electromagnetic radiation with matter have been presented: *radiation absorption and spontaneous emission*. This will allow us to understand the third process that is the most interesting for us, namely the process of *stimulated emission*. In order to illustrate the process of stimulated emission, we will use a system corresponding to the one in fig.2.1.4, a two-level quantum system now shown in fig.2.1.5. A quantum of radiation from an

Laser.indb 70 2015-03-04 13:30:51

układem kwantowym przedstawionym obecnie na rys. 2.1.5. Kwant promieniowania z zewnętrznego pola elektromagnetycznego, o energii równej różnicy energii poziomów energetycznych: $h\nu = E_2 - E_1$, pada tym razem na atom już wzbudzony, przedstawiony na lewej części rys. 2.1.5. Pod wpływem zewnętrznego kwantu promieniowania, wzbudzony atom powraca do stanu podstawowego, emitując przy tym nowy kwant o tej samej: energii $h\nu$, czyli o tej samej częstotliwości, w tym samym kierunku, o tej samej fazie i polaryzacji, co kwant padający. Ta sama faza i polaryzacja oznacza, że kierunek i płaszczyzna drgań kwantu wymuszonego jest taka sama jak kwantu wymuszającego.

Taki proces emisji nazywa się *emisją wymuszoną*. Zjawisko to jest podstawą działania wzmacniaczy i generatorów kwantowych, tj. maserów, i laserów. Zgodność częstotliwości, fazy, polaryzacji i kierunku rozchodzenia się promieniowania wymuszonego z promieniowaniem wymuszającym określa podstawową cechę światła laserowego,



Rys. 2.1.5. *Ilustracja aktu wymuszonej emisji kwantu promieniowania dla dwu poziomowego systemu atomowego.*

Fig. 2.1.5. *Illustration of a stimulated emission process of a radiation quantum for a two-level atomic system.*

external electromagnetic field with an energy equal to the energy difference of energy levels: $h\nu = E_2 - E_1$ this time incides on already excited atom, the left part fig.2.1.5. Under the influence of the external quantum of radiation, the excited atom returns to the basal state, while emitting a new quantum with the same energy $h\nu$, i.e. with the same frequency, in the same direction, with the same phase and polarisation, as the incident quantum. The same phase and polarisation mean that the direction and plane of vibration of the stimulated quantum is the same as of the stimulating quantum.

This process of emission is called *stimulated emission*. This phenomenon is the basis of operation of quantum amplifiers and generators, i.e. masers and lasers. Coincidence of frequency, phase, polarisation and direction of propagation of the stimulated radiation and of the stimulating radiation defines the basic characteristics of

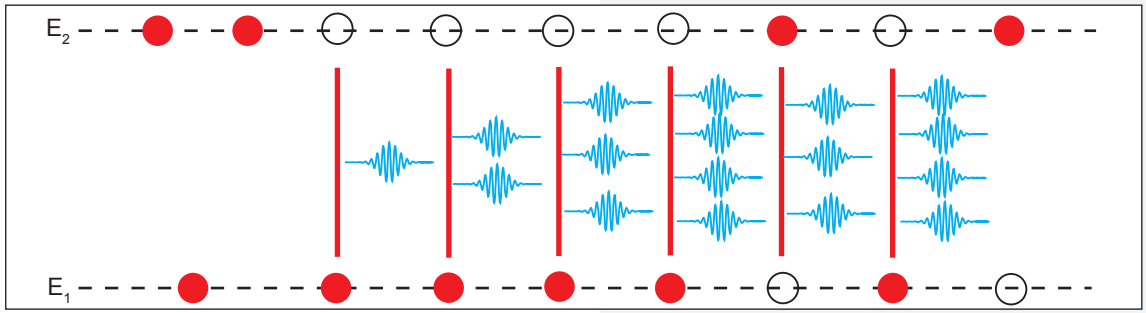
Laser.indb 71 2015-03-04 13:30:51

a mianowicie jego *spójność* (*koherencję*), czyli zdolność do interferencji. W procesie emisji wymuszonej kwant promieniowania o odpowiedniej energii wyzwala przy *oddziaływaniu* z atomem już wzbudzonym nowy kwant. Zamiast więc jednego kwantu wchodzącego do układu atomowego, mamy na jego wyjściu dwa jednakowe kwanty, rys. 2.1.5. Oznacza to wzmocnienie przez układ atomowy promieniowania padającego z zewnątrz.

Dwa fotony mogą wymusić dalsze fotony, co z kolei może objawić się w postaci lawinowej emisji fotonów. Zilustrowano to na rys. 2.1.6.

the laser light, namely its *cohesion (coherence)*, or the ability of interference. In the process of stimulated emission, a quantum of radiation with appropriate energy releases a new quantum when *interacting* with the already excited atom. So instead of one quantum incoming to an atomic system we have two identical quanta at the output, fig.2.1.5. This means amplification by the atomic system of the radiation incident from the outside.

Two photons can stimulate further photons, which, in turn, may manifest as an avalanche photon emission. This is illustrated in fig.2.1.6.



Rys. 2.1.6. *Ilustracja procesu emisji wymuszonej.*

Fig. 2.1.6. *Illustration of stimulated emission process.*

Szybkość emisji wymuszonej w jednostkowej objętości, n_{st}, jest również proporcjonalna do obsadzenia – populacji poziomu „2", jak również gęstości energii promieniowania i jest dana zależnością:

$$n_{st} = B_{21} \cdot N_2 \cdot q(v) \qquad (2.1.4)$$

The rate of stimulated emission in unit volume n_{st} is also proportional to the filling – the population of level "2", as well as to the radiation energy density and is expressed by the dependence:

Laser.indb 72 2015-03-04 13:30:51

gdzie: B_{21}– jest stałą proporcjonalności zwaną współczynnikiem Einsteina na emisję wymuszoną, lub prawdopodobieństwem emisji wymuszonej w jednostce czasu i w jednostkowym przedziale gęstości spektralnej energii [$m^3 \cdot Hz / J \cdot s$], N_2 – jest obsadzeniem – populacją poziomu energetycznego „2" w [m^3].

Wielkość wzmocnienia jest proporcjonalna do ilości kwantów na wejściu układu atomowego, tj. do gęstości energii promieniowania wymuszającego i ilości wzbudzonych atomów.

2.1.6 INWERSJA OBSADZEŃ POZIOMÓW ENERGETYCZNYCH

Aby więc uzyskać działanie wzmacniające w układzie kwantowym, należy wpierw *przenieść* układ atomowy na wyższy poziom energetyczny, dostarczając doń w odpowiedni sposób energię, co nazywamy *procesem pompowania*. Oznacza to doprowadzenie układu kwantowego do takiego stanu energetycznego, aby przeważały w nim atomy wzbudzone, tj. atomy znajdujące się na wyższym poziomie energetycznym – przygotowane do wymuszonej emisji. Przewaga tych właśnie atomów decyduje o powstaniu akcji laserowej. Tłumaczy się to tym, że przy oddziaływaniu promieniowania elektromagnetycznego z danym układem kwantowym

$$n_{st} = B_{21} \cdot N_2 \cdot q(v) \qquad (2.1.4)$$

where: B_{21}– is a constant of proportionality called the Einstein coefficient for stimulated emission, or the probability of stimulated emission per unit of time and per unit range of energy spectral density [$m^3 \cdot Hz / J \cdot s$], N_2 – is the filling - the population of an energy level "2" in [m^3].

The magnitude of amplification is proportional to the number of quanta at the input of the atomic system, i.e. to the stimulating radiation energy density and the number of excited atoms.

2.1.6 POPULATION INVERSION OF ENERGY LEVELS

In order to obtain an amplifying effect of a quantum system, it is first necessary to move the atomic system to a higher energy level by supplying it energy in an appropriate way, called the *pumping process*. This means bringing the quantum system to a state of energy with the predominance of excited atoms, i.e. atoms at a higher energy level - prepared for stimulated emission. The predominance of exactly these atoms determines the lasing action. This is explained by the fact that the interaction of electromagnetic radiation with a quantum

Laser.indb 73 2015-03-04 13:30:52

istnieje takie samo prawdopodobieństwo wystąpienia aktów emisji wymuszonej, co aktów absorpcji. Wszystko zależy od liczbowego stosunku wzbudzonych i niewzbudzonych układów atomowych napotykanych na drodze przez kwant promieniowania. Jeśli występuje przewaga tych ostatnich, to układ w końcowym bilansie pochłania promieniowanie (przeważają akty absorpcji). Przy równym obsadzeniu poziomów układ jest neutralny, inaczej mówiąc – *przezroczysty* dla danego promieniowania: akty absorpcji i emisji równoważą się. Jednak w warunkach przewagi atomów wzbudzonych, układ kwantowy emituje promieniowanie i przeważają akty emisji. Jest on wtedy zdolny do wzmacniania fali elektromagnetycznej (doprowadzonej na jego wejście), a więc może być wykorzystany do akcji laserowej – wzmacniania promieniowania elektromagnetycznego.

Rozkładem ilości atomów, jonów lub cząsteczek znajdujących się na różnych poziomach (w różnych stanach) energetycznych rządzi statystyczne prawo Boltzmanna, opisywane funkcją wykładniczą. Gdy układ znajduje się w równowadze termodynamicznej w temperaturze T, obsadzenie poszczególnych jego poziomów energetycznych opisuje zależność:

system gives the same probability of stimulated emission and absorption processes. Everything depends on the ratio of excited and non-excited atomic systems encountered on its way by a quantum of radiation. If there is a predominance of the latter, in the final balance the system absorbs radiation (absorption processes are predominant). With the levels equally filled, the system is neutral, in other words - *transparent* for the particular type of radiation: processes of absorption and emission are balanced. But with the predominance of excited atoms, the quantum system emits radiation and emission processes are predominant. It is then capable of amplifying the electromagnetic wave (brought at its input), and therefore may be used for lasing - amplification of electromagnetic radiation.

The distribution of the number of atoms, ions or molecules at different energy levels (in different states) is governed by the statistical Boltzmann law, expressed by an exponential function. When the system is in thermal equilibrium at a temperature T, population of each of its energy levels is described by the dependence:

Laser.indb 74 2015-03-04 13:30:52

$$N_2 = N_1 \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{k \cdot T}\right) \qquad (2.1.5)$$

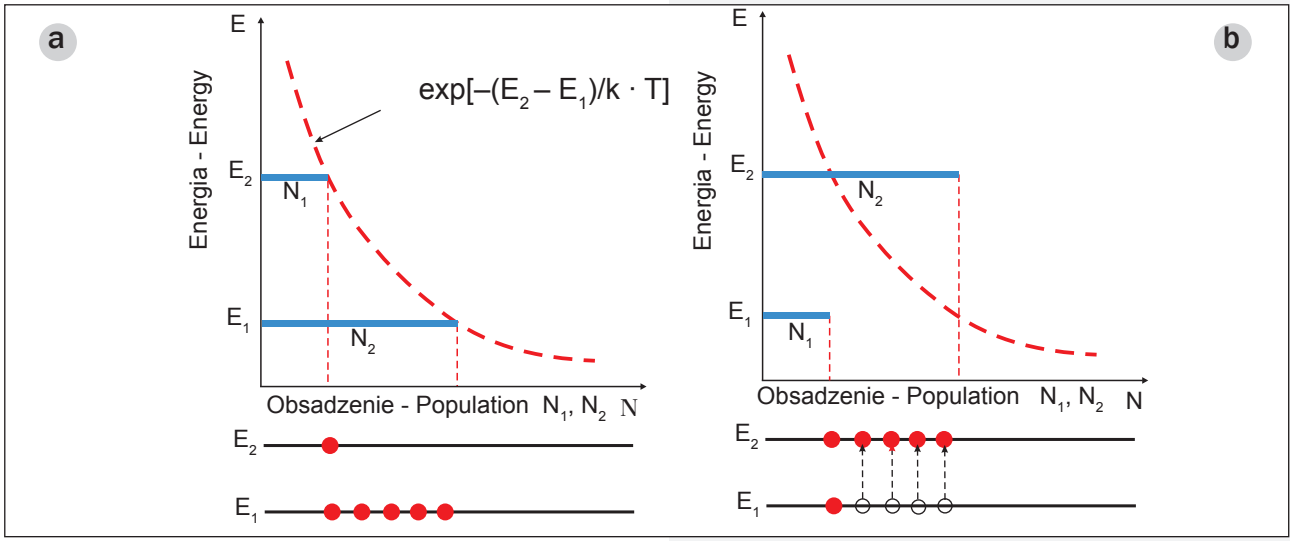
gdzie: N_1 i N_2 – oznacza liczbę cząsteczek obsadzających odpowiednio: poziomy energetyczne E_1 i E_2; k – stała Boltzmanna (k = 1,38 · 10^{-23} [J/K]).

Zgodnie z prawem Boltzmanna, w wyższych stanach energetycznych znajduje się mniej wzbudzonych cząsteczek, a ich ilość zmniejsza się w sposób ekspotencjalny wraz ze wzrostem ich energii, rys. 2.1.7a.

$$N_2 = N_1 \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{k \cdot T}\right) \qquad (2.1.5)$$

where: N_1 and N_2 is the number of molecules filling respectively energy levels E_1 i E_2; k – Boltzmann constant (k = 1,38 · 10^{-23} [J/K]).

According to Boltzmann law, there are less excited molecules in higher energy states, and their number decreases exponentially with the simultaneous increase in their energy, fig.2.1.7a.



Rys. 2.1.7. *Ilustracja obsadzenia poziomów energetycznych układu kwantowego w przypadku: a) – równowagi termodynamicznej (na niższym poziomie znajduje się więcej atomów; b) – przypadek zaburzenia układu kwantowego czyli inwersji obsadzeń – odwrócenia obsadzeń poziomów energetycznych. Na wyższym poziomie znajduje się więcej atomów.*

Fig. 2.1.7. *Illustration of the filling of energy levels of a quantum system in case of: a) - thermodynamic equilibrium (there are more atoms at the lower level, b) - the case of a quantum system disorder or population inversion - reversal of fillings of energy levels. There are more atoms at the higher level.*

Laser.indb 75 2015-03-04 13:30:52

Układ atomowy znajdujący się w warunkach równowagi termodynamicznej charakteryzuje się tym, że najwięcej jest atomów o *małej* energii, a mniej atomów o *dużej* energii. Oznacza to również, że im wyższy jest poziom energetyczny, tym mniejsza jest liczba atomów wzbudzonych do tego poziomu, lub inaczej znajdujących się na tym poziomie, Rys. 2.1.7a.

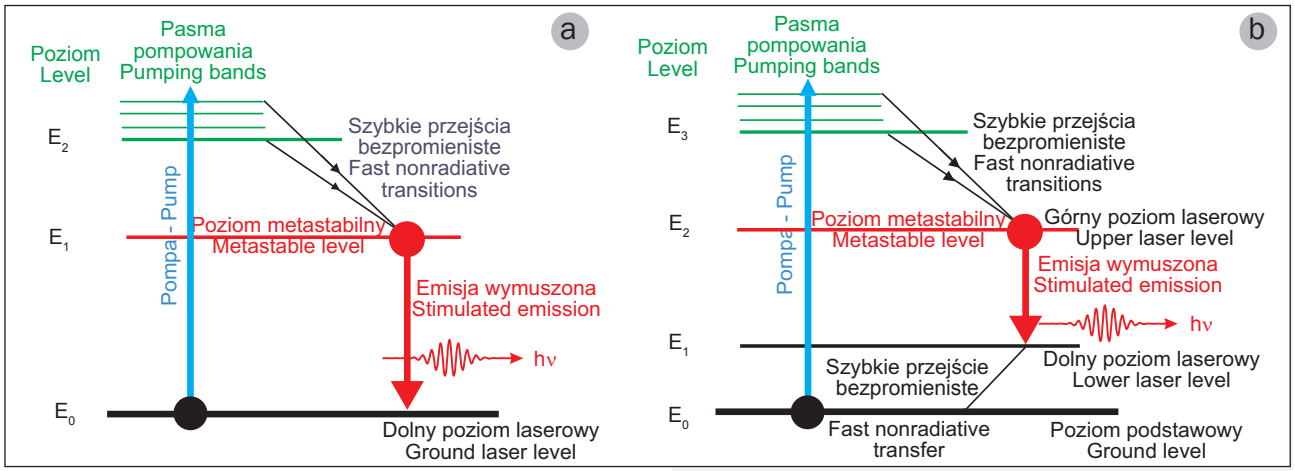
W jaki więc sposób doprowadzić układ atomowy do stanu, aby nastąpiło jego wzbudzenie? Otóż takie wzbudzenie może się odbyć jedynie przez *zakłócenie równowagi termodynamicznej* układu atomowego! Sytuacja, w której więcej atomów znajduje się na wyższym poziomie energetycznym, nazywana jest *inwersją obsadzeń*, rys. 2.1.7b. Nie jest to, jak widzimy, równowagowy układ obsadzenia poziomów energetycznych przez atomy w systemie kwantowym. Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych wyjaśniono na dwupoziomowym układzie kwantowym i stanowi ono jedynie wprowadzenie do koncepcji, ponieważ w rzeczywistości taka sytuacja nie jest możliwa. Inwersję obsadzeń między poziomami energetycznymi uzyskuje się w układzie trój- lub czteropoziomowym, jak na rys. 2.1.8.

Dla trójpoziomowego układu energetycznego (laser rubinowy), cząsteczki (elektrony) są najpierw przenoszone (pompowane) z poziomu podstawowe-

Let us repeat that an atomic system in thermodynamic equilibrium is characterised by most atoms with *low* energy, and less atoms with *high* energy. This also means that the higher the energy level, the lower the number of atoms excited to this level, or otherwise located at that level. So how to induce an atomic system into a state permitting its excitation? Such an excitation may be done only by the *disruption of thermodynamic balance* of an atomic system! A situation in which there are more atoms at a higher energy level is called *population inversion*, fig.2.1.7b. This is not, as we can see, an equilibrium population system of energy levels by atoms in quantum system. Population inversion of energy levels is explained on an example of a two-level quantum system, which is just an introduction to the concept, as in reality such a situation is not possible. In practice, population inversion between energy levels is obtained in a three- or four-level system, as in fig.2.1.8.

For the three-level energy system (ruby laser), particles (electrons) are first moved (pumped) from the ground level E_0 to the level of E_2, as a result of absorption of the pump radiation with the frequency of: $\nu = (E_2 - E_0) / h$. The lifetime of the molecules at the level of E_2 is generally very short and they practically instantaneously

Laser.indb 76 2015-03-04 13:30:52



Rys. 2.1.8. *Schematy energetyczne układów pompowania: a) – trójpoziomowego, laser rubinowy; b) – czteropoziomowego, laser neodymowy.*

Fig. 2.1.8. *Energy diagrams of pumping systems: a) - a three-level type, ruby laser; b) - a four-level type, neodymium laser.*

go E_0 do poziomu E_2, w wyniku absorpcji promieniowania pompy o częstotliwości: $\nu = (E_2 - E_0) / h$. Czas życia cząsteczek na poziomie E_2 jest generalnie bardzo krótki i praktycznie w sposób natychmiastowy przechodzą one na poziom metastabilny o energii E_1, w wyniku tzw. przejść bezpromienistych. Tym samym inwersja obsadzeń zachodzi między poziomami energetycznymi E_1 i E_2, nazywanymi poziomami laserowymi, które są odpowiedzialne za emisję promieniowania, rys. 2.1.8a. Podobne mechanizmy są odpowiedzialne za inwersję obsadzeń w układzie czteropoziomowym (laser neodymowy), rys. 2.1.8b, w którym poziomami laserowymi są odpowiednio poziomy: E_2 i E_1.

pass to the metastable energy level of E_1, as a result of the so-called non-radiative transitions. Thus, the population inversion occurs between energy levels E_1 and E_2 called laser levels, which are responsible for the emission of radiation, fig.2.1.8a. Similar mechanisms are responsible for the population inversion in the four-level system (neodymium laser), fig.2.1.8b, where laser levels are, respectively, the levels of : E_2 and E_2.

2.1.7 EINSTEIN COEFFICIENTS: A_E, B_{12}, B_{21}

Under conditions of thermodynamic equilibrium of an atomic system, the rate of transition of an electron from the lower energy

Laser.indb 77 2015-03-04 13:30:52

2.1.7 WSPÓŁCZYNNIKI EINSTEINA: A_E, B_{12}, B_{21}

W warunkach równowagi termodynamicznej układu atomowego, szybkość przejścia elektronu z dolnego poziomu energetycznego na górny poziom ($E_1 \rightarrow E_2$) oraz szybkość przejścia z górnego poziomu na poziom dolny ($E_2 \rightarrow E_1$) musi być taka sama. Oznacza to, że

$$n_{1\rightarrow 2} = n_{2\rightarrow 1}. \qquad (2.1.6)$$

Innymi słowy,

Szybkość absorpcji wymuszonej = szybkość emisji spontanicznej + szybkość emisji wymuszonej (2.1.7)

Na podstawie zależności (2.1.2, 2.1.3 oraz 2.1.4) powyższe stwierdzenie możemy zapisać za pomocą prostej zależności:

$$B_{12}N_1q(\nu) = B_{21}N_2q(\nu) + A_eN_2 \qquad (2.1.8)$$

Z powyższego równania otrzymujemy wyrażenie na gęstość energii w postaci:

$$q(\nu) = \frac{A_e}{B_{12}\frac{N_1}{N_2} - B_{21}} \qquad (2.1.9)$$

level to the higher level ($E_1 \rightarrow E_2$) and the rate of transition from the higher level to the lower level ($E_2 \rightarrow E_1$) must be the same. This means that

$$n_{1\rightarrow 2} = n_{2\rightarrow 1} \qquad (2.1.6)$$

In other words,

The stimulated absorption rate = spontaneous emission rate + stimulated emission rate *(2,1,7)*

Following the dependences (2.1.2, 2.1.3 and 2.1.4), the above statement may be expressed by a simple equation:

$$B_{12}N_1q(\nu) = B_{21}N_2q(\nu) + A_eN_2 \qquad (2.1.8)$$

The above equation lets us express the energy density as:

$$q(\nu) = \frac{A_e}{B_{12}\frac{N_1}{N_2} - B_{21}} \qquad (2.1.9)$$

Substituting the expression 2.1.5 in the dependency (2.1.9), we obtain the expression for the energy density in a somewhat different form, namely:

Laser.indb 78 2015-03-04 13:30:52

Podstawiając do zależności (2.1.9) wyrażenie 2.1.5, otrzymujemy wyrażenie na gęstość energii w trochę innej postaci, a mianowicie:

$$q(\nu)=\frac{A_e}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}}-B_{21}} \qquad (2.1.10)$$

Możemy teraz porównać powyższą zależność z wyrażeniem na gęstość energii wynikającą z prawa Plancka dla „ciała doskonale czarnego", które podane jest zależnością:

$$q(\nu)=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \qquad (2.1.11)$$

Ponieważ obie zależności wyrażają tę samą gęstość energii *q(ν)*, w dwóch różnych postaciach, wnioskujemy, że będą one równoważne, jeśli tylko

$$B_{12}=B_{21}=B$$

i

$$A_e=B\frac{8\pi\nu^3}{c^3} \qquad (2.1.12)$$

Współczynniki Einsteina B_{12} i B_{21} dostarczają odpowiedniego prawdopodobieństwa na jednostkę czasu i jednostkę spektralnej gęstości energii, że może wystąpić przejście wymuszone, podczas gdy A_e jest prawdopodobieństwem na jednostkę czasu, że wystąpi przejście spontaniczne. Rów-

$$q(\nu)=\frac{A_e}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}}-B_{21}} \qquad (2.1.10)$$

We can now compare the above dependence with the expression for energy density resulting from the Planck law for a "blackbody", which is expressed by the relationship:

$$q(\nu)=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \qquad (2.1.11)$$

Since both equations (2.1.10 and 2.1.11) express the same energy density *q(ν)* in two different forms, we conclude that they are equivalent, if only

$$B_{12}=B_{21}=B$$

and

$$A_e=B\frac{8\pi\nu^3}{c^3} \qquad (2.1.12)$$

Einstein coefficients B_{12} and B_{21} provide an appropriate probability per unit of time and unit of spectral energy density that a stimulated transition can occur, while A_e is the probability per unit of time that a spontaneous transition occurs. Equality of B_{12} and B_{21} means that stimulated absorption and emission have the same probability of occurrence between the same energy levels.

Laser.indb 79 2015-03-04 13:30:52

ność B_{12} i B_{21} oznacza, że wymuszona absorpcja i emisja mają takie same prawdopodobieństwa wystąpienia pomiędzy tymi samymi poziomami energetycznymi. Jednak emisja wymuszona i spontaniczna w warunkach równowagi powiązane są zależnością:

$$\frac{A_e}{B}=\left(e^{\frac{h\nu}{kT}}-1\right)\cdot q(\nu)=\frac{8\pi\nu^3}{c^3} \qquad (2.1.13)$$

Równanie powyższe oznacza, że dla danej temperatury szybkość emisji spontanicznej jest dużo większa niż szybkość emisji wymuszonej dla wysokich częstotliwości.

2.1.8 POMPOWANIE OPTYCZNE

Wytworzenie inwersji obsadzeń między poziomami energetycznymi jest równoważne zwiększeniu energii układu atomowego. Stan takiego układu atomowego nazywamy *stanem wzbudzonym*. Metody uzyskiwania inwersji, stosowane w laserach są różne, a jedną z metod wykorzystywaną głównie w laserach na ciele stałym jest pompowanie optyczne – zwykle za pomocą impulsowych lamp wyładowczych lub innych laserów. Pompowanie optyczne polega na silnym oświetleniu materiału laserującego promieniowaniem, głównie z nadfioletowego, widzialnego i podczerwonego obszaru widma promieniowania elektromagne-

However, spontaneous and stimulated emission under equilibrium conditions are connected by the following expression:

$$\frac{A_e}{B}=\left(e^{\frac{h\nu}{kT}}-1\right)\cdot q(\nu)=\frac{8\pi\nu^3}{c^3} \qquad (2.1.13)$$

The above equation means that for given temperature, the spontaneous emission rate is much higher than the rate of stimulated emission for high frequencies.

2.1.8 OPTICAL PUMPING

Forming a population inversion between energy levels is equivalent to increasing the energy of an atomic system. The state of such atomic system is called *excited state*. There are various methods for obtaining inversion used in lasers and one of the methods mostly used in solid-state lasers is optical pumping - generally using pulsed discharge lamps or other lasers. Optical pumping consists in intense lighting of the lasing material using radiation, mainly from the ultraviolet, visible and infrared region of the electromagnetic radiation spectrum. Pumping wavelengths are generally shorter than the laser emission wavelengths, and the atomic system is excited as a result of absorption of pumping radiation by the laser medium. Fig. 2.1.8 also

Laser.indb 80 2015-03-04 13:30:52

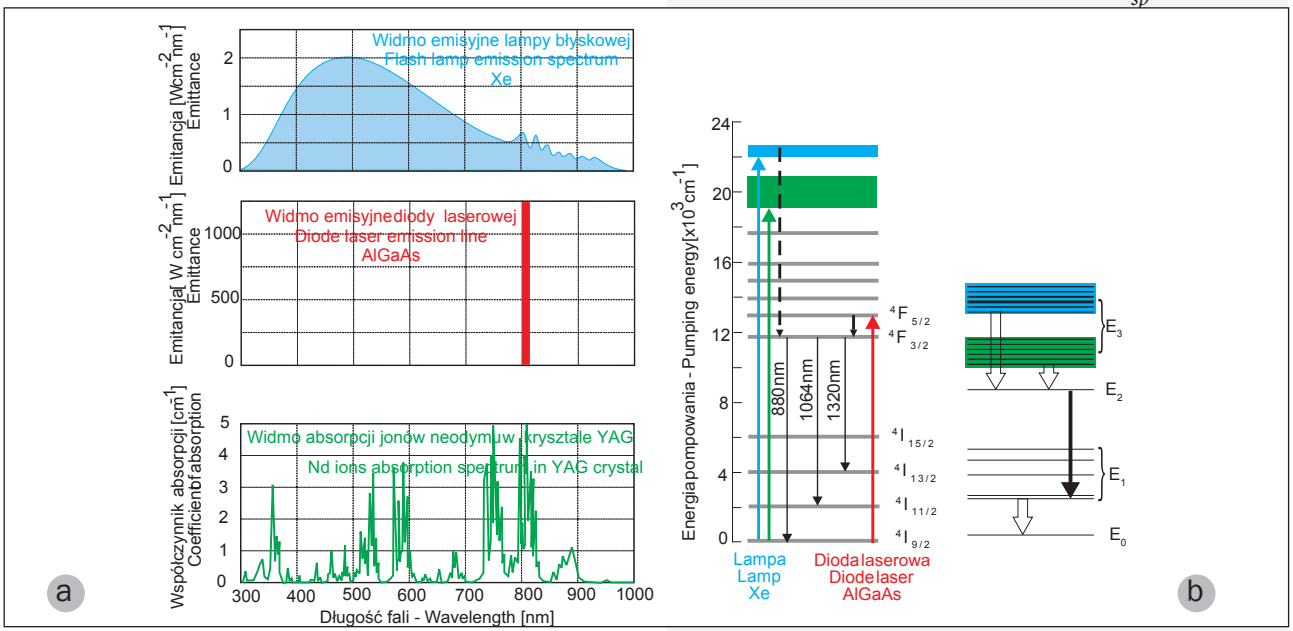
tycznego. Długości fal pompujących są z zasady krótsze od długości fal emisji danego lasera, a wzbudzenie układu atomowego następuje w wyniku procesu absorpcji promieniowania pompującego przez ośrodek laserowy. Na rys. 2.1.8 pokazano również schematy pompowania optycznego trój- i czteropoziomowych systemów laserowych. W układzie trójpoziomowym, aby dokonać odwrócenia populacji poziomów 1 i 2, trzeba *przenieść* na tzw. poziom „metatrwały" (długożyciowy), przeszło połowę wszystkich atomów ośrodka czynnego. Dużą przewagę nad trójpoziomowym układem pompowania ma układ czteropoziomowy, rys. 2.1.8b. Inwersja obsadzeń zachodzi między dwoma pośrednimi poziomami energetycznymi, leżącymi pomiędzy poziomem podstawowym a poziomem pompowania. Uzyskiwane sprawności obu laserów pompowanych lampą błyskową: rubinowego i neodymowego są odpowiednio, 0,05% i 3%. Metody pompowania są charakterystyczne dla każdego ośrodka aktywnego. O metodach pompowania ośrodków aktywnych – laserowych powiemy w podrozdziale poświęconym rodzajom laserów. Dziś lasery na ciele stałym pobudza się również laserami półprzewodnikowymi, przez co uzyskuje się wysokie sprawności pompowania z uwagi na możliwość precyzyjnego dostrojenia długości fali pompy optycznej do pasm absorpcji ośrodka aktywnego, np. neodymu. Na rys. 2.1.9

show optical pumping diagrams, of three- and four-level laser systems. In a three-level system, in order to reverse the population of levels 1 and 2, it is necessary to *move* to the so-called "metastable" (long-lived) level more than a half of all the atoms of the active medium. A four-level system, fig.2.1.8b. has a big advantage over the three-level pumping system. The inversion of populations occurs between two intermediate energy levels, found between the ground and the pumping levels. The resulting efficiency of both lasers pumped using flash lamp: ruby and neodymium, are respectively 0.05% and 3%. Pumping methods are specific to each active medium. The methods of pumping the active (laser) media are presented in the section describing the types of lasers. Nowadays, solid-state lasers are also excited using semiconductor lasers, thus obtaining high pumping efficiency due to the possibility of fine-tuning of the wavelength of the optical pump to the absorption bands of the active medium, e.g. neodymium. Fig.2.1.9 presents a comparison of the two ways of exciting a neodymium ion: by flash lamp, fig.2.1.9a and AlGaAs semiconductor laser, fig.2.1.9b.

Fig.2.1.10, in turn, shows for comparison the energy (power) balance of the Nd: YAG laser excited by a flash lamp and semiconductor laser.

Laser.indb 81 2015-03-04 13:30:52

porównano oba sposoby pobudzania jonu neodymu: za pomocą lampy błyskowej, rys. 2.1.9a i laserem półprzewodnikowym AlGaAs, rys. 2.1.9b.



Rys. 2.1.9. *a) - Porównanie dwóch sposobów pobudzania jonu neodymu: za pomocą lampy błyskowej i lasera półprzewodnikowego typu AlGaAs; b) ilustracja poziomów energetycznych jonu neodymu – absorpcyjnych i emisyjnych.*

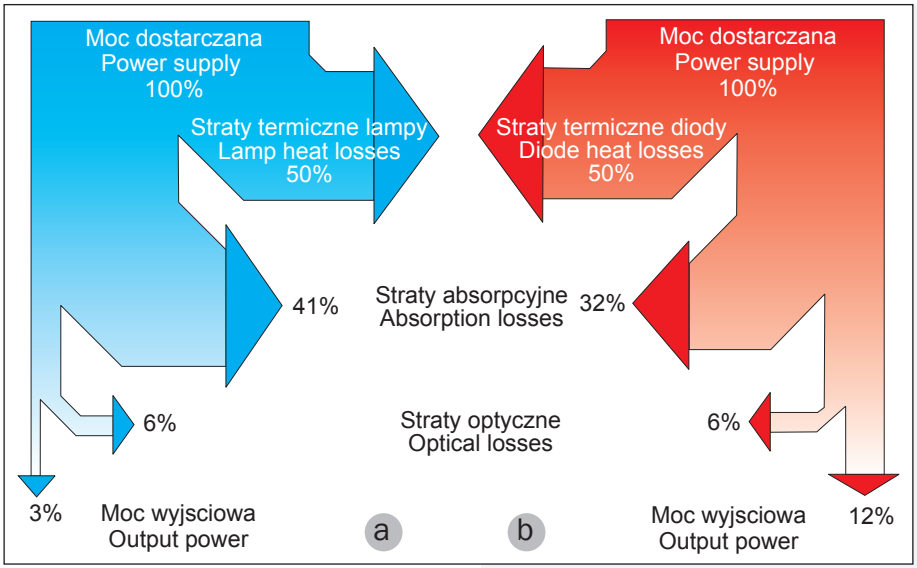
Fig. 2.1.9. *a) - comparison of two methods of exciting a neodymium ion: by flash lamp and AlGaAs semiconductor laser; b) illustration of neodymium ion energy levels - absorption and emission.*

Z kolei na rys. 2.1.10 przedstawiono dla porównania bilans energii (mocy) lasera Nd:YAG pobudzanego lampą błyskową i laserem półprzewodnikowym.

2.1.9. LIFETIME OF EXCITED ATOMS

The time constant or the lifetime τ_{sp} of excited atoms is a measure of how long atoms remain excited, or a period following which spontaneous emission occurs. More specifically, the lifetime tells us how much time elapses for atoms in the excited state before their number decreases $1/e \approx 2.7$ times compared to the original excited

Laser.indb 82 2015-03-04 13:30:52



Rys. 2.1.10. *Bilans mocy. a) – Laser Nd:YAG pompowany lampą; b) – laser Nd:YAG pompowany laserem półprzewodnikowym.*

Fig. 2.1.10. *The balance of power. a) - Nd: YAG laser pumped by lamp; b) - Nd: YAG laser pumped by a semiconductor laser.*

2.1.9. CZAS ŻYCIA ATOMÓW WZBUDZONYCH

Stała czasowa, lub czas życia, τ_{sp}, atomów w stanie wzbudzonym jest miarą, jak długo atomy pozostają w tym stanie, lub inaczej okresem, po którym wystąpi emisja spontaniczna. Ściślej mówiąc, czas życia mówi nam, jak dużo czasu upływa dla atomów w stanie wzbudzonym, aby ich liczba zmniejszyła się o $1/e \approx 2{,}7$ razy, w stosunku do pierwotnego stanu wzbudzonego. Aby określić τ_{sp}, rozważmy prawdopodobieństwo p, że

state. To determine τ_{sp}, let us consider the probability p that the atom leaves the excited state in an elementary time interval Δt in the form of:

$$p = p_t \cdot \Delta t \qquad (2.1.14)$$

where: p_t – is the probability per unit of time that a process of spontaneous emission will occur. If in time t there are N excited atoms, change the number of atoms ΔN in the time interval Δt will be:

Laser.indb 83 2015-03-04 13:30:53

atom opuści stan wzbudzony w elementarnym przedziale czasu, Δt, w postaci:

$$p = pt \cdot \Delta t \qquad (2.1.14)$$

gdzie: p_t – jest prawdopodobieństwem w jednostce czasu, że będzie miał miejsce akt emisji spontanicznej. Jeśli w czasie, t, znajduje się, N, atomów w stanie wzbudzonym, to zmiana liczby atomów, ΔN, w przedziale czasu, Δt, będzie:

$$\Delta N = -N \cdot p_t \cdot \Delta t. \qquad (2.1.15)$$

Znak minus w po wyższym wyrażeniu oznacza, że następuje zmniejszenie liczby atomów wzbudzonych. W granicznym przypadku, otrzymamy:

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot p_t \qquad (2.1.16)$$

a po scałkowaniu tego wyrażenia, otrzymamy:

$$N = N_0 \cdot e^{-p_t \cdot t}, \qquad (2.1.17)$$

gdzie: N_0 jest liczbą atomów w stanie wzbudzonym w czasie $t = 0$. Oznacza to, że dla emisji spontanicznej, czas życia lub stała czasowa jest równa:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{p_t} \ . \qquad (2.1.18)$$

$$\Delta N = -N \cdot p_t \cdot \Delta t. \qquad (2.1.15)$$

The minus sign in the above expression means a decrease in the number of excited atoms. In the limit case, we get:

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot p_t \qquad (2.1.16)$$

and after integrating this expression, we obtain:

$$N = N_0 \cdot e^{-p_t \cdot t}, \qquad (2.1.17)$$

where: N_0 is the number of atoms in the excited state in time $t = 0$. This means that for spontaneous emission, the lifetime or time constant is:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{p_t} \qquad 2.1.18)$$

As a further consequence, since A_e is the probability per unit of time that the spontaneous transition will occur, we may formulate:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{p_t} = \frac{1}{A_e} \qquad (2.1.19)$$

Laser.indb 84 2015-03-04 13:30:53

W dalszej konsekwencji, ponieważ, A_e, jest prawdopodobieństwem przypadającym w jednostce czasu, że wystąpi przejście spontaniczne, możemy zapisać:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{p_t} = \frac{1}{A_e} \ , \qquad (2.1.19)$$

lub

$$A_e = \frac{1}{\tau_{sp}} \qquad (2.1.20)$$

2.1.10 KRÓTKIE PODSUMOWANIE

Izolowany atom, układ atomów, jony lub molekuły mogą się znajdować zarówno w stanie niższej energii równej E_1 (w stanie podstawowym), jak i w stanie wyższej energii E_2 (w stanie wzbudzonym). Przejścia pomiędzy dwoma stanami energetycznymi atomu w obecności zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego mogą zachodzić na trzy sposoby, a mianowicie w wyniku: wymuszonej absorpcji, emisji spontanicznej i wymuszonej emisji. Na rys. 2.1.11 zilustrowano te trzy rodzaje przejść na jednym obrazie.

Atom (materia) przedstawiony, jako czerwona kropka może się znajdować albo w stanie kwantowym o niższej energii E_1, albo w stanie kwantowym o wyższej energii E_2. W procesie (a) atom

or

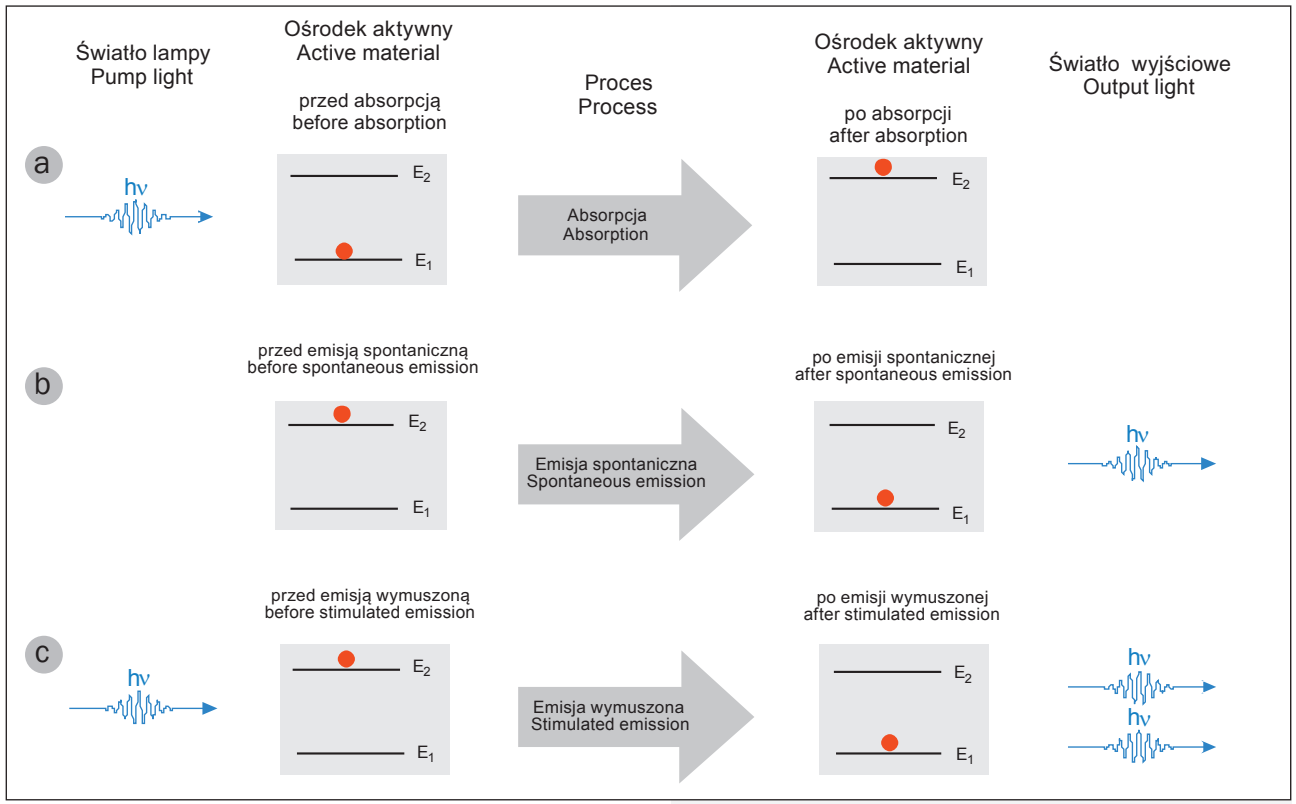
$$A_e = \frac{1}{\tau_{sp}} \qquad (2.1.20)$$

2.1.10 SHORT SUMMARY

An isolated atom, a system of atoms, ions or molecules may be present in both lower energy state of E_1 (so called ground state) and higher energy state of E_1 (excited state). The transitions between two atomic energy states in the presence of a time-varying electromagnetic field may occur in three ways, namely by stimulated absorption, spontaneous emission and stimulated emission. Fig. 2.1.11 illustrates these three types of transitions in one image.

Atom (matter) represented as a red dot may be in either lower energy quantum state E_1, or higher energy quantum state E_2. In the process (a), the atom absorbs from the light wave (external field) a photon with energy hv. In the process (b), the atom spontaneously emits a photon with energy hv. In the process (c), the light with energy of photons E_1 stimulates the emission of a photon with the same energy, thereby inreasing the energy carried by the light wave.

Laser.indb 85 2015-03-04 13:30:53



Rys. 2.1.11. *Ilustracja oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią w procesach: a) – absorpcji, b) – emisji spontanicznej i c) – emisji wymuszonej.*

pochłania z fali świetlnej (pola zewnętrznego) foton o energii $h\nu$. W procesie (b) atom emituje spontanicznie foton o energii $h\nu$. W procesie (c) światło o energii fotonów $h\nu$ wymusza emisję fotonu o tej samej energii, zwiększając tym samym energię niesioną przez falę świetlną.

Fig. 2.1.11. *Illustration of interaction of electromagnetic radiation with matter in the processes of a) - absorption, b) - spontaneous emission c) - stimulated emission.*

1. *Absorption*. Fig.2.1.11a shows an atom initially in ground state E_1. If such atom is placed in an alternating electromagnetic field with frequency ν, it will be able to absorb energy $h\nu$ from this field and pass to a state of higher energy E_2. According to the principle of energy conservation:

Laser.indb 86 2015-03-04 13:30:53

1. *Absorpcja*. Na rys. 2.111a pokazano atom znajdujący się początkowo w stanie podstawowym E_1. Jeśli taki atom umieścimy w zmiennym polu elektromagnetycznym o częstości ν, to będzie on mógł pochłonąć z tego pola energię $h\nu$ i przejść do stanu o wyższej energii E_2. Z zasady zachowania energii wynika, że:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1, \qquad (2.1.21)$$

a taki proces nazywamy *absorpcją*.

2. *Emisja spontaniczna*. Atom na rys. 2.1.11b znajduje się z kolei w stanie wzbudzonym E_2 i nie istnieje żadne promieniowanie zewnętrzne. Po pewnym czasie ten sam atom (w wyniku relaksacji, czyli dążenia układu do równowagi termodynamicznej), przejdzie do stanu podstawowego E_1, emitując foton o energii $h\nu$. Proces taki nazywamy *emisją spontaniczną*, ponieważ akt ten nie jest wywołany żadnym czynnikiem – polem zewnętrznym. W ten sposób powstaje światło, jak we włóknie zwykłej żarówki. Zwykle średni czas życia wzbudzonych atomów, czyli średni czas, jaki upłynie, zanim nastąpi emisja spontaniczna, wynosi około 10^{-8} s. Jednak w przypadku niektórych stanów wzbudzonych ten średni czas może być dłuższy – stany wzbudzone nazywamy wtedy stanami *metatrwałymi* (*metastabilnymi*). Średni czas życia stanu

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1, \qquad (2.1.21)$$

and such a process is called *absorption*.

2. *Spontaneous emission*. The atom in fig.2.1.11b is, in turn, in an excited state E_2 and there is no external radiation. After some time, the same atom (following relaxation, or the trend of the system towards thermodynamic equilibrium), it will pass to ground state E_1 emitting a photon of energy $h\nu$. This process is called *spontaneous emission*, as this action is not caused by any factor – e.g. by external field. This leads to a production of light, as in an ordinary bulb filament. Typically, the average lifetime of excited atoms, or the average time elapsing before the spontaneous emission, is about 10^{-8} s. However, in the case of some excited states, the average time may be longer - excited states are then called *metastable states*. The average lifetime of a metastable state may be as long as 10^{-3} s. Metastable states play a major role in the laser operation, which will be discussed further on.

3. *Stimulated emission*. The atom in fig.2.1.11c is also in excited state E_2, but this time in the presence of electromagnetic radiation with a frequency given by equation (2.1.21).

Laser.indb 87 2015-03-04 13:30:53

metatrwałego może nawet dochodzić do 10^{-3} s. Stany metatrwałe odgrywają w działaniu lasera bardzo ważną rolę, o czym będzie jeszcze mowa.

3. *Emisja wymuszona*. Atom na rys. 2.1.11c również znajduje się w stanie wzbudzonym E_2, ale tym razem w obecności promieniowania elektromagnetycznego o częstości danej równaniem (2.1.21). Foton o energii $h\nu$ może wymusić na tym atomie jego przejście do stanu podstawowego E_1. W czasie takiego procesu emitowany będzie dodatkowy foton, którego energia także równa będzie $h\nu$. Proces taki nazywamy *emisją wymuszoną*, ponieważ taki akt jest wywołany przez foton pochodzący z zewnątrz. Ten drugi wyemitowany foton jest pod każdym względem identyczny z fotonem wymuszającym, a fale związane z tymi fotonami mają taka samą energię, fazy, polaryzację i kierunek rozchodzenia się. Na rys. 2.1.11c pokazano emisję wymuszoną dla pojedynczego atomu.

W laserach, podobnie jak w lampach wyładowczych, np. lampach pompujących materiał laserujący, światło emitowane jest przez atomy, jony i molekuły w trakcie ich przejść z poziomów wyższych – wzbudzonych, na niższe. Proces emisji spontanicznej występujący w lampach uwalnia fotony o różnych długościach fal i w różnych kierunkach. W laserach jednak przejścia te są wy-

Photon with energy $h\nu$ can force on this atom its transition to ground state E_1. During this process an additional photon will be emitted, also with energy of $h\nu$. This process is called *stimulated emission*, as such an action is induced by an external photon. This second photon emitted is in all respects identical to the stimulating photon, and their correspondent waves have the same energy, phases, polarisation and propagation direction. Fig.2.1.11c shows stimulated emission for a single atom.

In lasers, as in discharge lamps, e.g. flash lamps pumping the lasing material, the light is emitted by atoms, ions and molecules in the course of their transitions from higher - excited levels to lower ones. The spontaneous emission process occurring in the lamps releases photons of various wavelengths and in various directions. In lasers, however, the transitions are stimulated by external photons, providing further photons with identical characteristics. It is a fundamental property which makes lasers emit beams of monochromatic light in a very specific direction. What is phenomenal, however, is that through pumping by an incoherent light source, coherent laser light is obtained. In ordinary atomic light sources, the phase distribution of photons emitted by various atoms is random,

Laser.indb 88 2015-03-04 13:30:53

muszone przez fotony zewnętrzne, dostarczające kolejnych fotonów o identycznych cechach. Jest to podstawowa właściwość, w wyniku której lasery emitują wiązki światła monochromatycznego w ściśle określonym kierunku. Fenomenem jest jednak to, że poprzez pompowanie niekoherentnym źródłem światła uzyskujemy koherentne światło laserowe. W zwykłych atomowych źródłach światła rozkład faz fotonów emitowanych przez różne atomy jest przypadkowy i otrzymane promieniowanie jest niespójne. Powodem tego jest fakt, że nie ma związku pomiędzy chwilami, w których atomy dokonują swoich przejść. Natomiast w laserowych źródłach światła atomy emitują kwanty promieniowania będące w fazie z promieniowaniem wymuszającym i w tym samym kierunku.

2.2. GENERACJA I WZMOCNIENIE PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

2.2.1. PRZEBIEG AKCJI LASEROWEJ

Wiemy już, że kluczem do działania lasera jest proces emisji wymuszonej. Wiemy również, że w ośrodku aktywnym – laserowym, w którym wytworzono inwersję obsadzeń między dwoma odpowiednimi poziomami energetycznymi, można wzmacniać rozchodzące się w nim promieniowanie. Jednak, aby spowodować rzeczywisty proces

and the radiation obtained is incoherent. It is because there is no link between the moments in which atoms realise their transitions. In laser light sources, however, atoms emit quanta of radiation which are in a phase with stimulating radiation and in the same direction.

2.2 GENERATION AND AMPLIFICATION OF LASER RADIATION

2.2.1 LASING PROCESS

We already know that the key to the laser operation is the stimulated emission process. We also know that in the active - laser medium, in which a population inversion was produced between two respective energy levels, the propagating inside radiation can be amplified. However, in order to induce the real process of

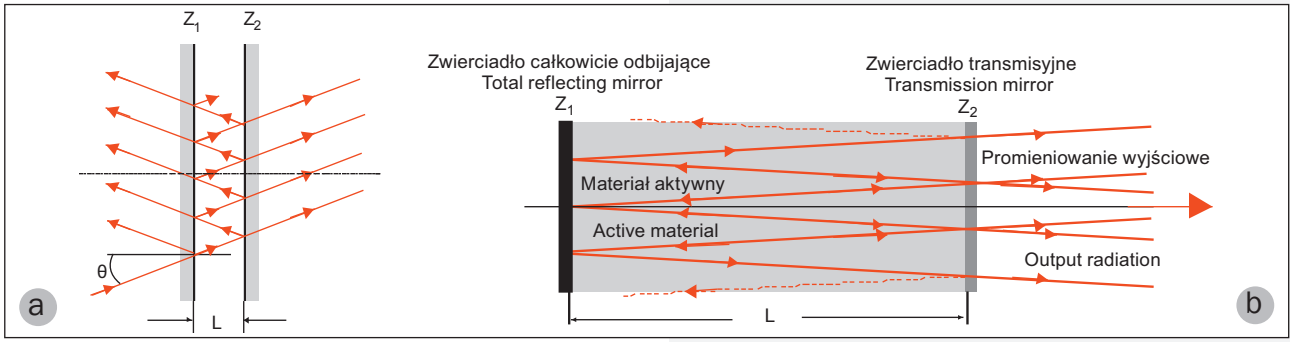
Laser.indb 89 2015-03-04 13:30:53

generacji i wzmocnienia światła, należy stworzyć dodatkowe warunki. W tym celu ośrodek aktywny znajdujący się w stanie inwersji obsadzeń, umieszcza się w *rezonatorze optycznym* (optycznej komorze rezonansowej). W najprostszym przypadku są to dwa równoległe względem siebie płaskie zwierciadła, ustawione prostopadłe do osi rezonatora, z których jedno jest częściowo odbijające. Taki układ płaskich zwierciadeł – znany jest w optyce pod nazwą – interferometr Fabry-Perota, rys. 2.2.1a. Między zwierciadłami tymi występuje zjawisko interferencji, czyli odpowiedniego nakładania się promieni świetlnych, wielokrotnie odbijanych od powierzchni obu zwierciadeł.

Interferometr Fabry'ego – Perota znalazł właśnie zastosowanie w laserach, jako rezonator

generation and amplification of light, additional conditions need to be created. For this purpose, the active medium in the state of population inversion is placed in an *optical resonator* (optical resonant cavity). In the simplest of cases, these are two parallel plane mirrors placed perpendicular to the axis of the resonator, one of which is partially reflecting. Such a system of plane mirrors is known in optics as Fabry–Pérot interferometer, fig.2.2.1a. Between the mirrors there occurs the phenomenon of interference, i.e. of a specific overlapping of the rays of light repeatedly reflected from the surface of both mirrors.

And it was the Fabry–Pérot interferometer to be used in lasers as an optical resonator



Rys. 2.2.1. *a) – Schemat optyczny interferometru Fabry'ego – Perota (klasyczny, z przerwą powietrzną między zwierciadłami. b) – Interferometr Fabry`ego – Perota z umieszczonym pomiędzy zwierciadłami (jednym transmisyjnym) materiałem aktywnym.*

Fig. 2.2.1. *a) – Optical diagram of the Fabry–Pérot interferometer (classic, with an air gap between the mirrors. b) - the Fabry–Pérot interferometer with active material placed between the mirrors (one transmission mirror).*

Laser.indb 90 2015-03-04 13:30:53

optyczny z umieszczonym w jego wnętrzu ośrodkiem aktywnym – laserującym, rys. 2.2.1b. W tym przypadku zwierciadła interferometru zostały nałożone na czoła materiału aktywnego wykonanego w postaci pręta. Jak więc przebiega akcja laserowa? Prześledźmy drogę jednego fotonu, wyemitowanego przypadkowo w ośrodku aktywnym, umieszczonym wewnątrz interferometru i niech ten foton propaguje się od środka ku lewemu zwierciadłu całkowicie odbijającemu, rys. 2.2.2. Taki foton (zaznaczony czerwoną strzałką) pojawi się zawsze w procesie emisji spontanicznej, z gęsto obsadzonego poziomu metastabilnego, a prawdopodobieństwo emisji fotonów wzdłuż osi rezonatora jest takie samo, jak w każdym innym kierunku.

Początek akcji laserowej rozpoczyna się od pojawienia się fotonu spontanicznego, poruszającego się równolegle do osi optycznej rezonatora. Foton ten napotyka na swej drodze wzbudzony atom i wymusza na nim emisję kolejnego fotonu, którego kierunek propagacji, faza i stan polaryzacji jest taki sam jak fotonu pierwotnego. Teraz z kolei już dwa identyczne fotony – *bliźniaki* wymuszą kolejne dwa – powstaną wtedy cztery, itd., itd. Taka akcja przebiegać będzie w sposób *lawinowy*. Weźmy pod uwagę również fakt, iż foton *pierwotny* lub wiele fotonów pierwotnych może pojawić się

with an active - lasing medium placed inside it, fig.2.2.1b. In this case, the interferometer mirrors have been placed on the faces of the active material in the form of a rod. So how does the laser operate? Let's take a look at the path of one photon emitted accidentally in the active medium, placed inside the interferometer and let us assume that the photon propagates from the centre towards the left fully reflecting mirror, fig.2.2.2. Such a photon (marked with a red arrow) appears always in the process of spontaneous emission, from a densely populated metastable level and the probability of emission of photons along the axis of the resonator is the same as in any other direction.

The lasing begins with the appearance of a spontaneous photon, moving parallel to the optical axis of the resonator. This photon encounters on its way an excited atom and stimulates it to emit another photon, with the same direction of propagation, phase and polarisation state as the original photon. Now, then, already two identical photons - *twins* stimulate two more - then there will be four, etc. This action will occur in a *cumulative manner*. Let us also take into consideration the fact that the *original* photon or more original photons may appear in various locations in the active

Laser.indb 91 2015-03-04 13:30:53

w różnych miejscach w materiale aktywnym w różnym czasie. Taka akcja przebiegać będzie dopóty, dopóki nie zakończy się proces pompowania materiału aktywnego i dopóki w ośrodku aktywnym będzie istniała inwersja obsadzeń poziomów energetycznych. Oczywiście wyemitowany w innym miejscu, w ośrodku aktywnym foton może poruszać się ku zwierciadłu przepuszczalnemu, napotykając na swej drodze kolejne wzbudzone atomy i wymuszając emisję kolejnych fotonów.

W rzeczywistym generatorze laserowym wzbudzanych jest zwykle jednocześnie wiele fotonów, a rezonator optyczny stwarza możliwości generacyjne dzięki dodatniemu sprzężeniu zwrotnemu (odbiciu fotonów od zwierciadeł). W wyniku wielu odbić i wymuszeń emisji kolejnych fotonów wewnątrz rezonatora, zwiększa się gęstość promieniowania. Umożliwia to sprzężenie zwrotne i w tym przypadku polega ono na częściowym odbiciu wiązki promieniowania z powrotem do ośrodka wzmacniającego. Częściowa transmisja zwierciadła wyjściowego Z_2 umożliwia wyprowadzenie części generowanego promieniowania poza rezonator i dzięki temu staje się ono dostępne dla użytkownika.

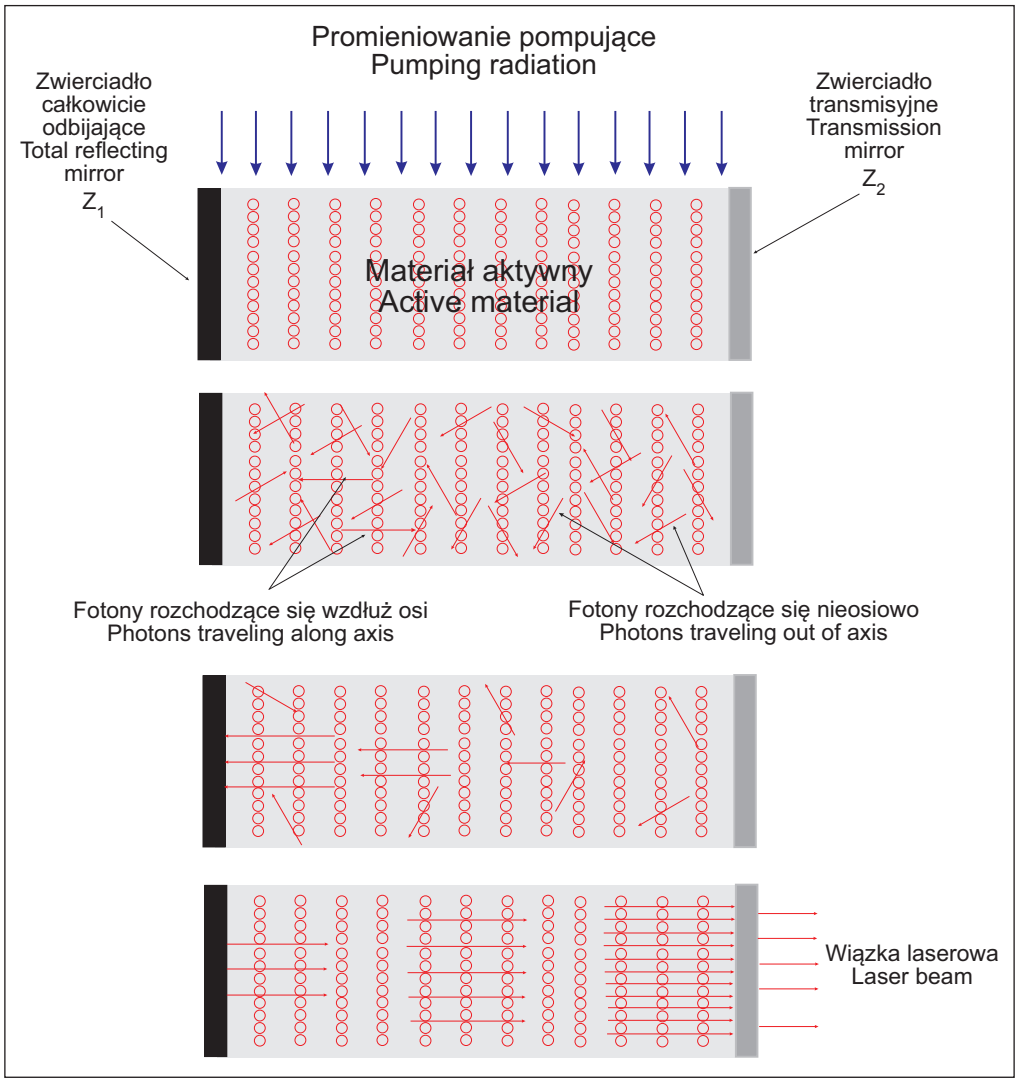
Warunkiem koniecznym do opisanego wyżej przebiegu generacji laserowej jest istnienie w ośrodku aktywnym ilościowej przewagi atomów

material at different times. This campaign will run until it completes the process of pumping the active material in the centre and as long as there will be an active inversion energy levels. Of course a photon emitted elsewhere, in the active medium, can move toward the transmissible mirror, encountering more excited atoms and stimulating the emission of further photons.

There are many photons simultaneously excited in the real laser oscillator, and the optical resonator makes generation possible by positive feedback (photons reflected from the mirrors). As a result of multiple reflections and stimulations of emission of successive photons inside the resonator, the density of the radiation increases. This allows for feedback, which in this case consists of a partial reflection of the radiation beam back to the amplification medium. Partial transmission of the output mirror Z_2 allows to extract a part of the radiation generated outside the resonator, thus making it available to the user.

A condition for the above described laser generation is the existence in the active medium of quantitative advantage of excited atoms over those non-excited, to the extent that the process of stimulated emission compensated in excess

Laser.indb 92 2015-03-04 13:30:53



Rys. 2.2.2. *Ilustracja przebiegu generacji światła laserowego – wzmocnienia. Zwierciadła tworzą rezonator optyczny, z których jedno jest częściowo przepuszczalne (prawe).*

Fig. 2.2.2. *Illustration of laser light generation - amplification. The optical resonator is formed by mirrors, one of which is partially transmissible (right).*

Laser.indb 93 2015-03-04 13:30:53

wzbudzonych nad niewzbudzonymi, w takim stopniu, aby akty emisji wymuszonej kompensowały z nadwyżką akty absorpcji fotonów oraz straty (np. odbiciowe czy rozproszeniowe) energii w rezonatorze. Nadwyżka emisji promieniowania wychodzi w postaci wiązki laserowej na zewnątrz rezonatora optycznego przez częściowo przepuszczające zwierciadło wyjściowe Z_2. Wytworzona przez rezonator optyczny wiązka światła jest niemal równoległa i rozchodzi się wzdłuż osi rezonatora. Ta równoległość wiązki laserowej powstaje dzięki akcji laserowej wytwarzającej lawinę fotonów, które wykonują tysiące przejść między zwierciadłami – równolegle do osi pręta, lub są minimalnie odchylone od kierunku osiowego. Fotony skierowane w dowolnie innym kierunku opuszczają ośrodek aktywny już po niewielkiej liczbie odbić od zwierciadeł lub nawet bez odbicia, nie mając możliwości odpowiedniego wzmocnienia.

2.2.2 WZMOCNIENIE

Intensywność promieniowania wymuszonego wzrasta w trakcie propagacji w rezonatorze, odbijając się od obu zwierciadeł. Fotony „podróżując" tam i z powrotem wzdłuż ośrodka wzmacniającego wymuszają coraz większą emisję kolejnych fotonów, co objawia się wzrostem intensywności światła w wiązce laserowej, rys. 2.2.2. Aby jed-

the processes of photon absorption and energy losses (e.g. reflection or scattering related) in the resonator. Excess of the radiation emission leaves the optical resonator in the form of a laser beam through the partially transmissible output mirror Z_2. The light beam produced by the optical resonator is almost parallel and propagates along the axis of the resonator. The parallelism of the laser beam is due to the lasing generating an avalanche of photons that undergo thousands of transitions between the mirrors - parallel to the axis of the rod, or are slightly angled in relation to the axial direction. The photons directed in any other direction leave the active medium after only a small number of reflections from mirrors or even without reflection, with no sufficient amplification.

2.2.2 AMPLIFICATION

The intensity of stimulated radiation increases in the course of the propagation in the resonator, reflecting from both mirrors. When "travelling" there and back along the amplification medium, the photons stimulate an increasing photon emission, which results in an increased intensity of light in the laser beam, fig.2.2.2. But in order to initiate and sustain the light emission process, amplification of the active medium must be

Laser.indb 94 2015-03-04 13:30:53

nak zainicjować i podtrzymać proces emisji światła, wzmocnienie ośrodka aktywnego musi być odpowiednio duże i przewyższać liczne, różne straty. Warunek ten definiuje się za pomocą tzw. progowego współczynnika wzmocnienia ośrodka aktywnego, k_{pr}. Jeśli natężenie światła w wiązce laserowej wzrasta od wartości początkowej I_0 do wartości I_1 po przejściu od jednego zwierciadła do drugiego, czyli całej długości L rezonatora optycznego, rys. 2.2.3, wtedy w tzw. rezonatorze bezstratnym natężenie I_1 można wyrazić następująco:

$$I_1(L) = I_0 \cdot e^{k \cdot L}, \qquad (2.2.1)$$

gdzie: k jest współczynnikiem wzmocnienia ośrodka aktywnego.

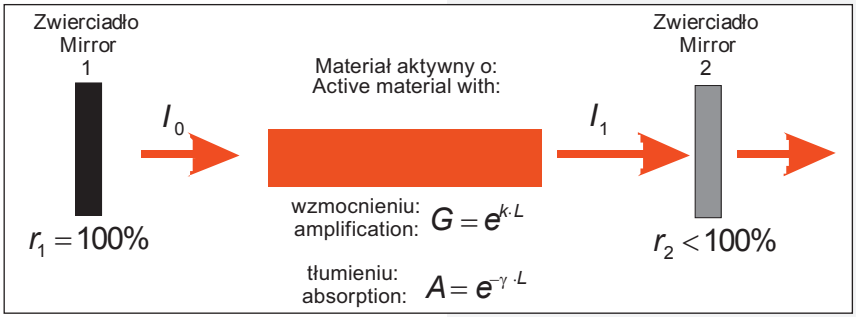
Jeśli teraz zdefiniujemy straty γ związane z przejściem wiązki laserowej wzdłuż rezonato-

sufficiently large as to exceed many various losses. This condition is defined by the so-called active medium threshold gain coefficient k_{pr}. If the light intensity in the laser beam increases from the initial value I_0 to the value of I_0 following the transition from one mirror to another, or the entire length L of the optical resonator, fig.2.2.3, the intensity I_1 in the so-called lossless resonator may be expressed as follows:

$$I_1(L) = I_0 \cdot e^{k \cdot L}, \qquad (2.2.1)$$

where: k is the gain coefficient of the active medium.

If we now define the losses γ associated with the transition of the laser beam along the resonator, namely the losses caused by diffraction at the edges of the mirrors, absorption



Rys. 2.2.3. *Ilustracja modelu lasera przyjęta w analizie wzmacniania promieniowania.*

Fig. 2.2.3. *Illustration of the laser model adopted in the analysis of the radiation amplification.*

Laser.indb 95 2015-03-04 13:30:53

ra, a mianowicie straty spowodowane: dyfrakcją na krawędziach zwierciadeł, absorpcją i rozpraszaniem promieniowania w materiale aktywnym i niepełnym odbiciem na zwierciadłach, itp., wtedy efektywnym współczynnikiem wzmocnienia będzie: $k–\gamma$, a natężenie I_1 możemy zapisać następująco:

$$I_1(L) = I_0 \cdot e^{(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.2)$$

Jeśli z kolei uwzględnimy współczynniki odbić na obu zwierciadłach Z_1 i Z_2, odpowiednio: r_1 i r_2, intensywność wiązki po odbiciu od zwierciadła Z_1 będzie:

$$I_1(L) = r_1 \cdot I_0 \cdot e^{(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.3)$$

Ostatecznie, intensywność wiązki laserowej po podwójnym obiegu rezonatora (włączając również odbicie od zwierciadła Z_2) można zapisać w postaci:

$$I_1(L) = r_1 \cdot r_2 \cdot I_0 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.4)$$

Wzmocnienie G, w wyniku podwójnego obiegu rezonatora definiuje się, jako stosunek intensywności wyjściowej I_1 do intensywności wejściowej I_0 i zapisuje się w postaci:

$$G=\frac{I_1}{I}=\frac{r_1 \cdot r_2 \cdot I_0 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L}}{I}=r_1 \cdot r_2 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.5)$$

and scattering of radiation in the active material and by only partial reflection on the mirrors, etc., the effective gain coefficient is: $k–\gamma$, and the intensity I_1 may be formulated as follows:

$$I_1(L) = I_0 \cdot e^{(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.2)$$

If, in turn, we take into account the coefficients of reflections on both mirrors Z_1 i Z_2, respectively: r_1 and r_2, the intensity of the beam after reflection from the mirror Z_1 is:

$$I_1(L) = r_1 \cdot I_0 \cdot e^{(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.3)$$

Finally, the intensity of the laser beam after a double cycle within the resonator (also including the reflection from the mirror Z_2) may be formulated as:

$$I_1(L) = r_1 \cdot r_2 \cdot I_0 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.4)$$

Gain G, due to the double cycle within the resonator, is defined as the ratio of output intensity I_1 to input intensity I_0 and is formulated as:

$$G=\frac{I_1}{I}=\frac{r_1 \cdot r_2 \cdot I_0 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L}}{I}=r_1 \cdot r_2 \cdot e^{2(k-\gamma)\cdot L} \qquad (2.2.5)$$

To initiate and sustain the laser emission,

Laser.indb 96 2015-03-04 13:30:54

Aby zainicjować i podtrzymać emisję laserową, wzmocnienie w rezonatorze laserowym musi być równe lub większe od jedności. Jeśli wzmocnienie jest mniejsze od jedności, straty w rezonatorze spowodują zanik oscylacji – emisji światła. Tym samym warunek progowy na generacje laserową wyrazi się następująco:

$$r_1 \cdot r_2 \cdot e^{2(k_{pr}-\gamma)\cdot L} = 1 \qquad (2.2.6)$$

gdzie: k_{pr} jest progowym współczynnikiem wzmocnienia, który możemy przedstawić za pomocą wyrażenia:

$$k_{pr} = \gamma + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{r_1 \cdot r_2}\right) \qquad (2.2.7)$$

2.2.3. REZONATORY OPTYCZNE I MODY

Dwa równolegle ustawione względem siebie zwierciadła tworzą rezonator optyczny, który w generatorze laserowym spełnia trzy podstawowe funkcje. Pierwszą z nich jest wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego w wyniku odbić fotonów od zwierciadeł. Umożliwia więc odpowiednie zwiększenie gęstości promieniowania wymuszającego i wydłużenie długości drogi jego oddziaływania (wzmocnienia) z atomami wzbudzonymi w materiale aktywnym. Drugą ważną funkcją rezo-

the gain in the laser resonator must be equal to or greater than one. If the gain is less than one, the losses in the resonator will result in the disappearance of oscillation - light emission. Thus, the threshold condition for the laser generation is formulated as follows:

$$r_1 \cdot r_2 \cdot e^{2(k_{pr}-\gamma)\cdot L} = 1 \qquad (2.2.6)$$

where: k_{pr} is the threshold gain coefficient, which may be represented by the expression:

$$k_{pr} = \gamma + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{r_1 \cdot r_2}\right) \qquad (2.2.7)$$

2.2.3 OPTICAL RESONATORS AND MODES

Two parallel mirrors form an optical resonator, which in a laser oscillator performs three basic functions. The first is to provide the positive feedback as a result of photons reflection from the mirrors. This makes it possible to increase the density of the stimulating radiation and to extend the length of the path of its interaction (amplification) with excited atoms in the active material. Another important function of the resonator is the ability to direct the laser radiation in space to a high concentration,

Laser.indb 97 2015-03-04 13:30:54

natora jest zdolność ukierunkowania w przestrzeni promieniowania laserowego do dużej koncentracji, co oznacza mały kąt rozbieżność wiązki laserowej. Rezonator optyczny pełni także trzecią funkcję polegającą na tym, że w rezonatorze można wzbudzić odpowiednio ukształtowane rozkłady natężenia pola elektromagnetycznego, tzw. *mody rezonatora*.

W rezonatorze lasera wyróżnia się dwa zasadnicze typy modów: *mody osiowe – wzdłużne*, dla których długość optyczna rezonatora jest równa całkowitej wielokrotności połówek długości fal układających się na osi rezonatora oraz *mody poprzeczne*. Mody osiowe różnią się od siebie jedynie wartościami częstotliwości. Różnym modom osiowym odpowiadają natomiast te same rozkłady natężenia pól w przekroju poprzecznym (na przykład na zwierciadle). Mody poprzeczne różnią się między sobą nie tylko częstotliwością, ale również rozkładami pól w przekroju poprzecznym. Do jednego i tego samego modu poprzecznego należy pewna liczba modów osiowych, które różnią się częstotliwościami, ale rozkład pola w płaszczyźnie poprzecznej jest dla wszystkich tych modów jednakowy. Z drugiej strony – do określonego modu osiowego nie są przyporządkowane żadne mody poprzeczne. Jak widzimy rezonator optyczny jest bardzo ważnym elementem, wpływającym w sposób istotny zarówno na skuteczność akcji laserowej, jak i na parametry

which means a small angle of laser beam divergence. The optical resonator also performs a third function, being the ability to excite in the resonator appropriately shaped distributions of electromagnetic field intensity, the so-called *resonator modes*.

There are two basic types of modes in the laser resonator: *axial – longitudinal modes*, for which the optical length of the resonator is equal to an integer multiple of half the wavelengths on the axis of the resonator and *transverse modes*. Axial modes differ only in values of frequency. Various axial modes correspond to the same distributions of fields intensity in cross section (for example on a mirror). Transverse modes differ not only in frequency, but also in the distributions of fields in cross-section. One and the same transverse mode includes a number of axial modes, which differ in frequency, but the distribution of the field in the transverse plane is identical for all these modes. On the other hand - no transverse modes are assigned to a specific axial mode. As can be seen, the optical resonator is a very important element significantly affecting both the effectiveness of lasing and the parameters of the light beam emitted that are of great importance in terms of its practical use.

Laser.indb 98 2015-03-04 13:30:54

emitowanej wiązki świetlnej, jakże istotnych w praktycznym jej wykorzystaniu.

2.2.3.1. Rodzaje rezonatorów optycznych

W dyskusji o wzmocnieniu emisji wymuszonej przyjęto, że zwierciadła rezonatora laserowego są płaskie (płasko-równoległe). Istnieje jednak wiele innych konfiguracji i kształtów zwierciadeł, które oferują większe zalety w porównaniu ze zwierciadłami płaskimi. Kilka przykładowych konfiguracji rezonatorów optycznych przedstawiono na rys. 2.2.4.

Najważniejsze parametry uwzględniane podczas konstruowania rezonatora laserowego to: układ i kształt zwierciadeł, objętość modu i stabilność rezonatora. Objętość modu można zdefiniować, jako część wzbudzonego ośrodka wzmacniającego, z którym oddziałuje wiązka laserowa obiegając rezonator tam i z powrotem w jego wnętrzu. Objętości modów w poszczególnych rodzajach rezonatorów zaznaczono na rys. 2.2.4, jako obszary między cienkimi liniami – skrajnymi promieniami światła w wiązce laserowej. Pojęcie stabilności rezonatora jest związane ze zdolnością utrzymania promieni światła wewnątrz rezonatora po wielu odbiciach między zwierciadłami. Niewielkie odchylenie zwierciadeł od równoległości (np. zwierciadeł płaskich) może powodować, że promień światła „wyjdzie" poza oś re-

2.2.3.1 Types of optical resonators

It was assumed, when discussing the amplification of stimulated emission, that the laser resonator mirrors are plane (plane-parallel). However, there are many other configurations and shapes of mirrors, which offer greater advantages compared to plane mirrors. Several exemplary configuration of optical resonators are shown in fig.2.2.4.

The most important parameters taken into account when designing a laser resonator include the configuration and shape of the mirrors, the volume of the mode and the stability of the resonator. The volume of the mode may be defined as a part of the excited amplifying medium, which interacts with the laser beam going back and forth inside the resonator. The volume of modes in particular types of resonators are marked in fig.2.2.4 as areas between the thin lines - peripherial rays of light in a laser beam. The concept of stability of the resonator is associated with the ability to maintain the rays of light inside the resonator after multiple reflections between the mirrors. A slight deviation of the mirrors from the parallelism (e.g. of plane mirrors) can make a ray of light "go out" beyond the axis of the resonator

Laser.indb 99 2015-03-04 13:30:54

Rys. 2.2.4. *Przykłady różnych konfiguracji zwierciadeł tworzących rezonator optyczny: R1, R2 – promienie krzywizn zwierciadeł Z1, Z2; 1 – układ płasko-równoległy; 2 – zwierciadła o dużym promieniu krzywizny; 3 – układ konfokalny (współogniskowy); 4 – układ sferyczny współśrodkowy - konfokalny; 5 – układ wypukło-wklęsły; 6 – układ hemisferyczny (półkulisty).*

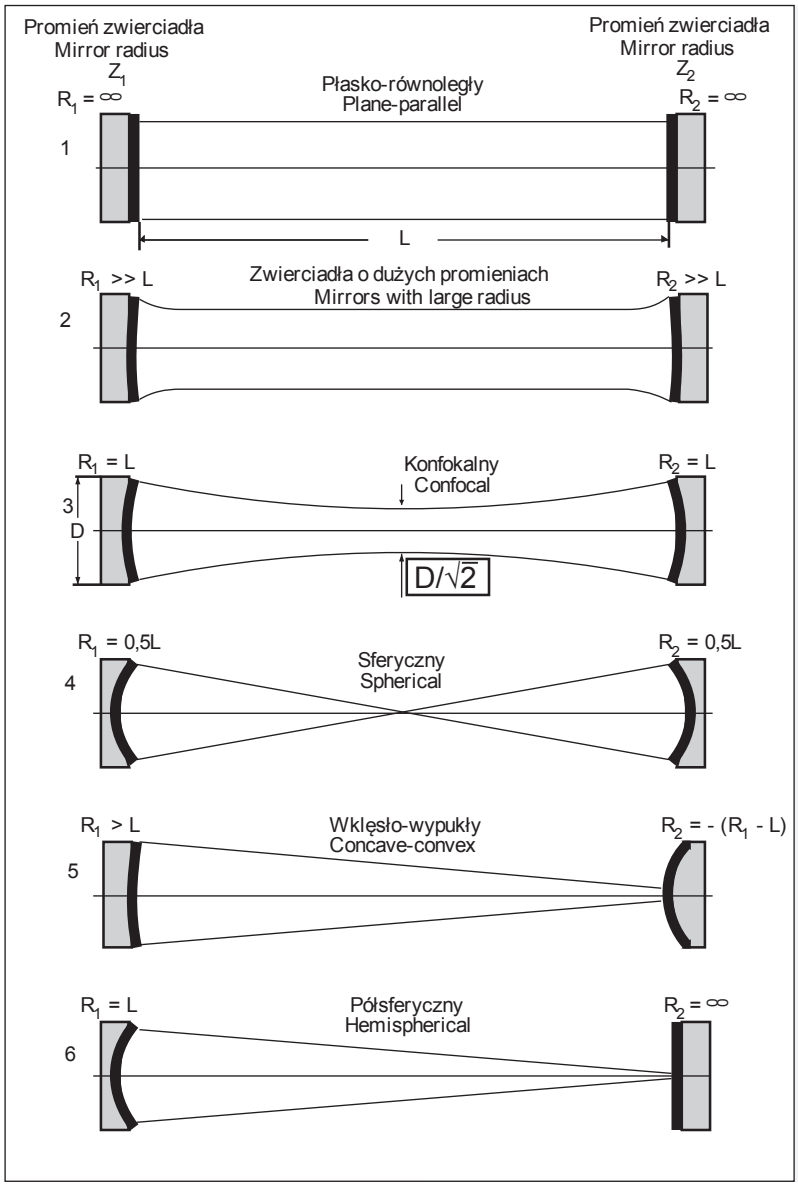


Fig. 2.2.4. *Examples of different configurations of mirrors forming an optical resonator: R1, R2 – radii of mirrors curvatures Z1, Z2; 1 – plane-parallel system; 2 – mirrors with a large curvature radius ; 3 – confocal system; 4 – spherical concentric-confocal system; 5 – convex-concave system; 6 – hemispherical system.*

Laser.indb 100 2015-03-04 13:30:54

zonatora już po kilku odbiciach. Zwierciadła płasko równoległe zapewniają dużą objętość modu, lecz stosunkowo małą stabilność na odbicia. Ponadto układ płaskich zwierciadeł jest trudny w justowaniu – regulacji, ze względu na wysokie wymagania wzajemnej równoległości obu odbijających płaszczyzn – kilka sekund kątowych. Oprócz wysokiej dokładności ich ustawienia wymagana jest również wysoka tolerancja *„płaskości"* ich wykonania. Wadą takiego układu jest duża wrażliwość na wpływy zewnętrzne, a szczególnie na drgania mechaniczne. Stąd zamiast zwierciadeł płasko-równoległych tworzących rezonator, stosuje się często zwierciadła wklęsłe lub układy mieszane, rys. 2.2.4. Znacznie mniej wrażliwy jest układ zwierciadeł wklęsłych, tworzących tzw. układ *konfokalny*, rys. 2.2.4-4. Zwierciadła są tak ustawione względem siebie, że ich ogniska znajdują się we wspólnym punkcie na osi rezonatora. W takim układzie odbijane przez zwierciadła promienie skupiają się wzdłuż osi, utrzymując się stabilnie nawet w warunkach drgań mechanicznych i niewielkich wstrząsów. W porównaniu z układem płasko – płaskim, takie ustawienie zwierciadeł ułatwia i znakomicie upraszcza regulację (justowanie) lasera. Generator laserowy z rezonatorem konfokalnym zwierciadeł jest, praktycznie biorąc, nieczuły na względne „przekoszenie" zwierciadła w granicach do kilku minut kątowych, podczas gdy krytyczna wartość dla lasera z układem płasko-rów-

after only a few reflections. Plane-parallel mirrors provide high mode volume, but relatively little stability to reflections. Furthermore, the plane mirrors system is difficult to adjust - to regulate, due to the high demands on the mutual parallelism of both reflecting surfaces - a few arcseconds. In addition to the high accuracy of their position, high tolerance of the "*flatness*" of their manufacturing is also required. The disadvantage of such a system is high sensitivity to external influences, especially to mechanical vibrations. Thus, instead of plane-parallel mirrors forming the resonator, concave mirrors or mixed systems, fig.2.2.4 are often used. A much less sensitive system uses concave mirrors that form the so-called *confocal* system, shown in fig.2.2.4-4. The mirrors are aligned so that their focal points are located at a common point on the axis of the resonator. In this system, the rays reflected by the mirrors focus along the axis, remaining stable even in case of mechanical vibration and slight impacts. This arrangement of mirrors facilitates and greatly simplifies the regulation (adjustment) of the laser, compared to the plane-plane system. The laser oscillator with confocal resonator is, practically speaking, insensitive to a relative "skewing" of the mirror within a range of a few arcminutes, while the critical value for the laser with a plane-parallel

Laser.indb 101 2015-03-04 13:30:54

noległym wynosi zaledwie kilka sekund kątowych. Widzimy, że kombinacja zwierciadeł sferycznych oferuje wysoką stabilność odbiciową, lecz małą objętość modu. Stabilność rezonatorów optycznych określana jest za pomocą promieni krzywizn zwierciadeł i długości rezonatora. Warunek stabilności, czyli utrzymania promieni światła na osi rezonatora optycznego określa zależność:

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

lub $0 < g_1 \cdot g_2 < 1$, (2.2.8)

gdzie: $g_1 = \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)$, a $g_2 = \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)$.

Warunek ten ogranicza zakres promieni krzywizn zwierciadeł i długości rezonatora, które umożliwiają stabilne zachowanie się promieni wewnątrz rezonatora.

Na rys. 2.2.5 przedstawiono graficznie warunek stabilności (2.2.8) rezonatorów laserowych. Na diagramie stabilności każdy rodzaj rezonatora jest reprezentowany przez jeden punkt. Obydwa omawiane typy rezonatora: płasko-równoległy i konfokalny, są przypadkami granicznymi zacieniowanego zakresu stabilnego. Z kolei na rys. 2.2.6 zilustrowano interpretację stabilnego i niestabilnego zachowania się promienia wewnątrz rezonatorów odpowiednio:

system is only a few arcseconds. We see that a combination of spherical mirrors offers high reflection stability, but a small mode volume. Stability of optical resonators is determined using the radii of mirrors' curvature and the length of the resonator. The stability condition that is to maintain the light rays on the axis of the optical resonator determines the relation:

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1$$

or $0 < g_1 \cdot g_2 < 1$ (2.2.8)

where: $g_1 = \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)$, a $g_2 = \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)$.

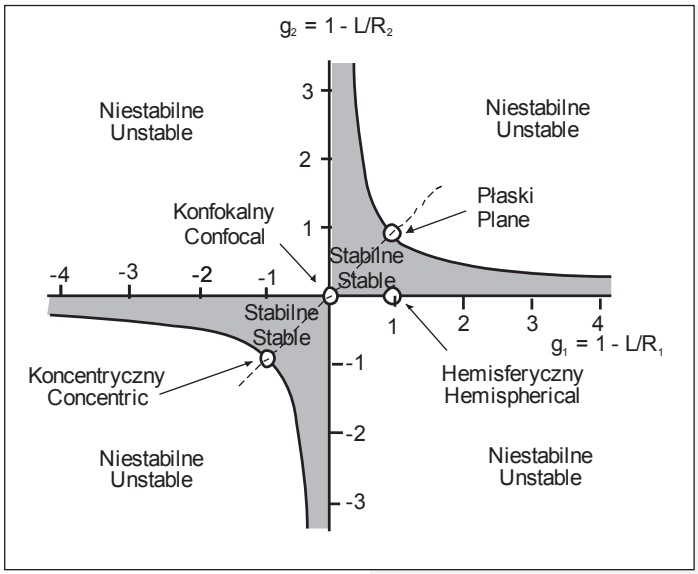
This condition limits the range of the radii of mirrors' curvature and the length of the resonator, which allow for a radiation stability inside the resonator.

Fig.2.2.5 is a graphical illustration of the stability condition (2.2.8) of laser resonators. In the stability diagram, each resonator type is represented by one point. Both types of resonator discussed, the plane-parallel and the confocal one, are limit cases of the darkened stability range. Fig.2.2.6, in turn, illustrates an interpretation of stable and unstable behaviour of the ray inside stable and

Laser.indb 102 2015-03-04 13:30:54

stabilnego i niestabilnego.

Należy zwrócić jeszcze uwagę na ważną klasę rezonatorów tzw. rezonatorów niestabilnych. W tym przypadku wiązka światła wędrująca pomiędzy zwierciadłami oddala się systematycznie od osi rezonatora i po niewielu odbiciach może ona objąć cały obszar rezonatora. W ten sposób można wykorzystać całą objętość ośrodka czynnego, wypełniającego rezonator, w przeciwieństwie do wielu rezonatorów stabilnych, które wyraźnie uprzywilejowują obszar w pobliżu osi, rys. 2.2.6e – linia czerwona. Rezonatory niestabilne stosuje się w przypadku, gdy ośrodek czynny ma duży współczynnik wzmocnienia światła.



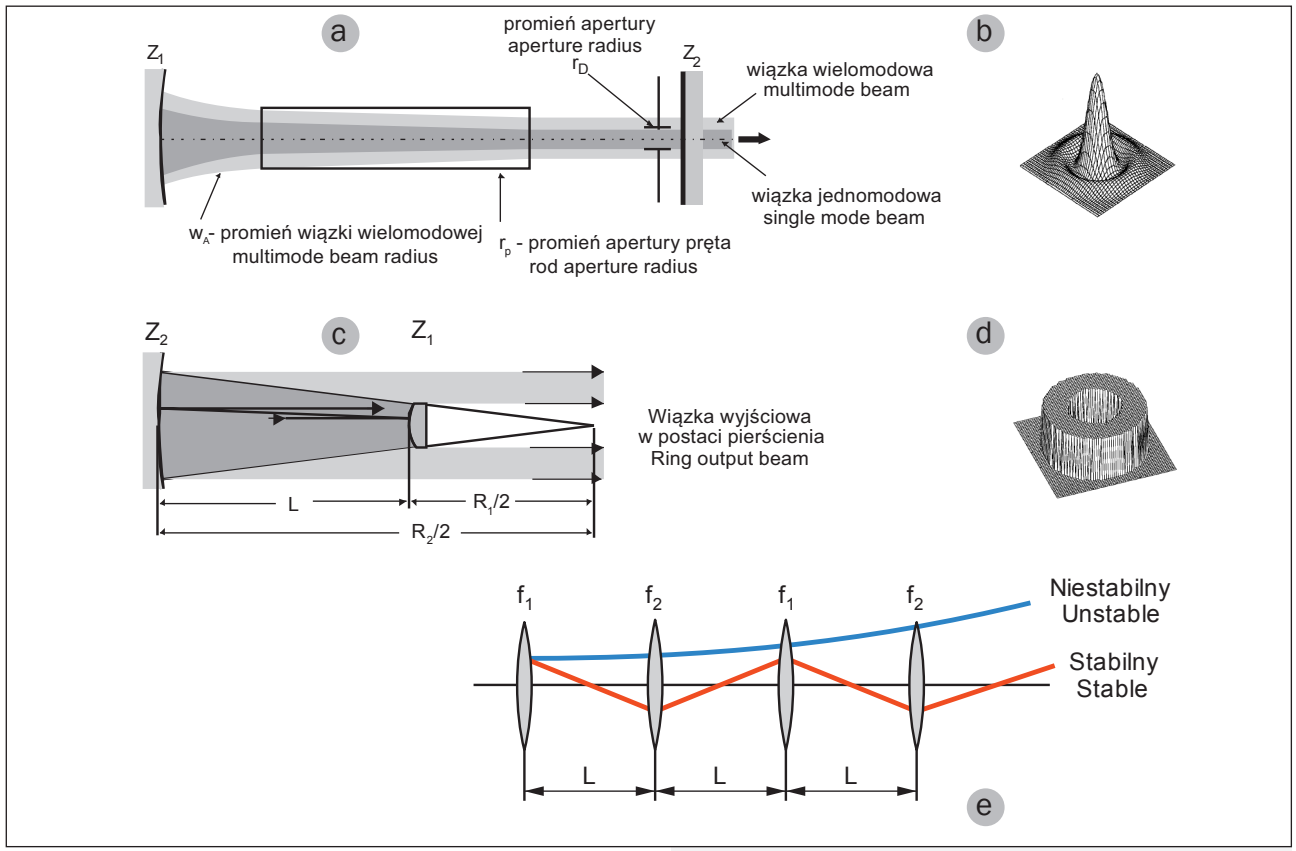
Rys. 2.2.5 *Diagram stabilności. Rezonatory stabilne leżą w obszarze zaciemnionych pól. Rezonatory symetryczne leżą na linii przerywanej nachylonej pod kątem 45°. Na diagramie pokazano również umiejscowienie wielu innych często stosowanych rezonatorów.*

Fig. 2.2.5 *Stability diagram. Stable resonators are within the darkened fields. Symmetrical resonators are on the dotted line inclined at an angle of 45°. The diagram also shows the location of many other commonly used resonators.*

unstable resonators, respectively.

One should not forget an important class of the so-called unstable resonators. In this case, the beam travelling between mirrors systematically moves away from the axis of the resonator and after a few reflections it can cover the entire area of the resonator. Thus, the entire volume of the active medium filling the resonator may be used, as opposed to many stable resonators, which clearly favour the region near the axis, fig.2.2.6e – red line. Unstable resonators are used when the active medium has a high light amplification factor.

Laser.indb 103 2015-03-04 13:30:54



Rys. 2.2.6. *a) – Rezonator stabilny płasko-wklęsły, b) – Rozkład natężenia promieniowania w polu dalekim wiązki jednomodowej TEM_{00}, c) – Rezonator niestabilny typu n – branch, d) – Rozkład natężenia promieniowania w polu bliskim rezonatora niestabilnego, e) – Porównanie zachowania się wiązek światła wędrującej pomiędzy zwierciadłami rezonatorów odpowiednio stabilnego i niestabilnego. W rezonatorze niestabilnym wiązka oddala się systematycznie od osi rezonatora i po niewielu odbiciach może ona objąć cały obszar rezonatora (objętość materiału aktywnego), linia niebieska.*

Fig. 2.2.6. *a) – Stable plano-concave resonator, b) – Distribution of radiation intensity in the far field of single-mode TEM_{00} beam, c) – Unstable n – branch resonator, d) – Distribution of radiation intensity in the near field of an unstable resonator, e) – Comparison of behaviour of light beams travelling between the mirrors of stable and unstable resonators, respectively. In an unstable resonator the beam systematically moves away from the axis of the resonator and after a few reflections it can cover the entire area of the resonator (active material volume), blue line.*

Laser.indb 104 2015-03-04 13:30:54

2.2.3.2. Mody wzdłużne

Promieniowanie wychodzące z lasera jest jednobarwne, a to oznacza, że szerokość linii widma emisji jest bardzo mała. Widmo emisji promieniowania laserowego składa się z bardzo wąskich, dyskretnych linii widmowych, rozseparowanych w niewielkich odległościach, które spełniają warunek rezonansu:

$$L = \frac{q \cdot \lambda}{2}\,, \qquad (2.2.9)$$

gdzie: L jest długością rezonatora, q – liczbą całkowitą, liczbą połówek fal układających się na osi rezonatora, a λ jest długością fali emisji.

Te dyskretne linie emisji nazywają się modami wzdłużnymi, rys. 2.2.7 i są oddalone od siebie w domenie częstotliwości, o:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}\,, \qquad (2.2.10)$$

gdzie: c jest prędkością światła.

Zgodnie z wzorami (2.2.9) i (2.2.10) oraz przyjmując dla przykładu długość rezonatora optycznego L = 10 cm, otrzyma się dla fali własnej $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ cm (światło zielone) ogromną liczbę połówek fal układających się na osi rezonatora równą:

2.2.3.2 Axial modes

The radiation leaving the laser is monochromatic, which means that the width of the emission spectrum lines is very small. The laser radiation emission spectrum consists of very narrow, discrete spectral lines, spaced at small intervals fulfilling the resonance condition:

$$L = \frac{q \cdot \lambda}{2}\,, \qquad (2.2.9)$$

where: L is the resonator length, q – an integer number, the number of half waves on the axis of the resonator, and λ is the emission wavelength.

These discrete emission lines are called longitudinal modes, fig.2.2.7 and are spaced apart in the frequency domain, by:

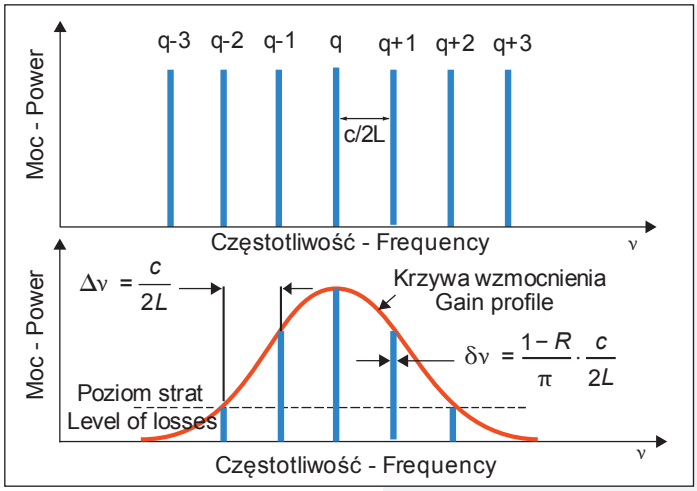
$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}\,, \qquad (2.2.10)$$

where: c is the speed of light.

According to formulas (2.2.9) and (2.2.10), and assuming, for example, the optical resonator length L = 10 cm, we obtain for the resonant wave $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ cm (green light) a huge number of half waves on the resonator axis amounting to: $q = 10^5$! Of course, in the optical

Laser.indb 105 2015-03-04 13:30:54

q = 10^5! Oczywiście, w rezonatorze optycznym podtrzymywane są tylko te rodzaje drgań, które zasilane są energią z emisji materiału aktywnego i mieszczące się w obszarze szerokości linii fluorescencyjnej – linii wzmocnienia (czerwona linia) na rys. 2.2.7. Na rys. 2.2.7, $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$ oznacza odstęp częstotliwościowy między sąsiednimi modami. Szerokość pojedynczej linii widmowej (linii niebieskiej) zależy zasadniczo od współczynnika odbić zwierciadeł.



Rys. 2.2.7. *Górny rysunek: mody własne (wzdłużne) rezonatora optycznego (linie niebieskie). Dolny rysunek, krzywa ciągła widma fluorescencji – wzmocnienia ośrodka aktywnego (linia czerwona): widmo generacji – trzy częstotliwości własne lasera emitowane powyżej progu strat własnych rezonatora.*

Fig. 2.2.7. *Upper figure: longitudinal modes of the optical resonator (blue lines). Lower figure, continuous curve of the fluorescence spectrum - amplification the active medium (red line): generation spectrum - three laser resonant frequencies emitted above the losses threshold of the resonator.*

$$\delta\nu = \frac{1-R}{\pi}\cdot\frac{c}{2L}\,, \qquad (2.2.11)$$

gdzie: $\delta\nu$ – oznacza szerokość połówkową (na połowie wysokości) linii, krzywej rezonansowej) modu.

W laserze rzeczywistym następuje znaczne zawężenie linii emisyjnej, w porównaniu z szero-

resonator only those types of vibration are supported that are powered by energy from the emission of active material and falling within the area of the fluorescent line width - amplification line (red line) in fig.2.2.7. In fig.2.2.7, $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$ means the frequency spacing between adjacent modes. The width of a single spectral line (blue line) basically depends on the coefficient of mirrors' reflections.

$$\delta\nu = \frac{1-R}{\pi}\cdot\frac{c}{2L}\,, \qquad (2.2.11)$$

where: $\delta\nu$ – is a half-width (at half height) of the line, the resonance mode profile.

In the real laser there is a considerable narrowing of the emission line, compared to the width of the fluorescence line of the

Laser.indb 106 2015-03-04 13:30:55

kością linii fluorescencji materiału aktywnego. Zawężenie takie, zaobserwowane na spektrofotometrze było pierwszym dowodem emisji wymuszonej w laserze rubinowym Maimana. Zawężenie linii wynika głównie z charakteru zjawiska emisji wymuszonej będącego podstawą działania lasera, jak również z silnej konkurencji pomiędzy rodzajami drgań podłużnych. Gdy laser pracuje blisko tzw. progu generacji, warunki emisji są wystarczające tylko dla tych rodzajów drgań, których częstotliwości leżą w pobliżu wierzchołka linii widmowej (rys. 2.2.7) fluorescencji (najsilniejsze wzmocnienie). Jeśli z kolei przekroczymy znacznie próg generacji (np. w wyniku zwiększenia mocy pompowania ośrodka aktywnego), wówczas będą generowane jednocześnie wszystkie mody wzdłużne objęte pełną szerokością linii widmowej ośrodka czynnego.

2.2.3.3. Mody poprzeczne

Jeśli dokonamy przekroju poprzecznego wiązki laserowej zauważymy, że istnieją pewne istotne i wyróżnione profile rozkładu intensywności. Profile te to rodzaje drgań własnych rezonatora zwane *modami poprzecznymi*. Charakteryzują one określony rozkład pola elektromagnetycznego w kierunku poprzecznym rezonatora, tj. w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny zwierciadeł, rys. 2.2.8. Mody poprzeczne oznacza się symbolami TEM_{mn} (ang. Transverse Electro-Magnetic),

active material. Such narrowing observed on a spectrophotometer was the first evidence of stimulated emission in Maiman's ruby laser. The narrowing of the line is mainly due to the nature of the phenomenon of stimulated emission on which lasing is based, as well as the strong competition between the types of longitudinal vibrations. When the laser is operating close to the so-called generation threshold, emission conditions are sufficient only for these types of vibrations, the frequencies of which are near the top of the spectral line (fig.2.2.7) of fluorescence (strongest amplification). If, in turn, the generation threshold is significantly exceeded (due to an increase in the pumping power of the active medium), all longitudinal modes will be generated simultaneously that are covered by the full width of the spectral line of the active medium.

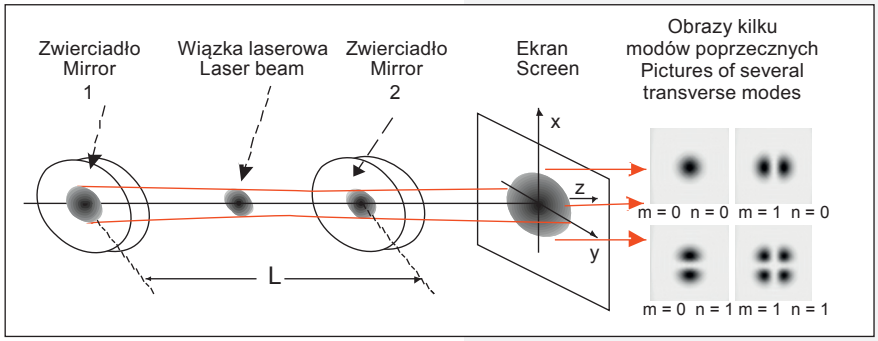
2.2.3.3 Transverse modes

If we cross-section the laser beam, we will notice that there are some significant and distinguished intensity distribution profiles. These profiles are types of the resonator vibration called *transverse modes*. They are characterised by a specific distribution of electromagnetic field in the transverse direction of the resonator, i.e. in

Laser.indb 107 2015-03-04 13:30:55

Indeksy „m" i „n" oznaczają bądź „m" węzłów wzdłuż osi *x* i „n" węzłów wzdłuż osi *y* zwierciadła kwadratowego (lub prostokątnego w ogólnym przypadku), bądź też „p" węzłów wzdłuż współrzędnej azymutalnej, (kątowej), zmieniającej się od 0 do π, oraz „l" węzłów wzdłuż promienia zwierciadła okrągłego.

Na rys. 2.2.9 przedstawiono przykłady rozkładów natężeń pól modów niższych rzędów w prostokątnym i cylindrycznym układzie współrzędnych. Najprostszym modem jest mod podstawowy oznaczany TEM_{00}. Emitowana z lasera wiązka w modzie podstawowym ma rozbieżność dyfrakcyjną, co wydatnie polepsza charakterystykę kierunkową promieniowania.



Rys. 2.2.8. *Rezonator typu „stabilnego" i jego orientacja w stosunku do prostokątnego układu współrzędnych. Oś „z" pokrywa się z osią rezonatora, a „x" i „y" są odległościami mierzonymi w płaszczyźnie prostopadłej do osi rezonatora.*

Fig. 2.2.8. *The "stable" type resonator and its orientation in relation to the rectangular coordinate system. The "z" axis coincides with the axis of the resonator, while "x" and "y" are distances measured in a plane perpendicular to the axis of the resonator.*

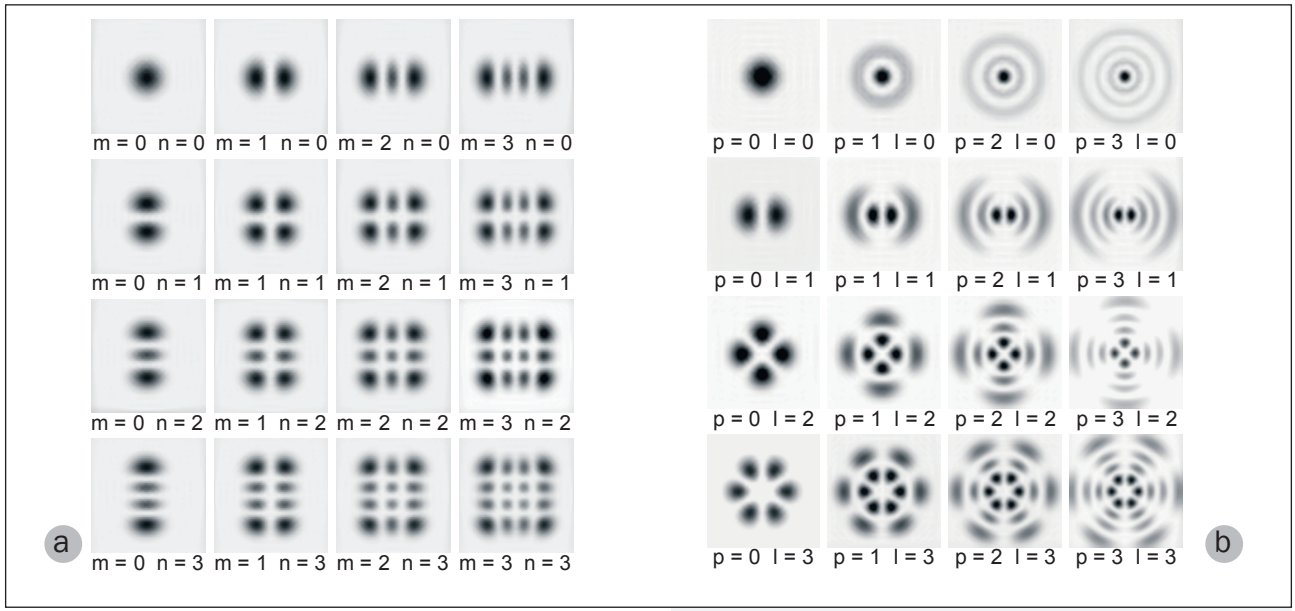
Podstawowy mod poprzeczny, a raczej jego rozkład poprzeczny gęstości energii opisywany jest za pomocą funkcji Gaussa, zilustrowanej na rys. 2.2.10. Rozmia r plamki (lub promień), oznaczany zwyczajowo literą w_0,

a plane parallel to the plane of mirrors, fig.2.2.8. Transverse modes are denoted by TEM_{mn} symbols (Transverse Electro-Magnetic), Indices "m" and "n" mean either "m" nodes along the *x* axis and "n" nodes along the *y* axis of the square (or rectangular in the general case) mirror, or "p" nodes along the azimuthal (angular) coordinate, varying from 0 to π, and "l" nodes along the radius of the circular mirror.

Fig.2.2.9 illustrates examples of field intensity distributions of lower order modes in rectangular and cylindrical coordinate system. The simplest one is the fundamental mode marked as TEM_{00}. In the fundamental mode, the beam emitted from the laser has a diffraction divergence, which greatly improves the directional radiation characteristic.

The fundamental transverse mode, or rather its transverse distribution of the energy density

Laser.indb 108 2015-03-04 13:30:55



Rys. 2.2.9. *Fotografie kilku najprostszych modów poprzecznych lasera gazowego He-Ne: a) – rezonator ze zwierciadłami kwadratowymi i b) – rezonator ze zwierciadłami okrągłymi.*

Fig. 2.2.9. *Photographs of several simplest transverse modes of He-Ne gas laser: a) - resonator with square mirrors and b) - resonator with circular mirrors.*

jest odległością od centrum wiązki do punktu, gdzie natężenie w wiązce spada od wartości I_0 do wartości $I_0 \cdot e^{-2}$, czyli ponad siedem razy. Rozkład intensywności w wiązce Gaussa opisywany jest zależnością:

$$I(r) = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right] \qquad (2.2.11)$$

gdzie: r jest promieniem wiązki, I_0 intensywnością wiązki dla $r = 0$, a w_0 jest promieniem wiązki, dla którego $I = I_0 \cdot e^{-2}$, rys. 2.2.10.

is described by a Gaussian function, illustrated in fig.2.2.10. Spot size (or radius) usually marked with the letter w_0, is the distance from the beam centre to the point where the beam intensity decreases from the value of I_0 to the value of $I_0 \cdot e^{-2}$, that means more than sevenfold. In the Gaussian beam the intensity distribution is described by the equation:

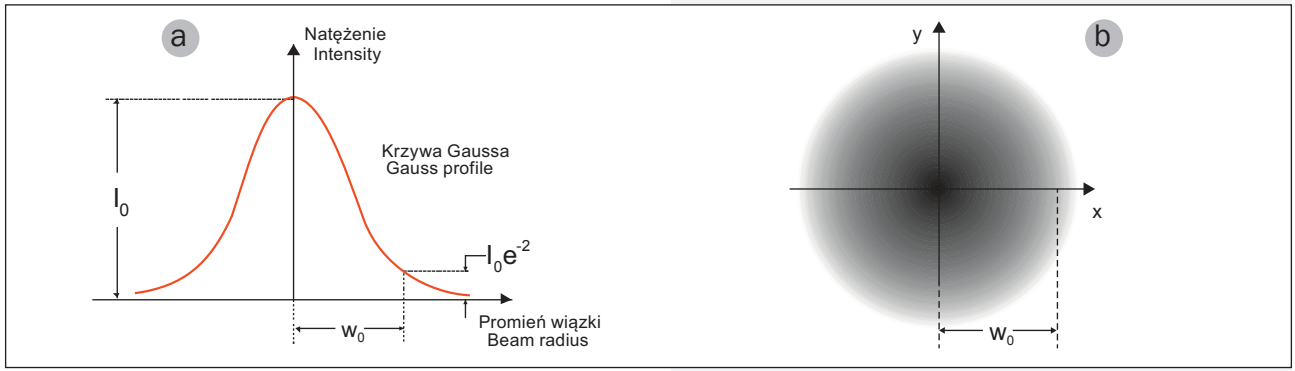
$$I(r) = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2\right] \qquad (2.2.11)$$

Laser.indb 109 2015-03-04 13:30:55

Jakość wiązek laserowych jest często wyrażana za pomocą tzw. współczynnika M^2, który porównuje rozbieżność wiązek laserowych z rozbieżnością idealnej wiązki Gaussa, dla której $M^2 = 1$. Dla modów wyższych rzędów, wartość M^2 jest większa od jedności. Laser (generator laserowy) może pracować w podstawowym modzie poprzecznym, jeśli ograniczymy wzbudzanie się modów wyższego rzędu, wstawiając odpowiedniej średnicy diafragmę do wnętrza rezonatora, rys. 2.2.6a. Promień takiej diafragmy oblicza się z prostej zależności:

$$L \cdot \lambda = a^2, \qquad (2.2.12)$$

gdzie: a – jest promieniem diafragmy, L – jest długością optyczną rezonatora, a λ – emitowaną długością fali.



Rys. 2.2.10. *Gaussowski rozkład gęstości energii modu podstawowego TEM00 w kierunku poprzecznym: a) – kształt krzywej Gaussa, b) – fotografia rozkładu natężenia na papierze fotograficznym.*

where: r is the beam radius, I_0 the beam intensity for $r = 0$, and w_0 is the beam radius, for which $I = I_0 \cdot e^{-2}$, fig.2.2.10.

Fig. 2.2.10. *Gaussian distribution of energy density of the fundamental mode TEM_{00} in the transverse direction: a) – shape of Gaussian profile, b) - the photo illustrating the intensity distribution on photographic paper.*

The quality of laser beams is often expressed by the so-called M^2 coefficient, which compares the divergence of laser beams with perfect Gaussian beam divergence, for which M^2=1. For higher order modes, the value of M^2 is greater than one. Laser (laser oscillator) can work in the fundamental transverse mode, if we limit the excitation of higher order modes by inserting a diaphragm of appropriate diameter inside the resonator, fig.2.2.6a. The radius of such diaphragm is calculated using a simple relation:

$$L \cdot \lambda = a^2, \qquad (2.2.12)$$

Laser.indb 110 2015-03-04 13:30:55

Wiąże się to jednakże z ograniczeniem energii wyjściowej. Zasadniczo, podczas czyszczenia bezcennych obiektów promieniowaniem laserowym, zawsze powinno się stosować jednorodny, płaski, typu „top-hat" rozkład natężenia promieniowania w przekroju poprzecznym wiązki laserowej. Jeśli nie dysponujemy odpowiednim układem optycznym, zapewniającym tego typu rozkład natężenia, pozwalamy generatorowi laserowemu na pracę z maksymalną ilością modów poprzecznych (tzn. pełnym przekrojem pręta laserowego), rys. 2.2.9.

2.3. SYSTEMY PRACY LASERA

2.3.1. BUDOWA LASERA

Laser składa się z trzech elementów: materiału aktywnego – wzmacniającego, zewnętrznego źródła energii lub inaczej pompy wzbudzającej ośrodek aktywny oraz rezonatora optycznego, utworzonego z dwóch równolegle ustawionych zwierciadeł. Podstawowe elementy lasera zilustrowano na rys. 2.3.1.

Rys. 2.3.2 przedstawia widok przekroju poprzecznego przez dwu-eliptyczną głowicę laserową, stosowaną powszechnie w komercyjnych układach laserowych. Pręt laserowy umieszczony jest we wspólnym ognisku obu elips, natomiast

where: a – is the diaphragm radius, L – is the optical resonator length, and λ – emitted wavelength.

However, it is connected with a reduction of output energy. Generally, when cleaning priceless objects using laser radiation, an uniform, flat, "top-hat" distribution of intensity radiation, in the cross-section of the laser beam should always be used. If no suitable optical system is available that provides this type of intensity distribution, we let the laser oscillator work with the maximum number of transverse modes (i.e. using the full cross-section of the laser rod), fig.2.2.9.

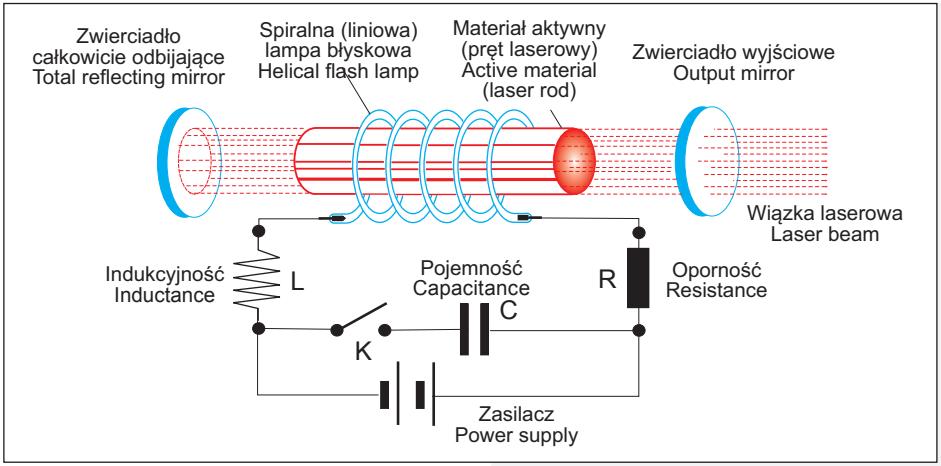
2.3 LASER OPERATION SYSTEMS

2.3.1 LASER CONSTRUCTION

The laser consists of three components: active - amplifying material, external source of energy, or a pump exciting the active medium and the optical resonator, formed by two mirrors set in parallel. The basic components of the laser are shown in fig.2.3.1.

Fig.2.3.2 is a cross sectional view of the bi-elliptical laser head, commonly used in

Laser.indb 111 2015-03-04 13:30:55



Rys. 2.3.1. *Podstawowe elementy lasera odpowiedzialne za: dostarczanie energii do materiału aktywnego (lampa błyskowa wraz z układem zasilania), materiał aktywny realizujący wzmocnienie emisji światła oraz rezonator optyczny – układ dwóch zwierciadeł – odpowiedzialny za sprzężenie zwrotne i wyprowadzenie promieniowania laserowego na zewnątrz.*

Fig. 2.3.1. *The basic components of the laser responsible for providing energy to the active material (flash lamp including the power supply system), active material for the amplification of light emission and the optical resonator - a system of two mirrors - responsible for feedback and directing laser radiation to the outside.*

dwie lampy liniowe, rys. 2.3.3 w pozostałych dwóch ogniskach.

2.3.2. CHARAKTER AKCJI LASEROWEJ

Generalnie na charakter i przebieg akcji laserowej ma wpływ proces pompowania materiału aktywnego. W zależności od charakteru tego procesu, który może być ciągły lub impulsowy, lasery możemy podzielić na dwie kategorie: *lasery ciągłego działania* (ang. cw – continuous wave) lub *lasery impulsowe* (ang. pulse lasers). Praca

commercial laser systems. The laser rod is placed in the common focal point of the two ellipses, while two linear lamps, fig.2.3.3 in the other two focal points.

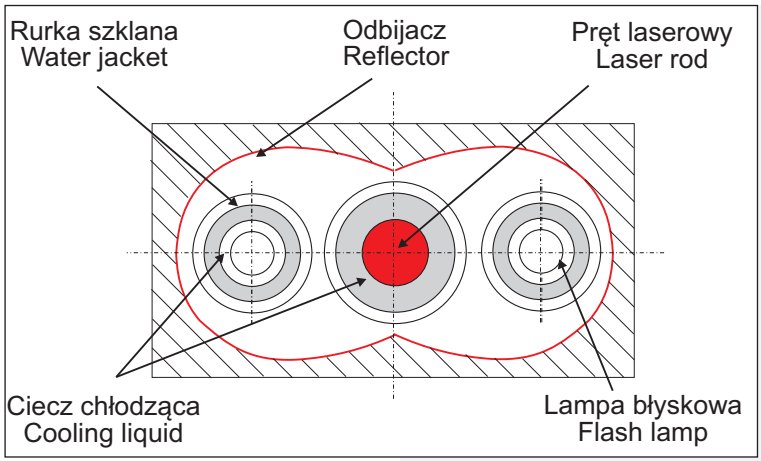
2.3.2 NATURE OF LASING

In general, the process of pumping the active material affects the nature and duration of lasing. Depending on the nature of the process, which may be of continuous or pulse regime, lasers may be divided into two categories: *continuous*

Laser.indb 112 2015-03-04 13:30:56

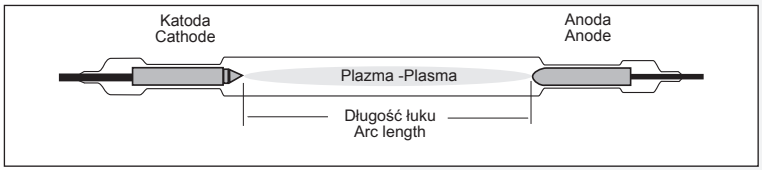
ciągła lasera charakteryzuje się tym, że zarówno inwersja obsadzeń, jak i liczba fotonów w rezonatorze są stałe w czasie. Ciągła emisja nie oznacza, że promieniowanie ma stałe natężenie. W laserze pracującym w sposób ciągły powstają oscylacje relaksacyjne, czyli krótkie impulsy – błyski laserowe (ang. spikes), powtarzające się z wysoką częstotliwością. Inną sytuację obserwujemy, jeśli ośrodek aktywny jest pompowany impulsowo. Podczas impulsowego pompowania liczba wzbudzonych fotonów znacznie przekracza liczbę fotonów, jaką obserwuje się podczas pracy ciągłej. Impulsowy rodzaj pracy generatora laserowego można uzyskać zarówno pompując materiał aktywny w sposób ciągły, jak i impulsowy. Impulsową pracę laserów może uzyskać przez:

- pompowanie impulsowe materiału aktywnego;



Rys. 2.3.2. *Przekrój głowicy laserowej – dwu-eliptycznej.*

Fig. 2.3.2. *The cross-section of the bi-elliptical laser head.*



Rys. 2.3.3. *Typowa konstrukcja lampy błyskowej – łukowej.*

Fig. 2.3.3. *Typical design of a flash - arc lamp.*

wave lasers or *pulse lasers*. In continuous wave lasers both the population inversion and the number of photons in the resonator are constant in time. Continuous emission does not mean that the radiation has a constant intensity. In continuous wave lasers there are continuously produced relaxation oscillations, or short pulses – laser flashes called spikes, repeated at a high frequency. A different situation is observed if the active medium is pumped by pulses. During pulse pumping, the number of excited photons by far exceeds the number of photons observed during continuous operation. Pulsed regime in laser oscillators may be obtained either by pumping the active material in a continuous and pulse manner.

Laser.indb 113 2015-03-04 13:30:56

- pompowanie ciągłe lub impulsowe i jednoczesną modulację dobroci rezonatora, prowadzącą do generacji impulsów gigantycznych;
- pompowanie ciągłe lub impulsowe z jednoczesną synchronizacją modów wzdłużnych rezonatora laserowego.

W pierwszym przypadku, tzw. normalnej generacji swobodnej (ang. free running), czas trwania impulsu laserowego jest nieco krótszy od czasu trwania impulsu pompującego i może wynosić od kilku – kilkudziesięciu μs do kilkudziesięciu ms. W tym miejscu należy zaznaczyć, że w procesie czyszczenia dzieł sztuki wykorzystywane są również impulsy laserowe (generacja swobodna) o czasie trwania od 20 μs do 50 μs. Takie impulsy nazywane są impulsami laserowymi skróconej generacji swobodnej (ang. short free running). W drugim przypadku, impulsowa akcja laserowa osiągana jest w wyniku modulacji dobroci rezonatora (ang. Q – switching). Trzecia z metod, w wyniku synchronizacji modów wzdłużnych lasera (ang. mode locking) prowadzi do generacji ultrakrótkich impulsów, o czasach trwania rzędu pikosekund i krótszych.

Te ostatnie dwa systemy pracy laserów (Q – modulacja i synchronizacja modów) realizowane są głównie w wyniku odpowiedniego sterowania stratami rezonatora. Modulacja dobroci re-

Pulsed laser operation may be achieved by:

- pulse pumping of the active material;
- continuous or pulse pumping and simultaneous modulation of the Q factor of the resonator, leading to the generation of giant pulses;
- continuous or pulse pumping with simultaneous locking of the longitudinal modes of the laser resonator.

In the first case, the so-called normal free running generation, the duration of the laser pulse is a bit shorter than the duration of pumping pulse and it may range from several or several tens of μs to several tens of ms. It should be noted here that there are used in the process of cleaning works of art also laser pulses (free running generation) of the duration from 20 μs to 50 μs. These pulses are called short free running laser pulses. In the second case, the laser pulse action is achieved by modulation of resonator Q factor (Q–switching). The third method, as a result of the mode locking of the laser longitudinal modes leads to the generation of ultrashort pulses with durations of the order of picoseconds and shorter.

The latter two systems of laser operation

Laser.indb 114 2015-03-04 13:30:56

zonatora pozwala na uzyskanie krótkich impulsów laserowych o bardzo dużych mocach szczytowych rzędu 10^8 W (tzw. impulsów gigantycznych lub Q – impulsów), o czasach trwania od 5 ns do 50 ns (1 ns = 10^{-9} s). Z kolei w procesie synchronizacji modów wzdłużnych, laser generuje ciąg równoodległych w czasie impulsów świetlnych, których czas trwania może wynosić nawet od kilku do kilkudziesięciu femtosekund (1 fs = 10^{-15} s).

2.3.2.1 Praca ciągła lasera

Warunkiem ciągłej emisji promieniowania laserowego jest, aby czas życia wzbudzonych atomów na wyższym poziomie laserowym był dłuższy niż ich czas życia na niższym poziomie laserowym. Laser może więc generować promieniowanie tak długo, jak długo utrzymuje się inwersja obsadzeń. W tym celu muszą być spełnione określone warunki. Po pierwsze, należy zapewnić odpowiednio intensywne, ciągłe pompowanie np. optyczne, pochodzące z lampy łukowej. Po drugie, należy skutecznie odprowadzić ciepło z układu oraz z materiału aktywnego – ciała stałego. Lasery o działaniu ciągłym charakteryzują się z zasady czteropoziomową strukturą poziomów energetycznych. Jak już wiemy, taki układ poziomów cechuje niski próg wzbudzenia, co umożliwia pompowanie stosunkowo małą mocą promieniowania optycznego. Najbardziej

(Q-switching and mode locking) are carried out mainly due to appropriate control of the resonator losses. Using resonator Q-switching it is possible to obtain short laser pulses with very high peak power of the order of 10^8 W (the so-called giant pulses or Q-pulses), with durations from 5 ns to 50 ns (1 ns = 10^{-9} s). In turn, in the process of locking longitudinal modes, the laser generates a sequence of light pulses equally spaced in time, the duration of which may be as low as between few and several tens of femtoseconds (1 fs = 10^{-15} s).

2.3.2.1 Continuous laser operation

The condition for cw emission of laser radiation is that the lifetime of the atoms excited to a higher laser level is longer than their lifetime on the lower laser level. The laser can, therefore, generate radiation as long as the population inversion is maintained. Certain conditions need to be met in order to achieve that. Firstly, a sufficiently intense, continuous pumping, for example optical pumping provided by an arc lamp is required. Secondly, the heat must be efficiently transferred from the system and from the active material - a solid. Continuous wave lasers are in general characterised by a four-level energy structure. As we know, such a system of levels is

Laser.indb 115 2015-03-04 13:30:56

rozpowszechnionym i najlepiej opracowanym laserem na ciele stałym jest, jak do tej pory, laser na granacie itrowo-aluminiowym domieszkowany trójwartościowymi jonami neodymu, popularnie zwany laserem na YAG. Współcześnie uzyskiwane moce emisji ciągłej osiągają wartość rzędu kilku kW. Dziś coraz bardziej efektywne i efektowne stają się lasery włóknowe, które zamiast materiału aktywnego w postaci pręta wykorzystują tzw. aktywne światłowody domieszkowane różnymi pierwiastkami ziem rzadkich: Nd, Er, Yb, a uzyskiwane moce, zwłaszcza z lasera Yb ciągłego działania sięgają już wartości kilkudziesięciu kW.

2.3.2.2 Impulsowa praca lasera – generacja swobodna

Uproszczony schemat budowy impulsowego lasera na ciele stałym (rubinowego, neodymowego itp.) przedstawiono na rys. 2.3.1. Pręt laserowy może być otoczony spiralną lampą błyskową (pierwsze konstrukcje) lub obecnie za pomocą jednej lub dwóch lamp liniowych, rys. 2.3.3. Lampa błyskowa zasilana jest z baterii kondensatorów. Pręt laserowy i lampy błyskowe znajdują się w rurkach szklanych lub kwarcowych, wewnątrz których przepływa ciecz chłodząca. Pręt i lampy umieszczone są w obudowie – głowicy laserowej, której powierzchnia wewnętrzna idealnie odbija lub

characterised by low excitation threshold, which allows pumping with a relatively low power of optical radiation. The most common and best developed solid state laser is, so far, the yttrium aluminium garnet laser doped with trivalent neodymium ions, commonly called YAG laser. Nowadays, continuous emission powers reach the order of a few kW. Today, fibre lasers become increasingly efficient and effective, which, instead of the active material in the form of a rod use the so-called active optical fibres doped with various rare earth elements: Nd, Er, Yb, while the power achieved, especially with the Yb continuous wave laser, reaches several tens of kW.

2.3.2.2 Pulsed laser operation- free generation

Simplified construction scheme of the pulse solid-state laser (ruby, neodymium, etc.) is shown in fig.2.3.1. A laser rod may be surrounded by a spiral flash lamp (first designs), or currently using one or two linear lamps, fig.2.3.3. The flash lamp is powered by a capacitor bank. Laser rod and flash lamps are placed in glass or quartz tubes, inside which the coolant flows. The rod and the lamps are disposed in a housing - a laser head, the inner surface of which perfectly reflects or diffuses the light of pumping lamps, fig.2.3.2.

Laser.indb 116 2015-03-04 13:30:56

rozprasza światło lamp pompujących, rys. 2.3.2. Głowica jest przystosowana do obiegu wody chłodzącej, odprowadzającej ciepło zarówno z lamp, jak i z pręta laserowego. Pobudzeniu materiału aktywnego, znajdującego się wewnątrz rezonatora optycznego silnym błyskiem lampy towarzyszą zjawiska omówione wcześniej: absorpcja, emisja spontaniczna i emisja wymuszona. Jeśli doprowadzona do układu energia świetlna lampy przekracza charakterystyczną dla danego lasera wartość progową generacji, nastąpi emisja promieniowania przez zwierciadło transmisyjne, w postaci wiązki światła. Emisja światła laserowego ma charakter impulsowy. Czas trwania impulsu laserowego wynosi od kilkudziesięciu mikrosekund do kilkudziesięciu milisekund i zależy od czasu trwania błysku światła lampy pompującej. Na rys. 2.3.4 przedstawiono oscylogramy przebiegu intensywności emitowanego przez laser Nd:YAG promieniowania w funkcji czasu. Jak widać z przebiegu obu natężeń: światła – od lampy i z akcji laserowej, emisja laserowa pojawia się nieco później.

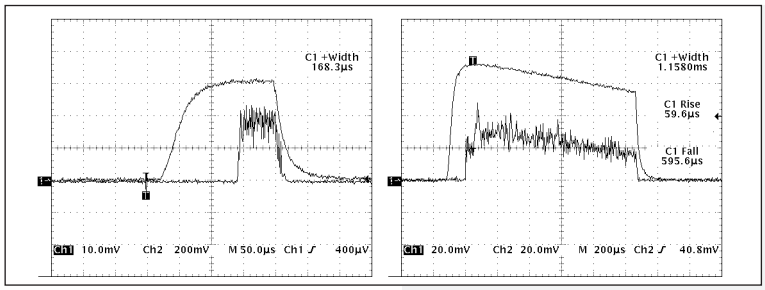
Opóźnienie generacji promieniowania laserowego w stosunku do błysku lampy zależy głównie od mocy światła pompującego i strat własnych generatora. Jeśli moc światła pompującego przekracza znacznie wartość progową generacji, impuls laserowy rozpocznie się wcześniej i z mniej-

The head is adapted for a cooling water circuit, discharging heat from both the lamps and the laser rod. Excitation of the active material inside the optical resonator with a strong flash of the lamp is accompanied by the previously discussed phenomena: absorption, spontaneous emission and stimulated emission. If the light energy of the lamp fed to the system exceeds the generation threshold value characteristic for each laser, emission of radiation through a transmission mirror will take place in the form of a beam of light. The laser light emission is pulsed. The duration of the laser pulse ranges from several tens of microseconds to several tens of milliseconds and depends on the duration of the light flash of the pumping lamp. Fig.2.3.4 presents oscillograms of the radiation intensity emitted by the Nd:YAG laser as a function of time. As you can see from the shape of the two intensities: light - from the lamp and from lasing, the laser emission occurs somewhat later.

The delay in generation of laser radiation in relation to the lamp flash mainly depends on the pumping light power and losses of the generator. If the pumping light power by far exceeds the generation threshold value, the laser pulse starts earlier with smaller delay. Laser action is not a

Laser.indb 117 2015-03-04 13:30:56

szym opóźnieniem. Akcja laserowa nie jest pojedynczym aktem emisji – błyskiem, lecz składa się z całej serii błysków, poczynając od pojedynczego aż nawet do kilku tysięcy. Każdy z tych błysków trwa od kilkuset nanosekund do kilku mikrosekund, rys. 2.3.4. Nieregularne impulsy świetlne (ang. spikes) formują się w wyniku drgań relaksacyjnych powstających w procesie generacji promieniowania laserowego. Generacja takich impulsów wynika z tego, że po pierwszej, intensywnej emisji promieniowania laserowego, obsadzenie poziomu metastabilnego gwałtownie maleje – proces emisji wymuszonej ulega w pewnym sensie zerwaniu. Potrzebny jest zatem pewien krótki odcinek czasu – rzędu kilku mikrosekund, aby znów rozpoczął się proces emisji wymuszonej. Pamiętajmy, że lampa błyskowa działa dalej, obsadzenie poziomu metastabilnego rośnie, a po przekroczeniu progu generacji znów następuje emisja wymuszona, czyli powtórzenie procesu emisyjnego w postaci kolejnego błysku laserowego. Czas rozpoczęcia akcji laserowej, jak również szerokość przerwy



Rys. 2.3.4. *Porównanie oscylogramów przebiegu typowych impulsów pompujących (błysku lampy), górna krzywa i emisji światła laserowego – dolna krzywa, w laserze Nd:YAG.*

Fig. 2.3.4. *Comparison of oscillograms of the typical pumping pulses (flash lamp), the upper profile, and the emission of laser light - the bottom profile, in the Nd:YAG laser.*

single process of emission - a flash, but it consists of a whole series of flashes, ranging from a single one up to several thousands. Each of these flashes lasts from a few hundred nanoseconds to several microseconds, fig.2.3.4. Irregular light pulses called spikes are formed as a result of relaxation oscillation produced in the laser radiation generation process. Generation of such pulses is due to the fact that after the first intense laser radiation emission, population of metastable level decreases rapidly - the process of stimulated emission is, in a way, broken. A short period of time is therefore needed - of the order of a few microseconds, for the process of stimulated emission to restart. Let us not forget that the flash lamp is still working, the population of the metastable level increases, and when the generation threshold is exceeded, there is again the stimulated emission, or the repetition of the emission process in the form of a laser flash. The start time of lasing, as well as the width of the time interval between successive laser

Laser.indb 118 2015-03-04 13:30:56

czasowej między kolejnymi rozbłyskami laserowymi zależy od intensywności pompowania. Im mocniejszy impuls pompujący, tym emisja promieniowania następuje wcześniej, a odległości między rozbłyskami emisji światła laserowego są krótsze.

2.3.2.3 Generacja impulsów gigantycznych – monoimpulsów

W warunkach impulsowej generacji swobodnej, laser rubinowy lub Nd:YAG emituje nieregularny ciąg impulsów o całkowitym czasie trwania od kilkudziesięciu mikrosekund (1 μs = 10^{-6} s) do kilkudziesięciu milisekund (1 ms = 10^{-3} s). Odpowiednio krótkie lub długie impulsy światła lampy pobudzającej dostarczają odpowiednio krótki lub długi impuls laserowy. Czas trwania impulsów pobudzających regulowany jest przez odpowiedni dobór parametrów obwodu rozładowania, rys. 2.3.1, a maksymalna moc emitowanego promieniowania z lasera jest głównie ograniczona mocą pompy i zależy od wielkości strat rezonatora.

W tym podrozdziale omówimy taki sposób pracy lasera, w którym uzyskuje się impulsy o mocy przekraczającej o kilka rzędów moc lasera *konwencjonalnego*, czyli lasera impulsowego pracującego w systemie generacji swobodnej. Idea pracy takiego lasera została zilustrowana na rys. 2.3.5a.

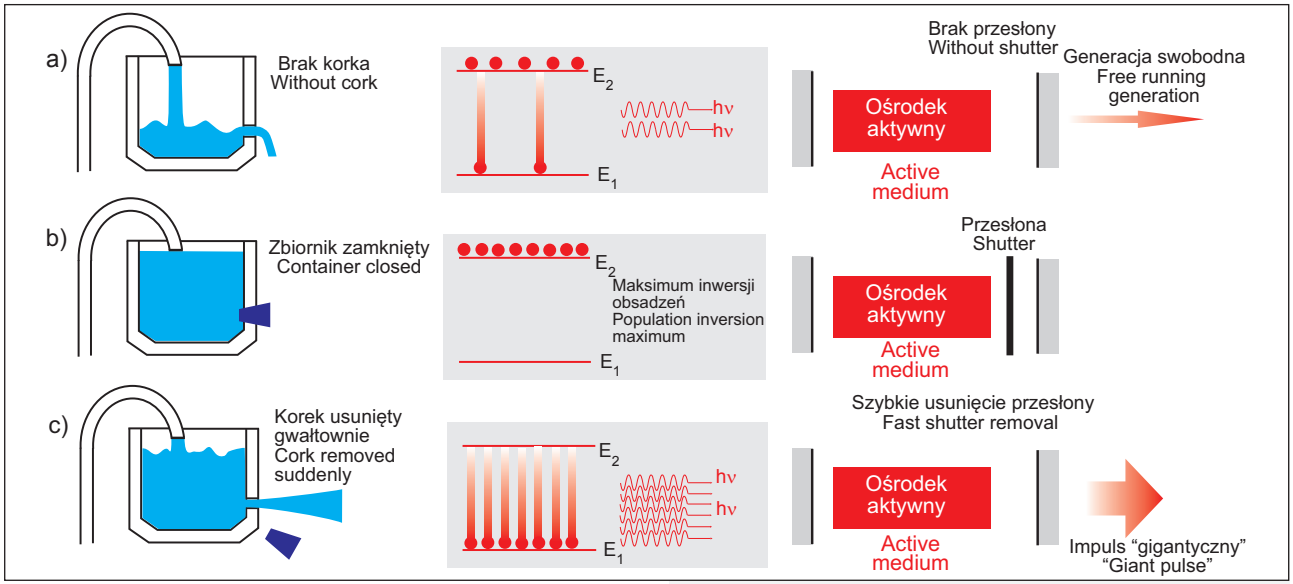
flashes depends on the intensity of pumping. The stronger the pumping pulse, the earlier the radiation emission occurs, and the intervals between the flashes of laser light emission are shorter.

2.3.2.3 Generation of giant pulses - monopulses

Under the conditions of free pulse generation, ruby or Nd:YAG laser emits an irregular series of pulses with the total duration from several tens of microseconds (1 μs = 10^{-6} s) up to several tens of milliseconds (1 ms = 10^{-3} s). Short and long pulses of the exciting lamp light, respectively, provide a short or long laser pulse. The duration of exciting pulses is controlled by properly selected parameters of the discharge circuit, fig.2.3.1, and the maximum power of the laser-emitted radiation is mainly limited by the power of the pump and depends on the amount of resonator losses.

In this section, we discuss a laser operation method allowing for the acquisition of pulses with power exceeding by several orders the power of the *conventional* laser, or a pulse laser operating in the free generation system. The idea of such operation of a laser is illustrated

Laser.indb 119 2015-03-04 13:30:56



Rys. 2.3.5. *Idea generacji impulsów gigantycznych.*

Fig.2.3.5. *The idea of a giant pulse generation.*

Wyobraźmy sobie, że dopływ wody do zbiornika jest zapewniony (pompowanie lampą błyskową), lecz przez otwarty zawór w zbiorniku woda *wycieka* (promieniowanie generacji swobodnej). Aby osiągać większą moc maksymalną, należy zwiększyć energię wyjściową z lasera lub zmniejszyć czas trwania impulsu laserowego przy tej samej energii wyjściowej. Poniżej pokażemy, że jest to możliwe do osiągnięcia, a lasery wytwarzają impulsy o najkrótszych czasach trwania spośród znanych generatorów fal elektromagnetycznych. Generacja monoimpulsowa, najogólniej mówiąc, polega na pompowaniu materiału czynnego przy celowo *zamkniętym* w po-

in fig.2.3.5a. Let us imagine that water supply to the tank is provided (pumping using flash light), but the water is *leaking* through an open valve in the tank (free generation radiation). To achieve a higher maximum power, it is necessary to increase the output power of the laser or to decrease the duration of the laser pulse with the same output energy. It will be shown below that this is possible to achieve, and that lasers produce pulses with the shortest durations among the known electromagnetic wave generators. Monopulse generation, generally speaking, involves pumping the active material

Laser.indb 120 2015-03-04 13:30:56

czątkowej fazie rezonatorze optycznym, przez co pozbawia się układ możliwości generacyjnych – wyciekania promieniowania w postaci generacji swobodnej. Ideę tę zilustrowano na rys. 2.3.5b. Woda doprowadzana do tym razem zamkniętego zbiornika nie ma ujścia. Jest to analogia do gromadzenia się wzbudzonych atomów na poziomie metastabilnym w ośrodku wzmacniającym, a korkiem zamykającym zbiornik w rezonatorze optycznym jest przesłona – szybka migawka, zamknięta w trakcie pompowania lampą błyskową. Dopiero w momencie, kiedy na poziomie metastabilnym znajduje się maksymalna liczba atomów wzbudzonych (maksymalne nagromadzenie energii – pełny zbiornik), następuje przywrócenie pełnej sprawności rezonatora – jego otwarcie, czyli wyjęcie przesłony w sposób natychmiastowy – umownie korka zamykającego zbiornik wodny, rys. 2.3.5c. W wyniku tego następuje niezwykle gwałtowne wyzwolenie całej nagromadzonej energii w postaci bardzo krótkiego impulsu laserowego, trwającego od kilku do kilkudziesięciu nanosekund. Taki impuls laserowy nazywany jest monoimpulsem, impulsem zawężonym, Q – impulsem lub impulsem gigantycznym (ang. giant pulse). To potężne, natychmiastowe wyzwolenie energii w postaci krótkiego impulsu laserowego, niesie ze sobą ogromną moc szczytową rzędu setek megawatów. Metodę jego wytwarzania nazwano metodą modulacji dobroci Q rezonatora optycznego (ang. Q

with the optical resonator deliberately *closed* in the initial phase, thus depriving the system of the generative ability - leakage of radiation in the form of free generation. This idea is illustrated in fig.2.3.5b. Water supplied to a tank that is this time closed has no outlet. This is analogous to the accumulation of excited atoms at the metastable level in the amplifying medium, and the plug to close the tank in the optical resonator is provided in the form of an aperture - a fast shutter, closed during the flash pumping. It is only when there is the maximum number of excited atoms at the metastable level (maximal accumulation of energy - a full tank), full performance of the resonator is restored - its opening, or immediate removal of the cap - the plug closing the water tank, fig.2.3.5c. This results in an extremely sudden release of all the energy stored in a form of a very short laser pulse lasting from a few to several tens of nanoseconds. Such a laser pulse is called monopulse, narrowed pulse, Q - pulse or giant pulse. This powerful, immediate release of energy in the form of a short laser pulse represents an enormous peak power of the order of hundreds of megawatts. The production method of this power was called the optical resonator Q - switching method. The Q-switching method is a method to control the time of monopulse generation, especially for solid-state

Laser.indb 121 2015-03-04 13:30:56

– switching). Metoda modulacji dobroci rezonatora jest sposobem sterowania przebiegiem czasowym generacji monoimpulsowej, zwłaszcza laserów na ciele stałym. Porównanie obu sposobów pracy impulsowej przedstawiono na rys. 2.3.6, a przebiegi oscyloskopowe obu impulsów przedstawiono na rys. 2.3.7.

Takim przełącznikiem dobroci rezonatora, czyli popularną migawką jest element elektrooptyczny, a jego działanie (razem z polaryzatorem i analizatorem światła) polega na przepuszczaniu promieniowania lasera w zależności od wartości przyłożonego do niego napięcia. Jest to innymi słowy urządzenie, w którym wykorzystuje się powstawanie pod wpływem pola elektrycznego podwójnego załamania światła w niektórych substancjach (nitrobenzen, nitrotoluen), czyli zjawisko Kerra lub w kryształach – zjawisko Pockels'a. Taki zespół elektro-optyczny (komórka plus polaryzator), który umieszcza się wewnątrz rezonatora laserowego i synchronizuje się z momentem zapłonu lampy błyskowej, stanowi modulator światła. Wartości napięć przykładanych na elektrody zależą od właściwości użytego ośrodka i długości fali emisji lasera.

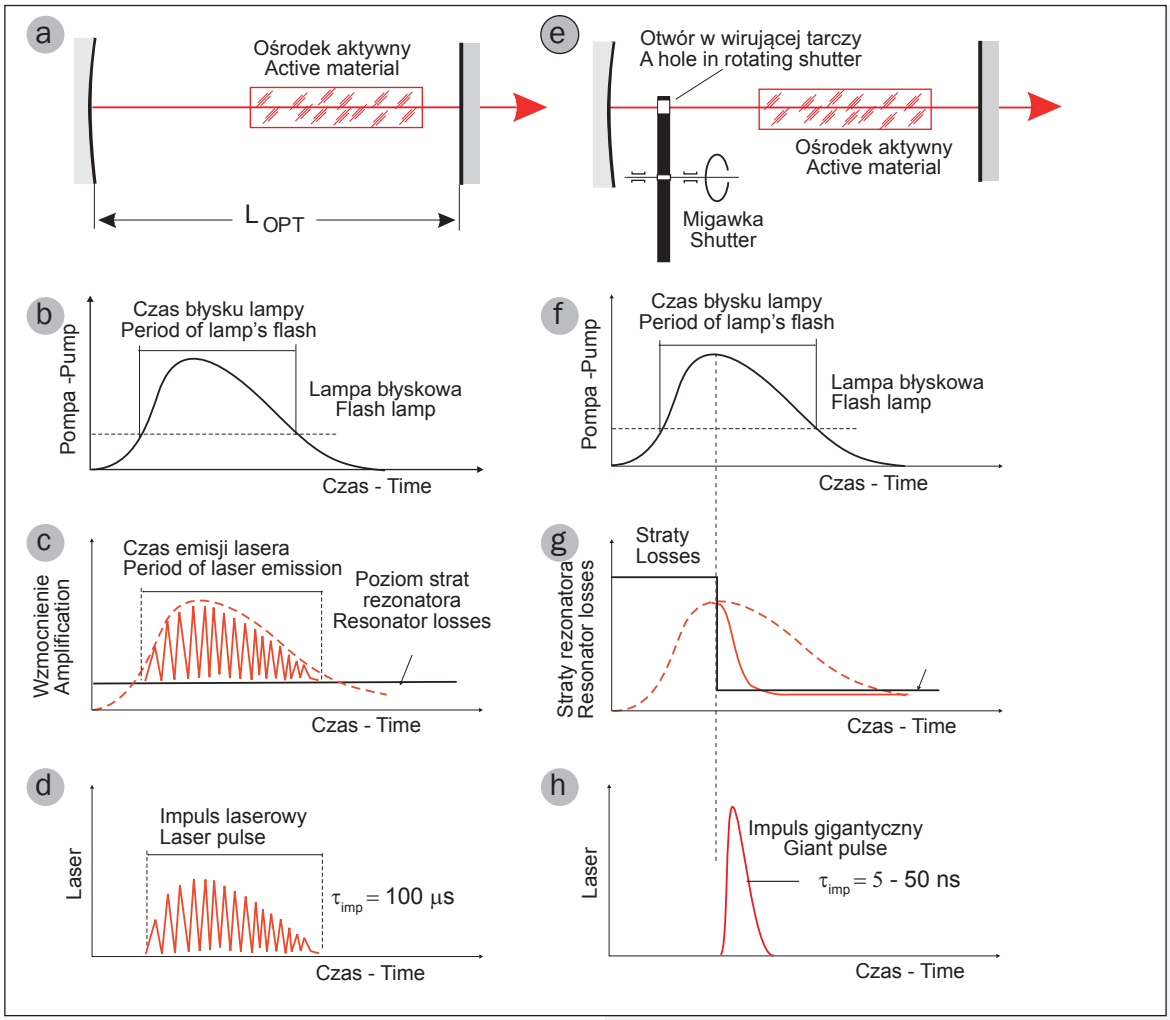
Dzięki małej bezwładności przełączania oraz bardzo szybkiemu przykładaniu napięcia na elektrody poprzez wysokonapięciowe iskierni-

lasers. Comparison of the two methods of pulse operation is shown in fig.2.3.6, and oscilloscope waveforms of the two pulses are shown in fig.2.3.7.

Such resonator Q-switch, or the common shutter, is provided in the form of an electro-optical element, and its operation (including the polariser and the light analyser) consists of passing the laser radiation, depending on the value of the voltage applied to it. In other words, it is a device which uses the birefringence (birefraction of light) produced in some substances (nitrobenzene, nitrotoluene) as a result of an electric field, or the Kerr effect, or in crystals - the Pockel's effect. This electro-optical system (a cell and a polariser), which is placed inside the laser resonator and synchronised with the moment of ignition of the flash lamp is a light modulator. The voltages applied to the electrodes depend on the properties of the medium used and on the laser emission wavelength.

With low switching inertia and very fast voltage delivery to the electrodes through high-voltage spark gaps, the Q switching times obtained are of the order of single nanoseconds, thus making this technique one of the fastest, fig.2.3.8.

Laser.indb 122 2015-03-04 13:30:56

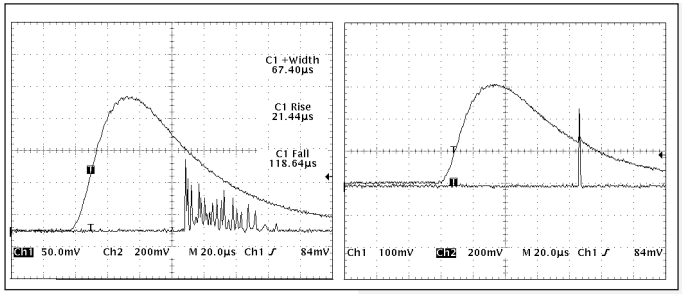


Rys. 2.3.6. *Porównanie procesu generacji impulsu laserowego: od a) do d) – generacja swobodna (free running); od e) do h) – generacja impulsu gigantycznego (Q-switching). Korkiem zamykającym zbiornik jest tu wirująca diafragma z otworkiem.*

Fig. 2.3.6. *Comparison of the laser pulse generation process: from a) to d) - free running generation; from e) to h) - giant pulse generation (Q-switching). Here, the plug closing the tank is provided in the form of a spinning pinhole diaphragm.*

Laser.indb 123 2015-03-04 13:30:56

ki, uzyskiwane czasy przełączania dobroci są rzędu pojedynczych nanosekund, co czyni tę technikę jedną z najszybszych, rys. 2.3.8.

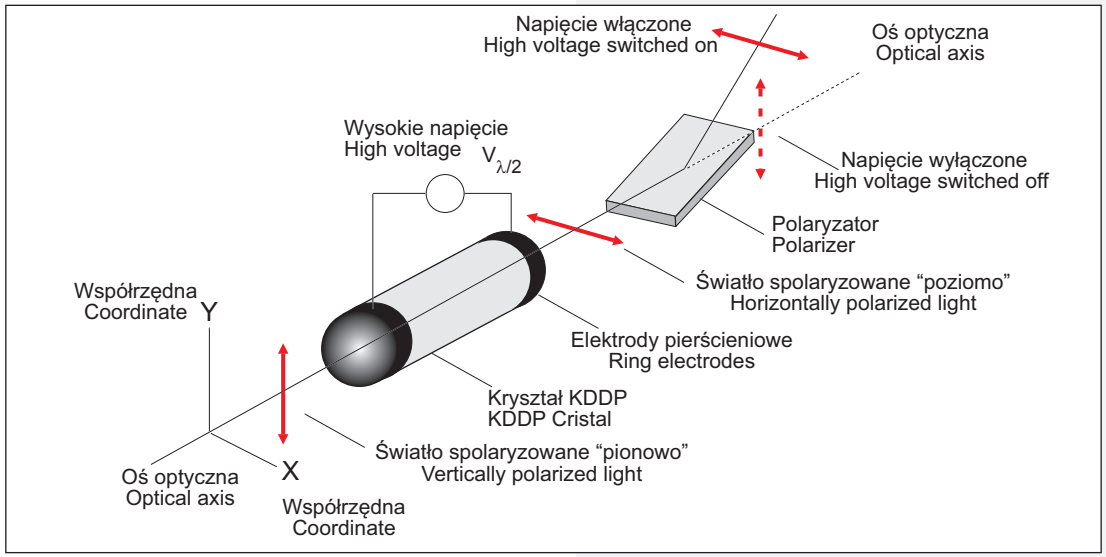


Rys. 2.3.7. *Oscylogramy impulsów swobodnej generacji i generacji monoimpulsowej. Należy zwrócić uwagę na skalę czasu.*

Fig. 2.3.7. *Oscillograms of free running and monopulse generation. Attention should be paid to the time scale.*

Kiedy spolaryzowane światło przechodzi przez odpowiednio zasilany i zorientowany kryształ, rys. 2.3.8, płaszczyzna polaryzacji obróci się o 90°. W tym przypadku wiązka odbije się – linia ciągła,

When polarised light passes through properly supplied and oriented crystal, fig.2.3.8, the polarisation plane will rotate by 90°. In this case, the beam will be reflected - the continuous line, from the polariser plane (e.g. dielectric one) and will be excluded from the original propagation direction - the dotted line.



Rys. 2.3.8. *Ilustracja działania przełącznika elektrooptycznego opartego o efekt Pockelsa.*

Fig. 2.3.8. *Illustration of the operation of an electro-optical switch based on the Pockels effect.*

Laser.indb 124 2015-03-04 13:30:56

od płaszczyzny polaryzatora (np. dielektrycznego) i zostanie wyłączona z pierwotnego kierunku propagacji – linia przerywana.

2.3.3. PORÓWNANIE GENERACJI SWOBODNEJ I MONOMPULSOWEJ

Reasumując należy powiedzieć, że przywrócenie pełnej dobroci rezonatora lasera w chwili, gdy ośrodek wzmacniający osiąga maksymalny stopień wzbudzenia, powoduje generację krótkiego impulsu świetlnego o dużej intensywności. W warunkach generacji impulsu gigantycznego następuje jednak zmniejszenie emitowanej energii. W komercyjnie dostępnych dziś laserach np. w oparciu o kryształ Nd:YAG, obserwuje się zwykle kilkudziesięcioprocentowe zmniejszenie tej energii w porównaniu z emisją lasera bez zmiany dobroci rezonatora. Skrócenie czasu emisji jest jednak tak duże, że moc impulsu gigantycznego wzrasta do wartości rzędu dziesiątek i setek MW. Dla lasera Nd:YAG relacje te przedstawiają się następująco:
Laser pracujący w warunkach generacji swobodnej:

- czas trwania impulsu t_{imp} = 200 μs,
- energia wyjściowa E_{wyj} = 1,0 J,
- moc szczytowa impulsu P_L = 5 kW,

Laser z impulsem gigantycznym:

- czas trwania impulsu t_{imp} = 5 ns,
- energia wyjściowa E_{wyj} = 0,5 J,

2.3.3 COMPARISON OF FREE RUNNING AND MONOPULSE GENERATION

Summarizing, the restoration of full Q-factor of the laser resonator when the amplifying medium reaches the maximum excitation level causes the generation of short high-intensity light pulse. Under the conditions of giant pulse generation, however, reduction in the power emitted occurs. In lasers that are commercially available today, for example based on the Nd: YAG crystal, typically a reduction of several dozen per cent in this energy is observed compared to the laser emission without changing the resonator Q-factor. Shortening the emission time is so large, however, that the giant pulse power is increased to a value of the order of tens and hundreds of MW. For the Nd: YAG laser, the relationship is as follows:
Laser operating under the conditions of free running generation:

- pulse duration t_{imp} = 200 μs,
- output energy E_{wyj} = 1,0 J,
- pulse peak power P_L = 5 kW,

Giant pulse laser:

- pulse duration t_{imp} = 5 ns,
- output energy E_{wyj} = 0,5 J,
- pulse peak power P_L = 100 MW.

Laser.indb 125 2015-03-04 13:30:56

- moc szczytowa impulsu P_L = 100 MW.

Z porównania laserów pracujących w dwóch systemach pracy można wnioskować, że najważniejsze przyczyny spadku emitowanej energii spowodowane są następującymi czynnikami:

- ośrodek czynny znajduje się stanie maksymalnego wzbudzenia (maksymalnej inwersji), a więc pochłania mniej światła ze źródła pompującego,
- nastąpiło wprowadzenie przełącznika w celu zmiany dobroci rezonatora, który wnosi pewne straty do układu; stąd dobroć rezonatora dodatkowo maleje,
- depopulacja poziomu laserowego ośrodka czynnego nie jest całkowita.

2.3.4 GENERACJA IMPULSÓW PIKO- I FEMTOSEKUNDOWYCH

W celu uzyskania superkrótkich impulsów laserowych rzędu pikosekund i krótszych, wykorzystuje się metodę synchronizacji modów wzdłużnych rezonatora laserowego. Jak wiemy laser wytwarza promieniowanie o kilku różnych długościach fali (częstotliwościach). Zależy to od charakterystyki wnęki rezonansowej, a w szczególności od liczby połówek fali, które mogą zostać uwięzione pomiędzy dwoma zwierciadłami (mody wzdłużne rezona-

A comparison of lasers operating in the two described operating systems leads to the conclusion that the main reasons for the decrease of the energy emitted are caused by the following factors:

- the active medium is in the state of maximum excitation (maximum inversion), so that it absorbs less light from the pumping source,
- a *switch* was activated in order to change the Q-factor of the resonator, which brings some losses to the system; thus leading to a further decrease in the Q-factor of the resonator,
- depopulation of the laser level of the active medium is not complete.

2.3.4 GENERATION OF PICO- AND FEMTOSECOND PULSES

In order to obtain ultrashort laser pulses of the order of picoseconds and shorter, a method of locking longitudinal modes of the laser resonator is used. It is well known that the laser produces a radiation of several various wavelengths (frequencies). This depends on the characteristics of the resonant cavity, in particular on the number of half waves that may

Laser.indb 126 2015-03-04 13:30:56

tora). Częstotliwości modów wzdłużnych różnią się od siebie o wielokrotność $c/2L$ (co można wywnioskować z równania (2.2.9), podstawiając $\nu = c/2L$. Zwykle fazy tych modów są względem siebie dość przypadkowe, lecz można je zsynchronizować, Zachodząca wówczas interferencja powoduje powstanie serii ostrych impulsów, a energia lasera uwalniana jest w postaci bardzo intensywnych rozbłysków o czasie trwania pikosekund i krócej, rys. 2.3.9b. Tego rodzaju sposób pracy generatora realizowany jest przez periodyczne zmiany współczynnika dobroci Q rezonatora z ogromną częstotliwością, równą $\nu = c/2L$. Takie periodyczne zmiany współczynnika dobroci Q można wyobrazić sobie jako otwieranie bardzo szybkiej migawki, w sposób zsynchronizowany z czasem przelotu fotonów tam i z powrotem wewnątrz rezonatora (między zwierciadłami). Jeśli czas otwarcia takiej migawki jest wystarczająco krótki, wzmacniane będą jedynie te grupy fotonów, którym przelot zajmie tyle właśnie czasu. Z reguły taka superszybka „migawka" umieszczana jest przy zwierciadle całkowicie odbijającym. Taką modulację można realizować w sposób aktywny i pasywny.

Najprostsza jest metoda pasywna, w której wykorzystuje się np. nieliniowy absorber umieszczany w rezonatorze laserowym, rys. 2.3.9a. W wyniku spontanicznych fluktuacji intensywności

be trapped between two mirrors (longitudinal modes of the resonator). The frequencies of the longitudinal modes differ from each other by a multiple $c/2L$ (which can be inferred from the equation (2.2.9), substituting $\nu = c/2L$. Typically, phases of these modes are rather random in relation to each other, but they can be synchronised. The interference which then occurs gives rise to a series of sharp pulses, and the laser energy is released in the form of very intense flashes lasting picoseconds or less, fig.2.3.9b. This kind of operation of the oscillator is carried out by periodic changes in the Q-factor of the resonator with great frequency, amounting to $\nu = c/2L$. Such periodic changes in the Q-factor may be compared to opening a very fast shutter, in a manner synchronised with the time of transfer of photons back and forth inside the resonator (between the mirrors). If the opening time of such shutter is sufficiently short, only the photons with a transfer taking exactly that time will be amplified. As a rule, such a super-fast „shutter" is placed at the fully reflective mirror. This switching may be carried out actively and passively.

The simplest method is the passive one, using for example a non-linear absorber placed in the laser resonator, fig.2.3.9a. As a result

Laser.indb 127 2015-03-04 13:30:56

światła wewnątrz rezonatora (barwnik ma swoją transmisję początkową), tylko te impulsy, które posiadają odpowiednią intensywność, prześwietlą barwnik. Impulsy o małej intensywności są pochłaniane. Z chwilą przybycia silnego impulsu po odbiciu od zwierciadła wyjściowego i wzmocnieniu w ośrodku, barwnik prześwietla się samoczynnie – osiągając stan nasycenia. Natychmiast potem barwnik ponownie absorbuje promieniowanie, by później znów się „wybielić", gdy tylko powraca silny impuls odbity od zwierciadła znajdującego się na drugim końcu rezonatora, wywołując jego nasycenie. W ten sposób pewna określona grupa fotonów, mająca odpowiednią intensywność promieniowania, może stymulować periodyczne prześwietlanie absorbera w rezonatorze laserowym. Cały proces prześwietlania nieliniowego absorbera przez impuls laserowy i ponownego wzmacniania jest procesem cyklicznym. Budowę takiego generatora emitującego impulsy pikosekundowe przedstawiono na rys. 2.3.9.

Impulsy pikosekundowe generowane są w odstępach czasu równych podwojonemu czasowi przebiegu światła przez rezonator, rys. 2.3.9b – zdjęcie.

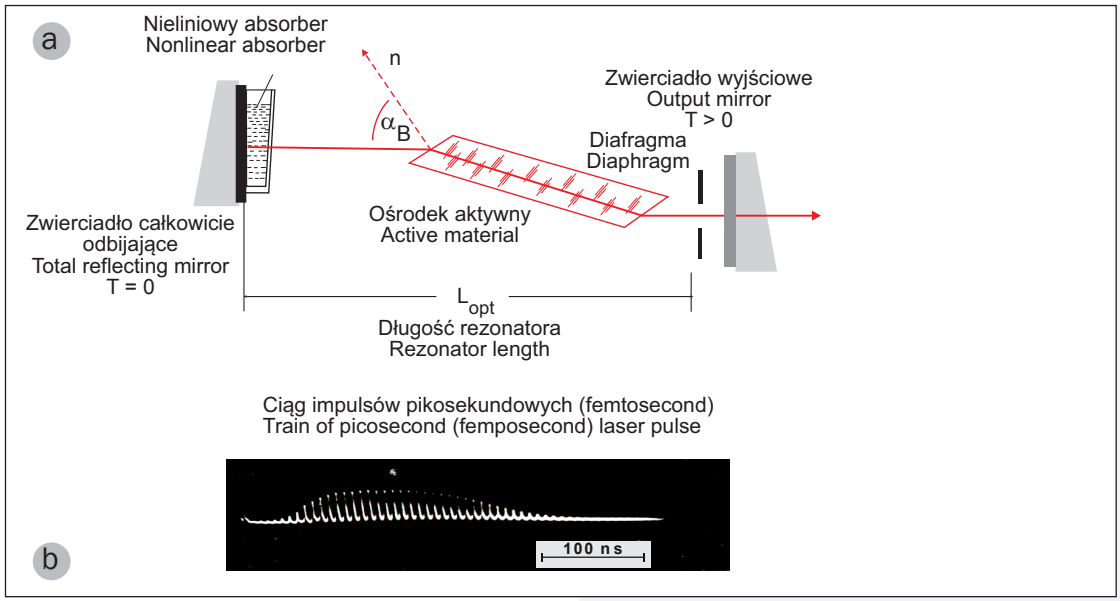
$$T = \frac{2L_{opt}}{c} \quad , \qquad (2.3.1)$$

of spontaneous fluctuations in light intensity inside the resonator (the dye has its initial transmission), only the pulses that have the appropriate intensity will overexpose the dye. Low-intensity pulses are absorbed. With the arrival of a strong pulse after reflection from the output mirror and amplification in the medium, the dye overexposes spontaneously - reaching the saturation point. Immediately thereafter, the dye absorbs radiation in order to „whiten" again as soon as a strong pulse reflected from the mirror located at the other end of the resonator returns, leading to its saturation. In this way, a specific group of photons with the desired intensity of radiation can stimulate the periodic bleaching of the absorber in the laser resonator. The whole process of bleaching a nonlinear absorber by the laser pulse and repeated amplification is periodical. The construction of such a generator emitting picosecond pulses is shown in fig.2.3.9.

Picosecond pulses are generated at intervals equal to twice the time of light propagating through the resonator, fig.2.3.9b - photo.

$$T = \frac{2L_{opt}}{c} \quad , \qquad (2.3.1)$$

Laser.indb 128 2015-03-04 13:30:56



Rys. 2.3.9. *a) – Ilustracja układu optycznego pasywnej synchronizacji modów (passive mode-locking) oraz b) – Zarejestrowany na kliszy fotograficznej oscylogram ciągu impulsów pikosekundowych wyemitowanych z generatora.*

Fig. 2.3.9. *a) - Illustration of a passive mode-locking optical system; b) - Oscillogram of a series of picosecond pulses emitted by the generator recorded on photographic film.*

W pasywnej metodzie synchronizacji modów wykorzystać możemy również nieliniowe zachowanie się współczynnika załamania ośrodka pod wpływem odpowiednio wysokiego natężenia pola elektrycznego fali świetlnej. Zjawisko to nazywane jest optycznym zjawiskiem Kerra. Zmiana współczynnika załamania ośrodka pod wpływem natężenia fali świetlnej prowadzi do zmiany kierunku propagacji promienia świetlnego. Jeśli rozkład natężenia wiązki laserowej w przekroju poprzecznym

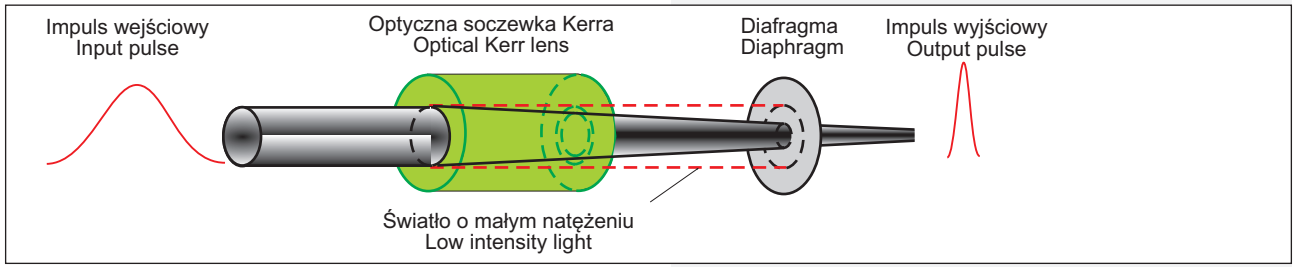
The passive method of mode locking may also involve non-linear behaviour of the medium refractivity under the influence of a sufficiently high electric field intensity of the light wave. This phenomenon is called optical Kerr effect. The change in the refractivity of the medium under the influence of the intensity of the light wave leads to a change in the direction of propagation of the light ray. If the distribution of the laser beam intensity in cross-section is Gaussian, the

Laser.indb 129 2015-03-04 13:30:57

jest w postaci rozkładu Gaussa, to najsilniejsza zmiana współczynnika załamania wystąpi na osi tej wiązki. Taki ośrodek będzie zachowywał się jak soczewka skupiająca, (Kerr Lens Modelocking – KLM), rys. 2.3.10 i będzie modulował natężenie fali świetlnej z ogromną częstotliwością, charakterystyczną dla danego ośrodka.

largest refractivity change will occur on the beam axis. Such a medium will act as a focusing lens, fig.2.3.10 and will modulate the intensity of the light wave with great frequency characteristic for a given medium (Kerr-Lens Modelocking - KLM).

Since the beam intensity is greatest on its axis, thence a greater medium refractivity will



Rys. 2.3.10. *Ilustracja zmiany kierunku propagacji wiązki laserowej pod wpływem zmiany współczynnika załamania ośrodka nieliniowego – optyczne zjawisko Kerra.*

Fig. 2.3.10. *Illustration of change in the direction of propagation of the laser beam resulting from the change in the refractivity of the non-linear medium - optical Kerr effect.*

Ponieważ natężenie wiązki jest największe na jej osi, stąd zostanie wyindukowany większy współczynnik załamania ośrodka. Z kolei większy współczynnik załamania ośrodka na osi wiązki spowoduje, że promienie oddalone od środka wiązki będą załamywać się w kierunku do osi, w kierunku większego współczynnika załamania. Załamane symetrycznie promienie przejdą więc przez maleńką diafragmę.

be induced. The greater refractivity on the axis of the beam makes, in turn, the rays that are far from the centre of the beam will be refracted toward the axis in the direction of greater refractivity. Thus, symmetrically refracted rays will again pass through the tiny diaphragm.

Histogram of generation of ultrashort laser light pulses since the origin of lasers is shown in fig.2.3.11.

Laser.indb 130 2015-03-04 13:30:57

Histogram generacji i wytwarzania superkrótkich impulsów światła laserowego od początku powstania laserów pokazano na rys. 2.3.11.

2.3.5. JAK KRÓTKA JEST FEMTOSEKUNDA?

1 sekunda

Jedna sekunda – przedział czasu powszechnie spotykany w życiu codziennym – nie robi na nas specjalnego wrażenia. Nie jest również specjalnie trudno wytworzyć jednosekundowy impuls światła – wystarczy np. szybko włączyć i wyłączyć żarówkę. Trudniej sobie natomiast wyobrazić dystans, jaki światło przebiega w ciągu 1 s – ok. ¾ odległości od Ziemi do Księżyca.

1/30 s

Jedna trzydziesta część sekundy jest najkrótszym czasem, w którym oko ludzkie potrafi zareagować na impuls świetlny. Spotykamy się z takimi czasami ,na co dzień, oglądając telewizję czy chodząc do kina: pojedyncze obrazy (klatki) wyświetlane w czasie 1/30 s dają wrażenie ciągłego ruchu. W czasie 1/30 s światło przebywa dystans ok. 10000 km. Można powiedzieć, że w „mgnieniu oka" impuls światła wysłany z Warszawy znajdzie się w Tokio.

2.3.5 HOW SHORT IS A FEMTOSECOND?

1 second

One second - time interval common in everyday life - does not really impress us. It is also quite easy to produce a one-second pulse of light - it is enough for example to quickly turn on and off a light bulb. It is more difficult, though, to imagine the distance covered by light within 1 sec - approx. ¾ of the distance from the Earth to the Moon.

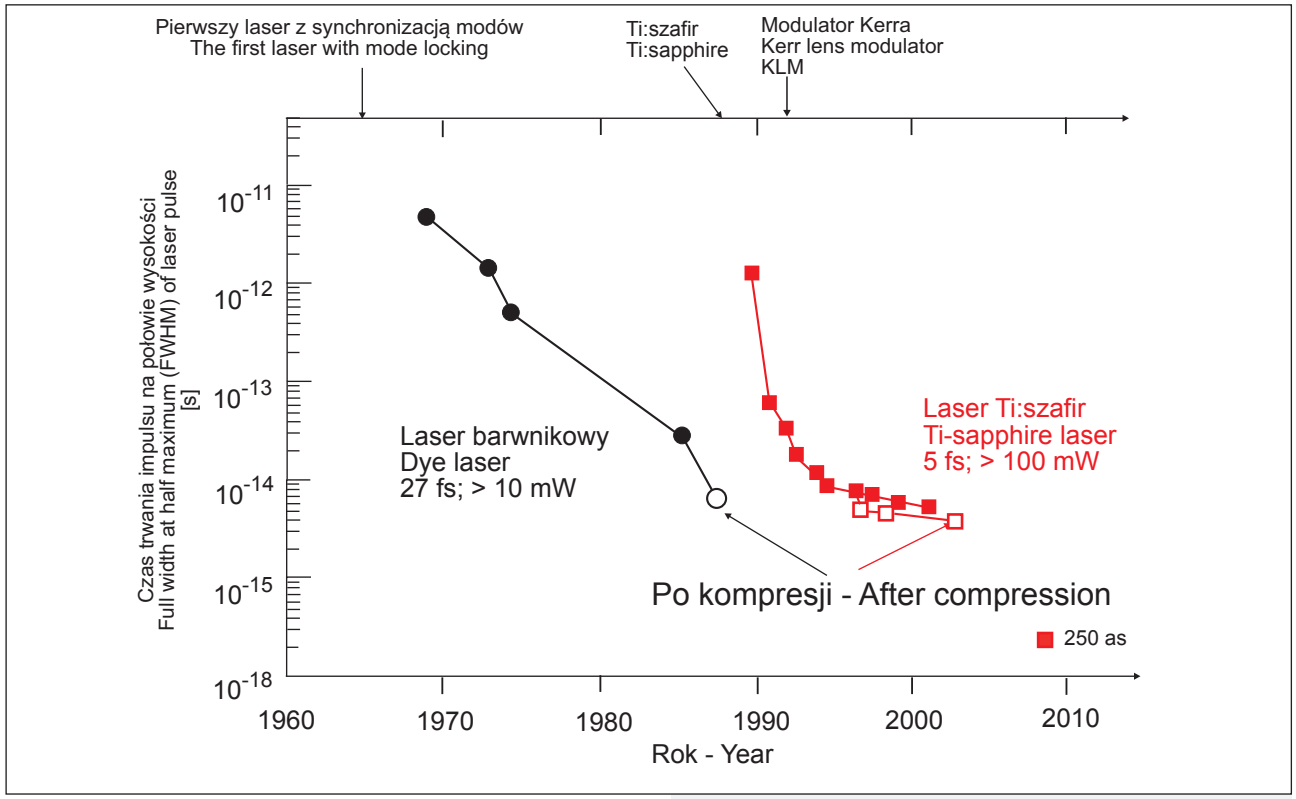
1/30 sec

One thirtieth of a second is the shortest time in which the human eye is able to respond to a light pulse. We encounter such durations every day, watching TV or going to the cinema: single images (frames) displayed for 1/30 sec give the impression of continuous movement. During 1/30 sec, light covers the distance of approx. 10000 km. You could say that "in the blink of an eye", a pulse of light sent from Warsaw will get to Tokyo.

1 microsecond ($1\ \mu s = 1 \cdot 10^{-6}$ sec)

One microsecond is one millionth of a second. Such times are also present in

Laser.indb 131 2015-03-04 13:30:57



Rys. 2.3.11. *Histogram generacji i wytwarzania ultrakrótkich impulsów światła laserowego.*

Fig. 2.3.11. *Histogram of generation of ultrashort laser light pulses.*

1 mikrosekunda (1 µs = 1 · 10^{-6} s)

Jedna mikrosekunda, to jedna milionowa część sekundy. Z takimi czasami również spotykamy się w codziennym życiu – jest to np. czas trwania impulsu świetlnego, wytwarzanego przez lampę błyskową w aparacie fotograficznym. Dzięki temu możemy „zamrażać”

our everyday life - it is e.g. the duration of the light pulse generated by the flash of a photo camera. This allows us to "freeze" in pictures objects moving at specific speeds, for example a gun bullet photographed with such time resolution seems to be almost immobile.

Laser.indb 132 2015-03-04 13:30:57

na zdjęciach obiekty poruszające się z odpowiednimi prędkościami, np. pocisk pistoletowy sfotografowany z taką rozdzielczością czasową wydaje się prawie nieruchomy.

1 nanosekunda (1 ns = 1 · 10^{-9} s)

Jedna miliardowa część sekundy jest to czas, w którym szybki tranzystor we współczesnym komputerze przełącza się ze stanu zaporowego do stanu przewodzenia, zmieniając w ten sposób zero logiczne na jedynkę logiczną. Jest to tak krótki czas, że światło, które w ciągu jednego uderzenia serca potrafi siedmiokrotnie okrążyć Ziemię, w ciągi 1 ns przebywa zaledwie odległość 30 cm.

1 pikosekunda (1 ps = 1 · 10^{-12} s)

Pikosekunda to jedna trylionowa część sekundy. Pikosekundy są odcinkami czasu, z którymi mamy do czynienia przy badaniu zjawisk zachodzących w cząsteczkach. W czasie jednej pikosekundy światło przebiega dystans, 0,3 mm, czyli z grubsza średnicę kropki znajdującej się na końcu tego zdania. „Zamrożone" obrazy ruchów cząsteczek można uzyskać jedynie za pomocą laserów wytwarzających pikosekundowe impulsy światła.

1 nanosecond (1 s = 1 · 10^{-9} sec)

One billionth of a second is the time in which a fast transistor in the modern computer switches from the reverse blocking state to the "on" state, thus changing the logic zero to logical one. It is so short that the light, which in the space of a heartbeat can circle the Earth seven times, covers a distance of only 30 cm during 1 ns.

1 picosecond (1 s = 1 · 10^{-12} sec)

Picosecond is one trillionth of a second. Picoseconds are durations we encounter when studying phenomena occurring in the molecules. During one picosecond light covers the distance of 0.3 mm, which is roughly the diameter of a dot located at the end of this sentence. The "frozen" images of movements of molecules can be obtained only by lasers generating picosecond pulses of light.

1 femtosecond (1 s = 1 · 10^{-15} sec)

Femtosecond is one quadrillionth of a second - the period of time a thousand times shorter than 1 ps. During one fs light covers the distance of 0.3 m, or approximately 1000 distances between atoms in a crystal of silicon. Femtosecond laser pulses are the

Laser.indb 133 2015-03-04 13:30:57

1 femtosekunda (1 fs = 1 · 10^{-15} s)

Femtosekunda to jedna kwadrylionowa część sekundy - odcinek czasu tysiąc razy krótszy od 1 ps. W czasie 1 fs światło przebiega odległość, 0,3 μm, czyli w przybliżeniu 1000 odległości między atomami w krysztale krzemu. Femtosekundowe impulsy laserowe są najkrótszymi zdarzeniami, które są w pełni wytwarzane, kontrolowane i mierzone przez człowieka.

1 attosekunda (1 as = 1 · 10^{-18} s)

Elektron potrzebuje około 152 as na okrążenie protonu – po orbicie najbliższej jądru atomu wodoru, w modelu Bohra.

2.4. PODSTAWOWE CECHY ŚWIATŁA LASEROWEGO

2.4.1. ŚWIATŁO KONWENCJONALNE A LASEROWE

Światło wytwarzane w laserze różni się w sposób istotny od światła emitowanego ze źródeł konwencjonalnych: słońca, żarówki, świetlówki czy świecy. Konwencjonalne źródła światła traktuje się niekiedy jako źródło szumów o bardzo szerokim widmie fal świetlnych (szerokim widmie częstotliwości). Wiemy, że cechą charakterystyczną procesu emisji wymuszonej jest to, iż powstały foton

shortest events that can be fully generated, controlled and measured by man.

1 attosecond (1 s = 1 · 10^{-18} sec)

Electron needs about 152 attoseconds to go around a proton – following an orbit nearest to the hydrogen atom nucleus in the Bohr model.

2.4. BASIC CHARACTERISTICS OF LASER LIGHT

2.4.1 CONVENTIONAL LIGHT VS LASER LIGHT

The light generated by a laser differs significantly from the light emitted by conventional sources: the sun, a light bulb, a fluorescent lamp or a candle. Conventional light sources are often perceived as a source of noise with a very broad spectrum of light waves (broad frequency spectrum). We know that the characteristic of stimulated emission

Laser.indb 134 2015-03-04 13:30:57

wymusza emisję nowego – kolejnego fotonu, którego faza, częstotliwość, polaryzacja i kierunek są identyczne, jak fotonu wymuszającego. Wymuszony foton z kolei wymusza kolejny o takich samych cechach, co prowadzi do lawinowego procesu ich generacji. Światło lasera jest: monochromatyczne (jednobarwne), ukierunkowane (skolimowane), spójne i o wysokim spektralnym natężeniu napromienienia, a wszystkie te właściwości umożliwiają uzyskiwanie skrajnie małego obszaru (plamki) w ognisku soczewki. Te unikalne i jedyne w swoim rodzaju właściwości światła laserowego zdecydowały o „nieograniczonej" liczbie praktycznych zastosowań laserów.

Spójność charakteryzuje promieniowanie wykazujące zgodność faz ciągów falowych, emitowanych bądź przez różne punkty źródła jednocześnie (spójność przestrzenna), bądź też przez jeden punkt źródła w różnych momentach czasu (spójność czasowa). Innymi słowy, spójność oznacza określoną zależność faz między promieniami wychodzącymi z różnych punktów źródła oraz między dowolnymi punktami jednego promienia. Skutkiem spójności jest zdolność ciągów falowych do interferencji.

process is that the generated photon stimulates the emission of another photon, with identical phase, frequency, polarisation and direction as those of the stimulating photon. The stimulated photon, in turn, stimulates another with the same characteristics, thus leading to their avalanche generation. The laser light is monochromatic (one-colour), directed (collimated), coherent and with a high spectral intensity of irradiance, and all these properties allow for obtaining an extremely small area (spot) in the focal point of the lens. These unique properties of laser light are in fact tantamount to the "unlimited" number of practical applications of lasers.

Coherence is characteristic of the radiation demonstrating conformity of phases of wave sequences, emitted either by different points of the source at the same time points (spatial coherence), or by a single point of the source at different times (temporal coherence). In other words, coherence means a specific dependency of phases between rays emitted from different points in the source and between any points of one ray. The coherence results in the ability of wave sequences for interference.

Laser.indb 135 2015-03-04 13:30:57

2.4.2. KIERUNKOWOŚĆ PROMIENIOWANIA

Kolimacja promieniowania laserowego związana jest z ukierunkowaną naturą wiązki laserowej. O takich wiązkach mówi się, że są skolimowane, a to oznacza z kolei, że mogą one być zogniskowane na bardzo małej powierzchni po przebiegnięciu dużych odległości. Tak więc, cała energia zawarta w wiązce laserowej może być sprawnie zebrana na małej powierzchni (praktycznie bez strat, w obszarze ogniska soczewki skupiającej), dostarczając ogromnych intensywności. Stopień kolimacji wiązki laserowej jest bezpośrednio związany z kątem jej rozbieżności, o którym z kolei decyduje rezonator laserowy. Dla konfokalnego rezonatora laserowego o długości L, kąt rozbieżności wyraża się prostą zależnością:

$$\theta = \left(\frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \right), \qquad (2.4.1)$$

gdzie: w_0 jest najmniejszą wartością promienia osiąganą w przewężeniu wiązki laserowej.

Najmniejsza wartość promienia wiązki w przewężeniu, w_0, wyraża się następująco:

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot L}{2\pi}} \ . \qquad (2.4.2)$$

W idealnym przypadku kąt rozbieżności powi-

2.4.2 RADIATION DIRECTIVITY

Collimation of laser radiation is associated with the directivity of the laser beam. Such beams are called collimated beams, and this in turn means that they can be focused on a very small area after travelling over long distances. Thus, all the energy contained in the laser beam may be efficiently gathered within a small space (with virtually no losses in the converging lens focus area), providing tremendous intensity. The degree of collimation of the laser beam is directly related to its angle of divergence, which in turn is determined by the laser resonator. For confocal laser resonator with the length of L, the angle of divergence is expressed by a simple formula:

$$\theta = \left(\frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \right), \qquad (2.4.1)$$

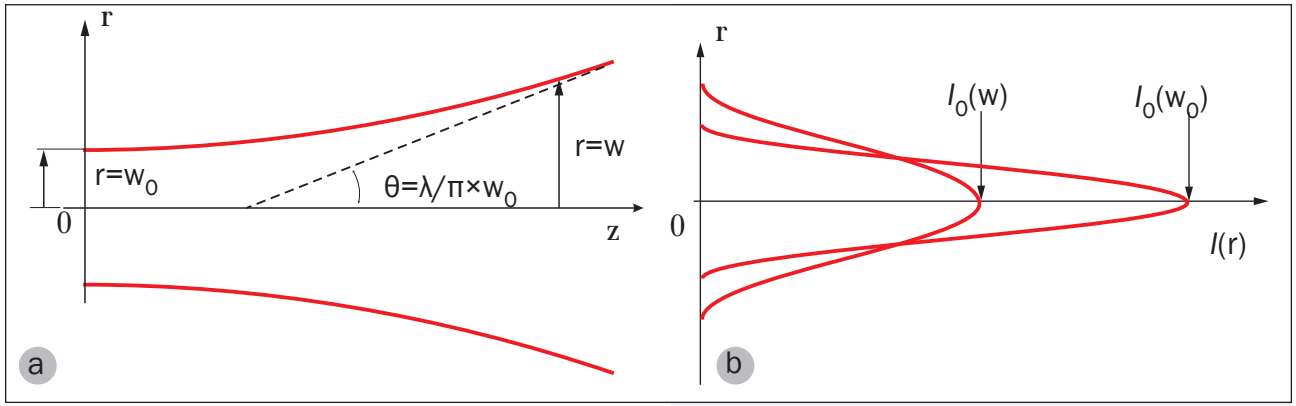
where: w_0 is the lowest value of the radius achieved in the laser beam waist.

The lowest value of the radius of the beam in its waist w_0 is expressed as follows:

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot L}{2\pi}} \ . \qquad (2.4.2)$$

Ideally, the divergence angle should be zero, but it is physically impossible due to the

Laser.indb 136 2015-03-04 13:30:57



Rys. 2.4.1. *Charakterystyki wiązki gaussowskiej: a) – kąt rozbieżności wiązki, b) – rozkłady intensywności wiązki gaussowskiej.*

Fig. 2.4.1. *Gaussian beam characteristics: a) - beam divergence angle, b) - Gaussian beam intensity distributions.*

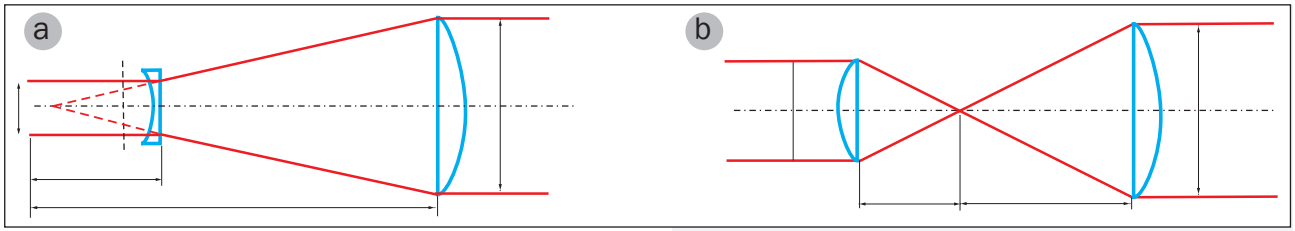
nien być równy zeru, jednak jest to niemożliwe fizycznie ze względu na zjawisko dyfrakcji. Typowe kąty rozbieżności wiązek większości laserów wynoszą od 0,5 do 10 miliradianów. Kąt rozbieżności jednego miliradiana oznacza, że na długości jednego metra średnica wiązki wzrośnie o jeden milimetr. Kolimację wiązki promieniowania laserowego można zwiększyć za pomocą dodatkowych układów optycznych, teleskopów. Na rys. 2.4.2, przedstawiono dwa najbardziej znane teleskopy – ekspandery wiązek światła: teleskop Galileusza i teleskop Keplera.

Używa się ich wtedy, gdy chcemy przesłać wiązkę światła na znaczną odległość lub w przypadku, gdy laser emituje wiązkę o zbyt małej średnicy. Taką

diffraction phenomenon. Typical divergence angles of laser beams usually range from 0.5 to 10 milliradians. The angle of divergence of one mrad means that over the length of one metre the diameter of the beam will increase by one millimetre. Collimation of the laser radiation beam may be increased by using additional optical systems and telescopes. Fig.2.4.2 shows the two most famous telescopes - expanders of light beams: the Galileo's and Keplerian telescopes.

They are used to send a light beam at a large distance or when the laser emits a small beam diameter. Such a beam is difficult to focus, except for lenses with very short focal lengths, which in

Laser.indb 137 2015-03-04 13:30:57



Rys. 2.4.2. *a) – Teleskop Galileusza i b) – Teleskop Keplera – układ dwóch współogniskowych soczewek zwiększający kolimację wiązki laserowej – zmniejszający kąt rozbieżności.*

Fig. 2.4.2. *a) Galileo's telescope b) Keplerian telescope - a system of two confocal lenses increasing the laser beam collimation - reducing the divergence angle.*

wiązkę jest trudno zogniskować za wyjątkiem soczewek o bardzo krótkich ogniskowych, co w praktyce oznacza, że jest to słaby punkt ze względu na osadzanie się cząsteczek odparowywanego materiału na powierzchni soczewki w przypadku procesu obróbki. Generalną zasadą jest to, że nowa średnica wiązki światła będzie: $D_2 = D_1(f_2/f_1)$. Dwie soczewki, odpowiednio o ogniskowych f_1 i f_2 ustawione tak jak na rys.2.4.2 zmniejszają kąt rozbieżności wiązki o wielkość f_1/f_2, powodując jednocześnie zwiększenie średnicy wiązki wyjściowej o czynnik f_2/f_1. Dla długich dróg propagacji wiązki laserowej kąt rozbieżności jest jednym z zasadniczych parametrów.

W podsumowaniu tej właściwości światła laserowego przytoczmy przykład. Jeśli naszą wiązkę laserową (o średnicy D = 1 mm i kącie rozbieżności Θ = 1 mrad) zogniskujemy za pomocą obiektywu aparatu fotograficznego o ogniskowej f = 35 mm, to średnica plamki w ognisku tego obiektywu wyniesie

practice means that it is a weak point due to the deposition of evaporated material particles on the surface of the lens during the treatment process. The general rule is that the new diameter of the light beam is: $D_2 = D_1(f_2/f_1)$. Two lens of focal length f_1 and f_2 respectively, positioned as in fig.2.4.2 reduce the angle of divergence of the beam by f_1/f_2, at the same time causing an increase in the diameter of the output beam by the factor f_2/f_1. For long paths of laser beam propagation, the divergence angle is one of the essential parameters.

This property of the laser light may be summarized by the following example: If our laser beam (with the diameter D = 1 mm and an divergence angle of Θ = 1 mrad) is focused using a camera lens with a focal length f = 35 mm, the diameter of the spot at the focal point of the lens is 35 μm. The diameter of the laser spot in the focal point of the lens is almost twice as small as the

Laser.indb 138 2015-03-04 13:30:57

35 µm. Średnica plamki lasera w ognisku obiektywu jest prawie dwa razy mniejsza od średnicy ludzkiego włosa. Jeśli kąt rozbieżności wiązki laserowej byłby 0,1 mrad, wtedy średnica plamki w ognisku obiektywu wyniosłaby 3,5 µm. Ma to kapitalne znaczenie w tzw. mikro-niszczących badaniach składu chemicznego np. warstw malarskich (metoda LIBS czyli laserowo indukowana spektroskopia emisyjna). Odparowana objętość badanej warstwy malarskiej jest znikoma, a świecące pary badanej warstwy malarskiej umożliwiają analizę ich składu chemicznego. Typowe wartości kątów rozbieżności wiązek różnych typów laserów, przedstawiono w Tabeli 2.4.1.

diameter of a human hair. If the divergence angle of the laser beam was 0.1 mrad, the diameter of the spot at the focal point of the lens would be 3.5 µm. This is of paramount importance in the so-called micro-destructive tests of the chemical composition of, e.g. paint layers (LIBS method, i.e. laser-induced breakdown spectroscopy). Evaporated volume of the paint layer tested is negligible, and glowing vapours of the paint layer tested make it possible to analyse their chemical composition. Typical values of beam divergence angles of various laser types are shown in Table 2.4.1.

Tabela 2.4.1. Wartości kątów rozbieżności wiązek laserowych wybranych typów laserów

Table 2.4.1. Values of divergence angles of laser beams of selected types of lasers

Typ lasera Laser type	Długość fali Wavelength [nm]	System pracy (generacja) Working system (generation)	Kąt rozbieżności wiązki Beam divergence angle [mrad]
He - Ne	632,8	Ciągła / Continuous wave	0,85
Rubinowy / Ruby	693,8	Q - modulacja / Q - switching	8 - 10
Nd:YAG	1064	Q - modulacja / Q - switching	3 - 5
CO_2	10590	Impulsowa / Pulsed	2 - 5

Laser.indb 139 2015-03-04 13:30:57

2.4.3. MONOCHROMATYCZNOŚĆ – JEDNOBARWNOŚĆ PROMIENIOWANIA

Laser jest źródłem ekstremalnie jednobarwnego światła o ekstremalnie wysokiej monochromatyczności. Laser emituje promieniowanie o bardzo wąskim widmie, a jego miarą jest szerokość linii emisji. Widmo promieniowania laserowego składa się z bardzo wąskich, dyskretnych linii widmowych, rozseparowanych w niewielkich odległościach, które spełniają warunek rezonansu, (patrz podrozdział 2.2):

$$L = \frac{q \cdot \lambda}{2} \quad , \qquad (2.4.3)$$

gdzie: L jest długością rezonatora, q – liczba całkowita, a λ jest długością fali emisji.

Te dyskretne linie jak wiemy, nazywają się modami wzdłużnymi, patrz rys. 2.2.18) i są oddalone od siebie w domenie częstotliwości (równanie 2.2.10), o:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad , \qquad (2.4.4)$$

gdzie: c jest prędkością światła.

Częstotliwości, które są wzmacniane w wyniku emisji wymuszonej zależą głównie od strat rezo-

2.4.3 ONE COLOUR – MONOCHROME RADIATION

The laser is a source of extremely one-colour light with extremely high monochromaticity. The laser emits a very narrow spectrum of radiation measured by the width of the emission lines. The laser radiation spectrum consists of very narrow, discrete spectral lines, spaced at small intervals conform to the resonance condition, (see subsection 2.2):

$$L = \frac{q \cdot \lambda}{2} \quad , \qquad (2.4.3)$$

where: L is the resonator length, q – an integer number, and λ is the emission wavelength.

These discrete lines are, as we already know, called longitudinal modes,(cf. fig.2.2.18) and are spaced apart in the frequency domain (expression 2.2.10) by:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad , \qquad (2.4.4)$$

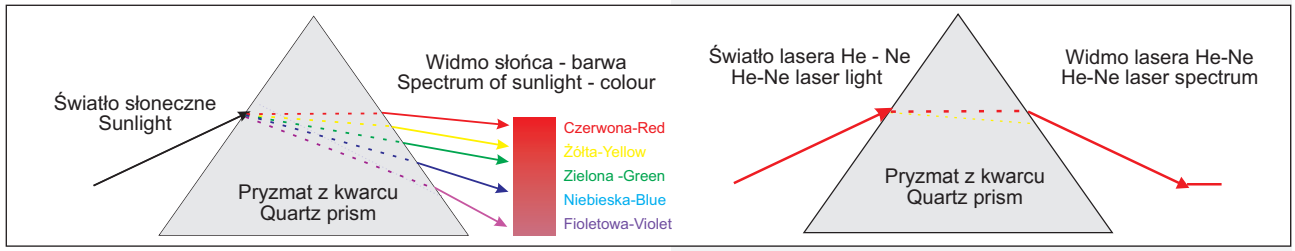
where: c is the speed of light.

Frequencies that are amplified by stimulated emission depend mainly on the optical resonator

Laser.indb 140 2015-03-04 13:30:57

natora optycznego i krzywej wzmocnienia materiału aktywnego. Na wyjściu lasera otrzymamy jedynie te mody wzdłużne, które doznały większego wzmocnienia niż strat, rys. 2.2.18. Wiemy również, że liczba modów wzdłużnych może sięgać nawet dziesiątków tysięcy. Laser może być jednak tak skonstruowany, aby pracował tylko na jednym modzie wzdłużnym, dając najlepszą monochromatyczność emitowanego światła. Szerokość spektralna pojedynczego modu wzdłużnego zależy głównie od parametrów optycznych rezonatora laserowego i materiału aktywnego. Wysoki stopień naturalnej monochromatyczności światła laserowego zilustrowano dla porównania ze źródłem konwencjonalnym na rys. 2.4.3.

losses and on the gain profile of the active material. At the output of the laser only those longitudinal modes that had more gain than losses are obtained, fig.2.2.18. We also know that the number of longitudinal modes may reach tens of thousands. However, the laser may be designed so as to work only on one longitudinal mode, providing the best monochromaticity of the light emitted. The spectral width of a single longitudinal mode mainly depends on optical parameters of the laser resonator and of the active material. A high degree of natural monochromaticity of the laser light is illustrated for comparison with a conventional source in fig.2.4.3.



Rys. 2.4.3. *Ilustracja porównująca przejście (rozszczepienie) światła słonecznego (wielobarwnego) i laserowego (jednobarwnego) przez pryzmat wykonany z kwarcu.*

Fig. 2.4.3. *Illustration comparing the passage (dispersion) of sun (multi-colour) and laser (monochromatic) light through a quartz prism.*

W praktycznych układach laserowych (nie specjalizowanych) niemożliwe jest uzyskanie promieniowania o jednej, ściśle określonej długości fali, tj. promieniowania w pełni monochromatycz-

In practical (non-specialised) laser systems it is impossible to obtain radiation with the same, precisely defined wavelength, i.e. fully monochromatic radiation. This is known as a

Laser.indb 141 2015-03-04 13:30:57

nego. Mówimy wtedy o pewnym określonym zakresie długości fal $\Delta\lambda$ obserwowanych w wiązce laserowej wokół tzw., centralnej długości fali λ_0 charakterystycznej dla wybranego ośrodka laserowego. W domenie częstotliwości odpowiada to pewnemu zakresowi spektralnemu częstotliwości $\Delta\nu$, pojawiającemu się wokół częstotliwości podstawowej ν_0 (centralnej) fali emitowanej przez laser, Tabela 2.4.2.

Tabela 2.4.2. Szerokości linii widmowych kilku laserów komercyjnych.

specific range of wavelengths $\Delta\lambda$ observed in the laser beam around the so-called central wavelength λ_0 characteristic for the selected laser medium. In the frequency domain, this corresponds to a certain frequency spectral range $\Delta\nu$, appearing around the fundamental frequency ν_0 (central) wave emitted by the laser, Table 2.4.2.

TABLE 2.4.2. Width of spectral lines of several commercial lasers.

Laser	Linia centralna / Central line [μm]	Szerokość linii / Line width [GHz]	Szerokość linii / Line width [μm]
Ar	0,448	~5	$3{,}35 \cdot 10^{-6}$
He-Ne	0,6328	~1,5	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$
Rubin / Ruby	0,6943	~30	$48{,}21 \cdot 10^{-6}$
GaAs	0,8	~10	$21{,}33 \cdot 10^{-6}$
Nd:szkło / Nd:glass	1,06	~1500	$5618 \cdot 10^{-6}$
Nd:YAG	1,064	~13	$49{,}06 \cdot 10^{-6}$
CO_2	10,6	~0,1	$37{,}45 \cdot 10^{-6}$

Ze względu na selektywność oddziaływania różnych długości fal z różnymi materiałami nawarstwień, lasery pełnią szczególną rolę w dziedzinie konserwacji dzieł sztuki.

Due to the selectivity of interaction of various wavelengths with various encrustation materials, lasers play a special role in the conservation of works of art.

Laser.indb 142 2015-03-04 13:30:58

2.4.4. KOHERENCJA – SPÓJNOŚĆ WIĄZKI LASEROWEJ

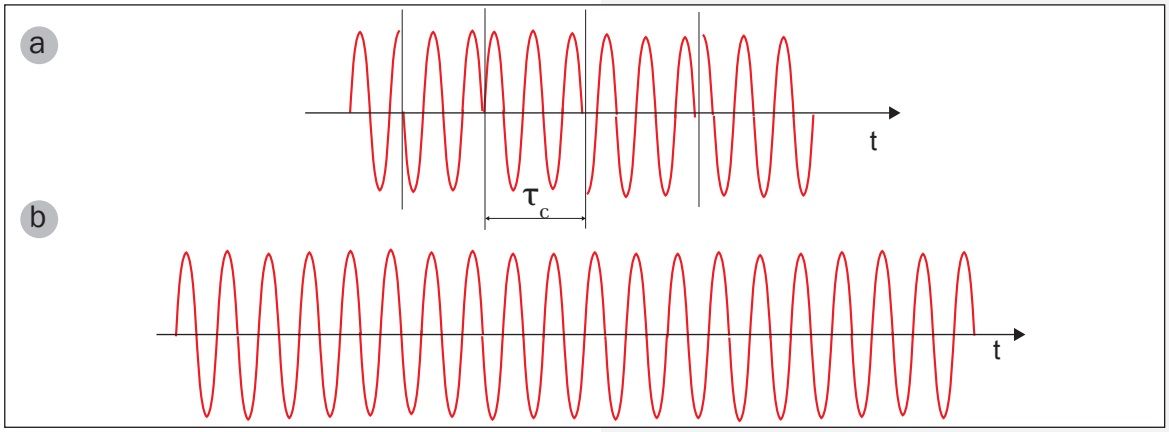
Spójność w czasie

Emisja konwencjonalnego źródła światła (nawet szczególnie monochromatycznego) składa się z serii ciągów falowych o ograniczonym czasie trwania, nakładających się na siebie bez jakichkolwiek ustalonych relacji faz wzajemnych. Z kolei emisja z lasera jest ciągłą falą sinusoidalną bez przeskoków fazowych i bez fluktuacji amplitudy, rys. 2.4.2.

2.4.4 LASER BEAM COHERENCE

Temporal coherence

Emission of a conventional light source (even particularly monochrome) consists of a series of wave sequences of limited duration, overlapping without any specific relationship of mutual phases. The laser emission, in turn, is a continuous sine wave with no phase jumps and with no amplitude fluctuation, fig.2.4.2.



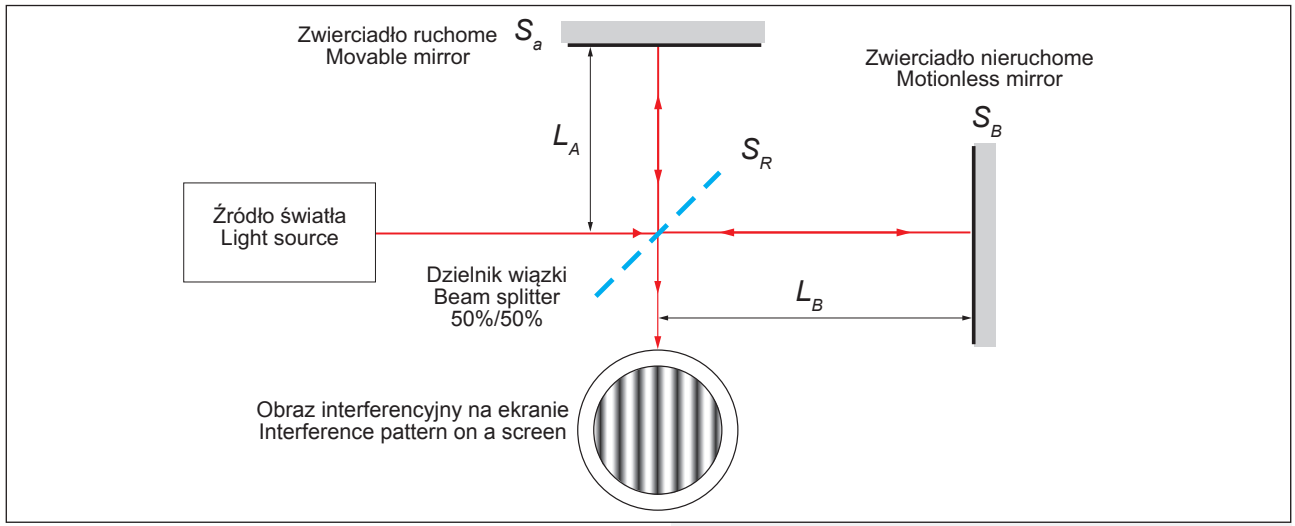
Rys. 2.4.4. *Ciągi falowe emitowane przez: a) – źródło konwencjonalne i b) – źródło laserowe*

Fig. 2.4.4. *Wave sequences emitted by: a) - a conventional source b) - a laser source*

Oświetlmy interferometr Michelson'a, rys. 2.4.5 źródłem S i podzielmy wiązkę na dwie równe części za pomocą półprzepuszczalnego zwierciadła S_R.

Let us illuminate the Michelson interferometer, fig.2.4.5 with a source S and divide the beam into two equal parts using a semi-transmittive mirror S_R.

Laser.indb 143 2015-03-04 13:30:58



Rys. 2.4.5. *Interferometr Michelsona.*

Fig.2.4.5. *Michelson interferometer.*

Dwie wiązki osiągną dwa zwierciadła S_1 i S_2, które odbiją je z powrotem w kierunku S_R. Obie wiązki nałożą się na siebie na ekranie E po pokonaniu w ogólności dwóch dróg optycznych o różnej długości. W przypadku monochromatycznego źródła konwencjonalnego, jeśli różnica dróg optycznych $d = 2(L_a - L_b)$ jest krótsza niż długość koherencji $l_c = c \cdot \tau$ (długość ciągu falowego), na ekranie uformuje się obraz prążków interferencyjnych. W szczególności ekran będzie oświetlony, jeśli odległość d jest parzystą wielokrotnością połówek długości fal $\lambda / 2$, ponieważ dwa ciągi falowe wiązek A i B nakładają się na siebie w fazie (interferencja konstruktywna). Ekran będzie ciemny, jeśli d jest nieparzystą wielokrotnością połówek długości

Two beams reach the two mirrors S1 and S2, which reflect them back towards S_R. Both beams overlap on the screen E after passing in general two optical paths of different length. In the case of a conventional monochromatic source, if the difference of optical path $d = 2(L_a - L_b)$ is shorter than the coherence length $l_c = c \cdot \tau$ (the length of the wave sequence), the screen will display an image of interference fringes. In particular, the screen will be illuminated if the distance d is an even multiple of half wavelengths $\lambda / 2$, as the two wave sequences of the beams A and B overlap in phase (constructive interference). The screen will be dark if d is an odd multiple of half wavelengths $\lambda / 2$ (destructive interference).

Laser.indb 144 2015-03-04 13:30:58

fal $\lambda / 2$ (interferencja destruktywna). Jeśli, na odwrót (przeciwnie) d jest większe niż długość koherencji l_c (która jest rzędu 30 cm dla najlepszych konwencjonalnych źródeł monochromatycznych), nie wystąpi żaden stacjonarny obraz interferencyjny na ekranie E, a w szczególności nie będzie obserwowana żadna zmiana intensywności obrazu na ekranie podczas zmieniania odległości d.

Za pomocą źródeł laserowych możliwe jest otrzymanie interferencji przy różnicy długości dróg optycznych d rzędu kilku kilometrów (ograniczeniem jest turbulencja atmosfery). Ta właściwość źródła laserowego światła dotyczy koherencji czasowej. Źródło o wysokiej czasowej koherencji (ogromne τ_c) jest również prawie monochromatyczne, tzn. emituje w bardzo małym przedziale częstotliwości $\Delta v / \tau_c$. Odpowiedni czas koherencji źródła jest wymagany dla szeregu technik diagnostycznych wykorzystujących interferencję fal, takich jak np.: badania interferometryczne powierzchni lub pomiary drgań i przemieszczeń badanych obiektów. Jest ona również ważna w systemach telekomunikacyjnych wykorzystujących koherentną detekcję sygnału (heterodyna).

Spójność w przestrzeni

Dwa punkty na ekranie oświetlonym przez źró-

And if, on the contrary (inversely) d is greater than the coherence length l_c (which is of the order of 30 cm for the best of conventional monochromatic sources), there will be no stationary interference image on the screen E, in particular, there will be no change observed in the intensity of the image on the screen during the change of the distance d.

Laser sources make it possible to obtain a interference at different lengths of optical paths d of the order of several kilometres (the limit being the air turbulence). This property of the laser source light applies to temporal coherence. Sources with high temporal coherence (huge τ_c) is also almost monochromatic, i.e. it emits in a very low frequency range $\Delta v / \tau_c$. An appropriate coherence time of a source is required for a number of diagnostic techniques using wave interference, such as interferometric surface tests or for measuring vibrations and movements of the objects tested. It is also important in telecommunication systems using coherent signal detection (heterodyne).

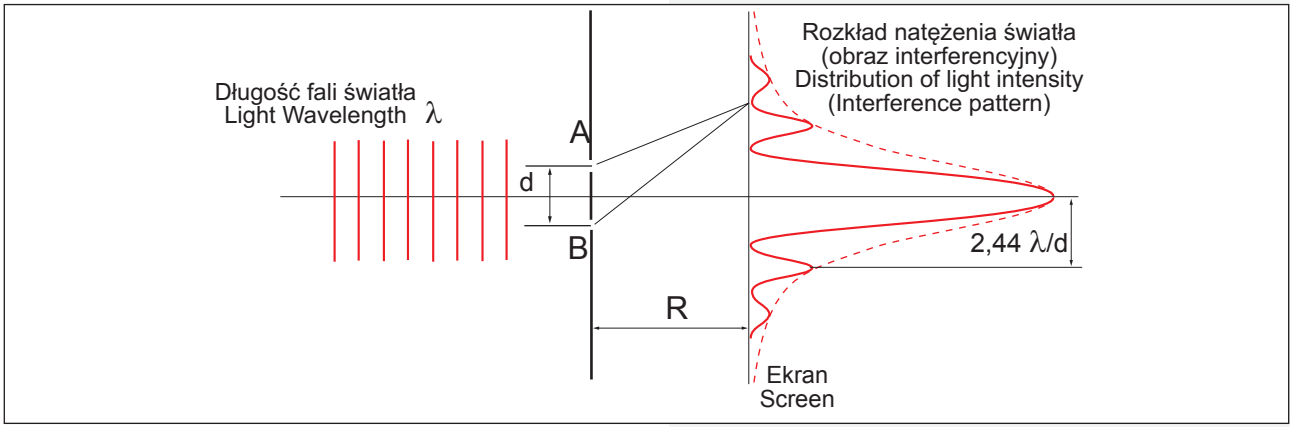
Spatial coherence

Two points on the screen illuminated by a conventional source will receive wave sequences

Laser.indb 145 2015-03-04 13:30:58

dło konwencjonalne, odbiorą ciągi falowe z ustaloną zależnością fazową tylko wtedy, jeśli te punkty znajdują się bardzo blisko siebie (tzn. jeśli należą one do tego samego obszaru koherencji). Aby zweryfikować ten warunek wystarczy przedziurawić ekran w tych rozważanych dwóch punktach i obserwować rozkład intensywności światła na drugim ekranie oświetlonym przez światło przechodzące przez te dwa otworki, rys. 2.4.4. Zaobserwujemy układ pierścieni interferencyjnych (pierścienie Young'a), jeśli odległość pomiędzy dwoma punktami jest krótsza niż charakterystyczna długość r_c, która definiuje poprzeczny rozmiar obszaru koherencji.

with a specific phase relationship only if these points are located very close to each other (i.e. if they belong to the same coherence area). To verify this condition, it is enough to puncture the screen in those two points considered and observe the distribution of light intensity on the second screen illuminated by the light passing through the two holes, fig.2.4.4. We shall observe an interference ring system (Young's rings), if the distance between the two points is shorter than the characteristic length r_c, which defines the transverse dimension of the coherence area.



Rys. 2.4.6. *Interferometr Young'a*

Fig. 2.4.6. *Young's interferometer.*

Widzialność obrazu interferencyjnego w centrum ekranu przedstawia stopień koherencji przestrzennej padającego na szczeliny frontu falowego. W przypadku oświetlenia ekranu źródłem lasero-

Visibility of the interference image in the centre of the screen shows the degree of the spatial coherence of the wavefront falling on the slots. In the case of the illumination of a

Laser.indb 146 2015-03-04 13:30:58

wym pracującym w pojedynczym modzie wzdłużnym, wszystkie oświetlone punkty należą do tego samego obszaru koherencyjnego. Znaczy to, że różnica fazy pomiędzy ciągiem falowym, który oświetla punkt A i ciągiem falowym oświetlającym punkt B jest stała. Ta właściwość nazywana jest koherencją przestrzenną, która umożliwia w przypadku skolimowanych wiązek laserowych ogniskowanie takiego źródła światła (energii świetlnej) w obszar o rozmiarach rzędu kilku długości fal. Jest to niemożliwe w przypadku źródeł konwencjonalnych emitujących w sposób niekoherentny w różnych kierunkach.

2.4.5. SPEKTRALNE NATĘŻENIE NAPROMIENIENIA

W efekcie monochromatyczności i koherencji przestrzennej, źródła laserowe mają ogromne spektralne natężenie napromienienia. Dla przykładu: dla lasera o mocy $P = 1$ mW, średnicy wiązki równej $2w_0 = 1$ mm i o szerokości linii emisji $\Delta\lambda = 10^{-6}$ μm, spektralne natężenia napromienienia wyniesie: $E_\lambda \approx 1000$ MWm^{-2} μm^{-1}.

Dla porównania, na rys. 2.4.7 przedstawiono zakres widmowy promieniowania słońca, którego zakres emisji rozpościera się na niezmiernie duży obszar długości fal i lasera He-Ne, dla któ-

screen with a laser source operating at a single longitudinal mode, all illuminated points belong to the same coherence area. This means that the phase difference between the wave sequence, which illuminates the point A and the wave sequence illuminating the point B is a constant. This property is called spatial coherence, which allows for focusing such a source of light (light energy) in collimated laser beams into an area of dimensions of the order of several wavelengths. This is not possible in conventional sources emitting incoherently in different directions.

2.4.5 SPECTRAL IRRADIANCE INTENSITY

As a result of monochromaticity and spatial coherence, laser sources have huge spectral irradiance intensity. For example, in case of a laser with the power of P = 1 mW, beam diameter of $2w_0$=1 mm and width of emission lines of $\Delta\lambda$ = 10^{-6} μm, spectral irradiance intensity will amount to: $E_\lambda \approx 1000$ MWm^{-2} μm^{-1}.

For comparison, fig.2.4.7 shows the spectral profile of the radiation of the sun, the emission range of which extends over an extremely large area of wavelengths, together with He-Ne laser, the calculations for which are shown above. Taking into the calculations the range of visible

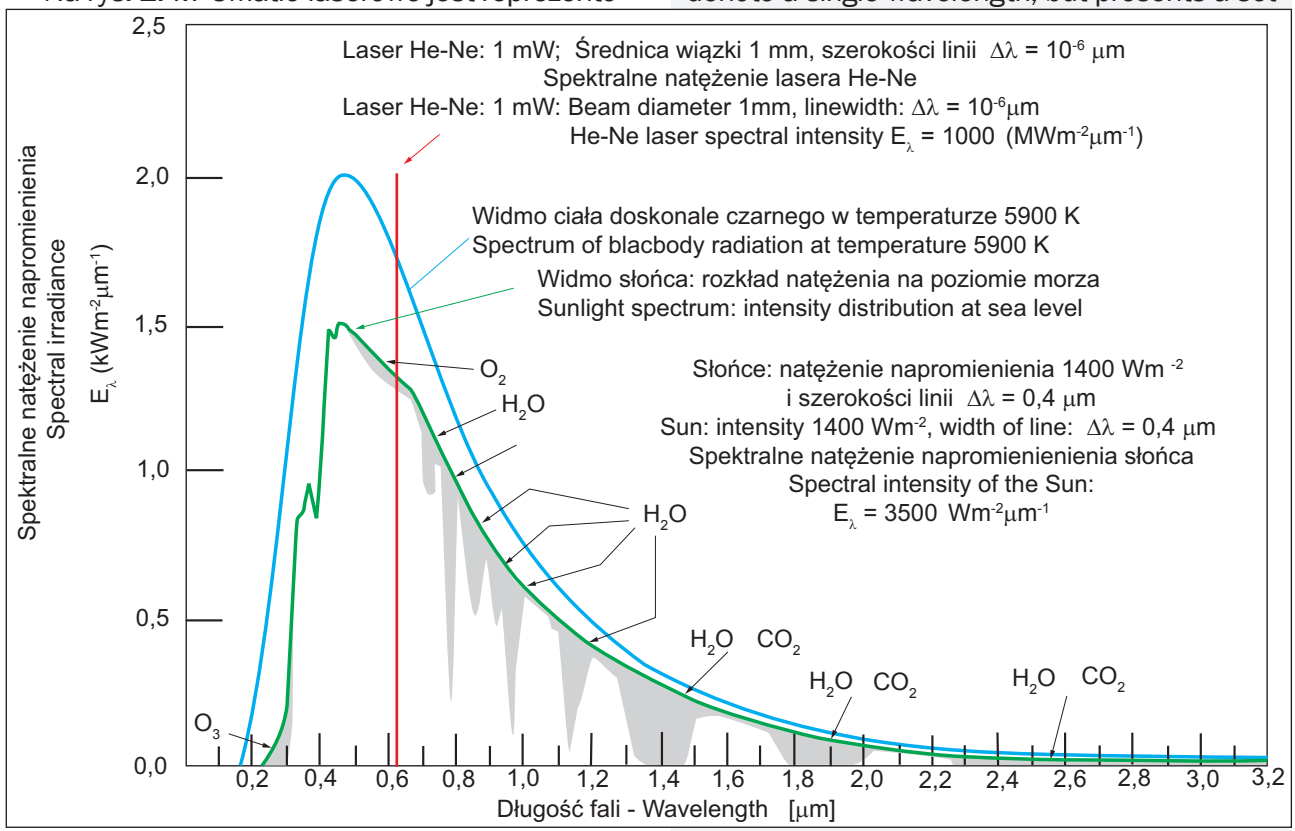
Laser.indb 147 2015-03-04 13:30:58

rego przedstawiono obliczenia powyżej. Biorąc do obliczeń zakres fal widzialnych emitowanych przez Słońce: emitowana moc na metr kwadratowy wynosi 1400 Wm^{-2}, w zakresie widmowym 0,4 μm. Stanowi to jedynie 3500 Wm^{-2} μm^{-1}.

Na rys. 2.4.7 światło laserowe jest reprezento-

waves emitted by the Sun: power emitted per square metre is 1400 Wm^{-2} in the spectral range of 0.4 μm. This is only 3500 Wm^{-2} μm^{-1}.

In fig.2.4.7 laser light is represented by a single vertical red line. It does not, however, denote a single wavelength, but presents a set



Rys. 2.4.7. *Ilustracja względnych natężeń spektralnego napromienienia dwóch źródeł światła: słonecznego i laserowego w funkcji długości fali emisji.*

Fig. 2.4.7. *Illustration of relative intensities of the spectral irradiance of two light sources: of the sun and of the laser as a function of emission wavelength.*

Laser.indb 148 2015-03-04 13:30:58

wane przez jedną pionową, czerwoną kreskę. Nie oznacza ona wprawdzie jednej długości fali, lecz przedstawia ich zbiór zawarty w bardzo wąskim pasemku, tworzącym linię widmową o szerokości $\Delta\lambda = 10^{-6}$ µm. Zacieniowane obszary to pasma pochłaniania promieniowania słońca przez atomy i molekuły powietrza.

2.5. WIELKOŚCI FIZYCZNE OPISUJĄCE PROMIENIOWANIE OPTYCZNE

2.5.1. ZESTAWIENIE WIELKOŚCI FIZYCZNYCH

Wielkości fizyczne, jednostki miary i symbole tych jednostek opisujące emitowane promieniowanie laserowe, podano w Tabeli 2.5.1. Definicje jednostek podstawowych układu SI podano według ISO 1000, a jednostki i symbole według IEC 27-1. Wielkości te nazywane są również wielkościami radiometrycznymi.

of wavelength contained within a very narrow band, forming a spectral line of the width $\Delta\lambda = 10^{-6}$ µm. Shaded areas are the bands where solar radiation is absorbed by atoms and air molecules.

2.5 PHYSICAL QUANTITIES DESCRIBING THE OPTICAL RADIATION

2.5.1 SUMMWARY OF PHYSICAL QUANTITIES

Physical quantities, measurement units and symbols of those units issued describing the laser radiation emitted are shown in Table 2.5.1. Definitions of SI base units are given according to ISO 1000, while units and symbols according to IEC 27-1. These are also called radiometric quantities.

Laser.indb 149 2015-03-04 13:30:58

Tabela 2.5.1. Wielkości fizyczne opisujące promieniowanie optyczne.

Table 2.5.1. Physical quantities describing optical radiation.

Wielkość / Size	Nazwa jednostki / Unit name	Symbol jednostki / Unit symbol	Definicja / Definition
Energia (promienista) Energy (radiative)	dżul / joule	J	1 N · m
Napromienienie Irradiance	dżul na metr kwadratowy joule per square metre	$J \cdot m^{-2}$	$1\ J \cdot m^{-2}$
Luminancja energetyczna Radiance (energetic luminance)	dżul na metr kwadratowy na steradian joule per square meter per steradian	$J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$1\ J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
Moc / Power	wat / watt	W	$1\ J \cdot s^{-1}$
Natężenie napromienienia Irradiance intensity	wat na metr kwadratowy watt per square meter	$W \cdot m^{-2}$	$W \cdot m^{-2}$
Luminancja energetyczna Radiance (power luminance)	wat na metr kwadratowy na steradian watt per square meter per steradian	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$1\ W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
Spektralna luminancja energetyczna Spectral radiance	wat na metr kwadratowy na steradian i na mikrometr watt per square meter per steradian and per micrometre	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu^{-1}$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu^{-1}$

2.5.2 DEFINICJE WIELKOŚCI FIZYCZNYCH – RADIOMETRYCZNYCH

Poniżej omawia się wielkości i jednostki miary, za pomocą których opisuje się parametry promieniowania laserowego, najczęściej używane i cytowane nie tylko w praktyce konserwatorskiej

2.5.2 DEFINITIONS OF PHYSICAL – RADIOMETIC QUANTITIES

The following chapter presents quantities and measurement units used to describe parameters of laser radiation, most commonly used and cited not only in the conservation practice as

Laser.indb 150 2015-03-04 13:30:58

wykorzystującej różnego rodzaju lasery.

Energia **–** oznaczana zwykle symbolem E, jest miarą „dawki" promieniowania, którą mierzy się w dżulach. Stąd też, energię pojedynczego fotonu E_ν zapisać możemy następująco:

$$E_\nu = h \cdot \nu \qquad (2.5.1)$$

gdzie: h = 6,625 · 10^{-34} J·s – stała Planck'a; ν - częstotliwość fali świetlnej.

Całkowita energia zawarta w wiązce laserowej jest sumą energii wszystkich wyemitowanych fotonów, z których każdy posiada energię równą E_ν. Lasery wykorzystywane w konserwacji dzieł sztuki charakteryzują się energią wyjściową od kilku milidżuli (mJ) do kilkudziesięciu dżuli J. Tę pochodną jednostkę mJ, definiuje się następująco:

1 mJ = 0,001 J = 10^{-3} J

W tym miejscu należy podkreślić, że lasery wykorzystywane w renowacji dzieł sztuki, szczególnie w procesie czyszczenia, reprezentują lasery tzw. IV KLASY BEZPIECZEŃSTWA, a wiec są laserami niebezpiecznymi dla człowieka (oczu, skóry). Zagadnienie bezpieczeństwa omawia się w innym miejscu tej monografii.

regards application of various types of lasers.

Energy – usually marked with E symbol, is a measure of a „dose" of radiation, measured in joules. Thus, the energy of a single photon E_ν may be formulated as follows:

$$E_\nu = h \cdot \nu \qquad (2.5.1)$$

where: h = 6,625 · 10^{-34} J·s – Planck's constant; ν – light wave frequency.

The total energy contained in the laser beam is the sum of all of the photons emitted, each of which has an energy of E_ν. Lasers used in the conservation of works of art have an output power of several millijoules (mJ) to several tens of joules J. This derivative unit mJ is defined as follows:

1 mJ = 0,001 J = 10-3 J

It should be emphasised that the lasers used in the conservation of works of art, particularly in the cleaning process, represent lasers of the so-called SAFETY CLASS IV, and are therefore dangerous to man (human eyes and skin). The issue of safety is discussed elsewhere in the monograph.

Laser.indb 151 2015-03-04 13:30:58

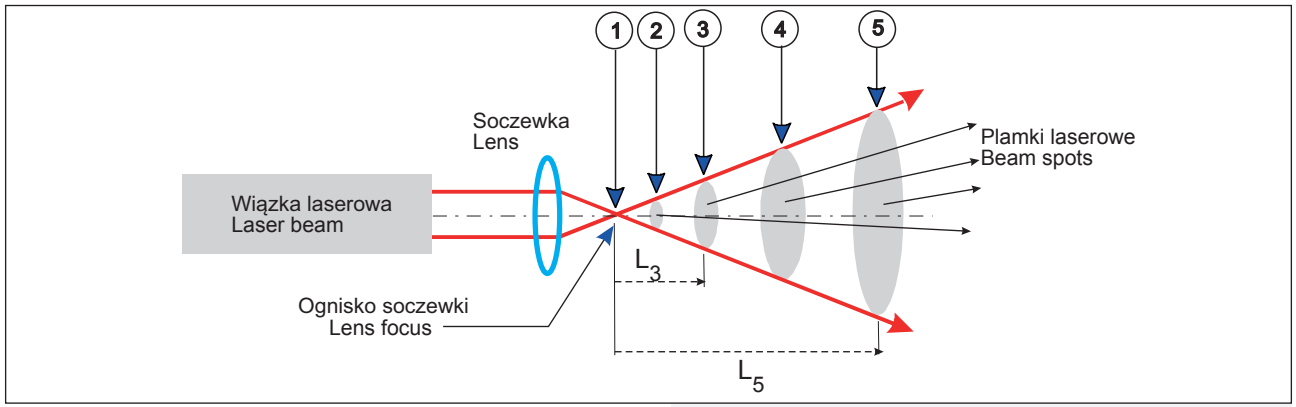
Napromienienie – tak popularnie przyjęto nazwę gęstości energii lub fluencji (ang. fluence), oznaczane zwykle symbolem F – wielkość, która charakteryzuje ilość padającej energii na powierzchnię 1 m^2 (jednego metra kwadratowego). W układzie SI oznaczamy ją J/m^2. Bardziej praktyczną jednostką jest J/cm^2 (dżul na cm^2). Wielkość napromienienia jest najczęściej używaną jednostką w praktyce konserwatorskiej. W monografii będziemy używali zamiennie pojęć takich jak: napromienienie = gęstość energii = fluencja, natężenie napromienienia = intensywność promieniowania. Z reguły czas trwania impulsu laserowego jest stały dla danego urządzenia, stąd interesującą nas jednostką jest energia wyjściowa z lasera oraz średnica emitowanej wiązki laserowej. Jeśli z kolei laser pracuje ze stałą energią wyjściową, to zmianę wielkości napromienienia obiektu zawężamy tylko do regulacji wielkości średnicy wiązki na obiekcie (wielkości plamki). Zmianę średnicy wiązki laserowej realizujemy zwykle za pomocą układu optycznego (np. pojedynczej soczewki), zamontowanego na wyjściu lasera. Jeśli na wyjściu z lasera użyjemy soczewki skupiającej, możemy w łatwy sposób kontrolować wielkość napromienienia.

Rys. 2.5.1 ilustruje sposób dokonywania zmiany wielkości napromienienia, wykorzystując soczewkę skupiającą, od „plamki" o średnicy np.

Irradiance – commonly, the terms energy density or fluence were adopted, usually marked with the F symbol - quantity characteristic of the amount of energy incident on the surface of $1m^2$ (one square metre). In the SI it is marked by J/m^2. A more practical unit is (joule per cm^2) J/cm^2. The quantity of irradiance is the most commonly used unit in conservation practice. This monograph interchangeably uses concepts such as irradiance = energy density = fluence, irradiance intensity = radiation intensity. As a rule, the duration of the laser pulse is constant for a given device, hence the unit that interests us is the output energy from the laser and the diameter of the laser beam emitted. If, in turn, the laser operates with a constant output power, a change in the quantity of the irradiance of an object is narrowed down only to adjust the size of the diameter of the beam on the object (spot size). The change in the diameter of the laser beam is usually achieved through an optical system (e.g. a single lens) mounted on the output of the laser. Using a focusing lens at the output of the laser provides an easy way to control the size of irradiance.

Fig.2.5.1 illustrates a method of changing the quantity of irradiance using a focusing lens, from a „spot" of a diameter of the order of e.g. 0.1 mm

Laser.indb 152 2015-03-04 13:30:58



Rys. 2.5.1. *Ilustracja ilościowej zmiany wielkości napromienienia przy wykorzystaniu soczewki skupiającej.*

Fig. 2.5.1. *Illustration of quantitative change in the quantity of irradiance when using the focusing lens.*

rzędu 0,1 mm (w ognisku soczewki), aż do średnic dość znacznych. Naświetlając nawarstwienie z różnych odległości „L" możemy otrzymywać różne gęstości energii padającego promieniowania na powierzchni obiektu. Przykładowo, wielkość napromienienia możemy obliczyć korzystając ze wzoru.

$$F = \frac{E}{\pi \cdot r^2} \qquad (2.5.2)$$

gdzie: E – jest energią wyjściową z lasera padającą na powierzchnię; r – jest promieniem „plamki" laserowej na nawarstwieniu.

Dwukrotne zwiększenie średnicy plamki laserowej na obiekcie daje czterokrotnie mniejszą gęstość energii. Trzykrotne zwiększenie plamki daje

(in the focal point of the lens), to relatively large diameters. Irradiating encrustation from various distances „L" allows for acquisition of various energy density of the radiation incident on the surface of the object. For example, we can calculate quantity size of irradiance using the following model.

$$F = \frac{E}{\pi \cdot r^2} \qquad (2.5.2)$$

where: E – is the output energy of the laser incident on the surface; r – is the radius of the laser „spot" on the encrustation.

Doubling the diameter of the laser spot on the object results in four times smaller energy density. Triple increase of the spot results in a

Laser.indb 153 2015-03-04 13:30:58

już dziewięciokrotne zmniejszenie gęstości energii. Tego typu układ optyczny stosowany jest z reguły do prób i wstępnych badań efektów czyszczenia oraz w przypadkach niejednorodnych nawarstwień. Rodzaj układu optycznego oraz sposób jego użycia decyduje o wielkości plamki na obiekcie. W praktyce konserwatorskiej wyróżniamy cztery podstawowe rodzaje kształtu wiązki laserowej:

a. walcowy – wiązka lasera jest prawie równoległa (skolimowana), o przekroju zwykle kołowym – regulację wielkości napromienienia uzyskuje się albo przez zmianę wielkości energii wyjściowej lub w wyniku zastosowania obiektywu typu „zoom";
b. stożkowy rozbieżny – wiązka lasera jest rozbiegającym się strumieniem fotonów o przekroju kołowym od średnicy najmniejszej (tuż na wyjściu z lasera) do „największej";
c. stożkowy zbieżny – wiązka lasera jest zbiegającym się strumieniem o przekroju kołowym, od średnicy największej do najmniejszej (wielkości średnicy plamki w ognisku soczewki);
d. stożkowy rozbieżny – bezpośrednio z wyjścia światłowodu energetycznego, uzyskując rozbiegający się strumień o przekroju kołowym od średnicy najmniejszej (tuż na wyjściu ze światłowodu o średnicy ułamka milimetra) do „największej".

ninefold decrease in energy density. This type of optical system is generally used for testing (including preliminary testing) of cleaning results and in case of heterogeneous layers. The type of the optical system and the way it is used determines the size of the spot on the object. There are four basic types of laser beam shape in the conservation practice.

a. cylindrical shape - the laser beam is almost parallel (collimated), with a generally circular cross-section - the quantity of irradiation is adjusted either by altering the quantity of the output energy or by using the „zoom" type lens.
b. divergent conical shape - the laser beam is a diverging flux of photons with a circular cross-section from the smallest diameter (just at the output of the laser) to the „largest";
c. convergent conical shape - laser beam is a converging flux with a circular cross-section, from the largest diameter to the smallest (the size of the spot diameter in the focal point of the lens);
d. divergent conical – this time directly from the output of the energetic optical fibre, resulting in a diverging stream with a circular cross-section from the smallest diameter (just at the fibre output diameter of a fraction of a millimetre) to the „largest".

Laser.indb 154 2015-03-04 13:30:58

Wszystkie cztery rodzaje wiązek zilustrowano na Rys.2.5.2, opisując podstawowe ich cechy poniżej.

ad a). Tego rodzaju wiązki z zasady wykorzystuje się do „produkcyjnego" czyszczenia jednorodnych nawarstwień, zabrudzeń, po uprzednim doborze najbardziej odpowiedniej wartości gęstości energii. Ewentualnej jej regulacji możemy dokonać przez zmianę energii wyjściowej z lasera lub za pomocą układu optycznego np. typu zoom.

ad b). Rozbieżną wiązkę lasera realizuje się przez wstawienie w tor wiązki wyjściowej, soczewki *ujemnej – rozpraszającej*. W zależności od odległości między soczewką a przedmiotem poddanym czyszczeniu, regulujemy – zmieniamy wartość gęstości energii.

ad c). Wiązkę zbieżną uzyskuje się dzięki zastosowaniu soczewki *dodatniej – skupiającej*, aby uzyskiwać po pierwsze: większe gęstości energii przy stałej wartości energii wyjściowej z lasera; po drugie: aby otrzymać jak najmniejszą wielkość plamki na czyszczonym obiekcie. Należy jednakże pamiętać, że nie można ogniskować wiązek laserowych o zbyt dużych energiach, ponieważ może wystąpić tzw. *iskra laserowa* – jonizacja powietrza (z towarzyszącym charakterystycznym dźwiękiem). Jeśli nastąpi to w bezpiecznej odległości od czyszczonej po-

All four types of beams are shown in Fig.2.5.2, with a description of their main characteristics below.

ad a). Such a beam is in general used to „productive" cleaning of homogeneous encrustation, soil, after selecting the most suitable values of energy density. If needed, the adjustment may be made by changing the output power of the laser or using an optical system, e.g. a zoom.

ad b). A divergent beam is obtained by inserting in the output beam path a *negative-diverging* lens. Depending on the distance adjustment between the lens and the object to be cleaned, we are changing the value of the energy density.

ad c). A convergent beam is obtained by using a *positive-converging* lens, in order to obtain firstly, higher energy densities at constant output energy from the laser; secondly, to obtain the smallest possible size of the spot on the object to be cleaned. One should not forget, however, that laser beams with too high energies should not be focused, as there may occur the so-called *laser spark* - air ionization (accompanied by a characteristic sound). If this happens at a safe

Laser.indb 155 2015-03-04 13:30:58

wierzchni obiektu, to większa część energii zostanie zaabsorbowana w powstałej plazmie i nie zostanie zaobserwowany efekt zwiększonego oczyszczania mimo zwiększania energii w impulsie laserowym. Tego zjawiska należy unikać z wielu powodów, o których będzie mowa w następnym rozdziale.

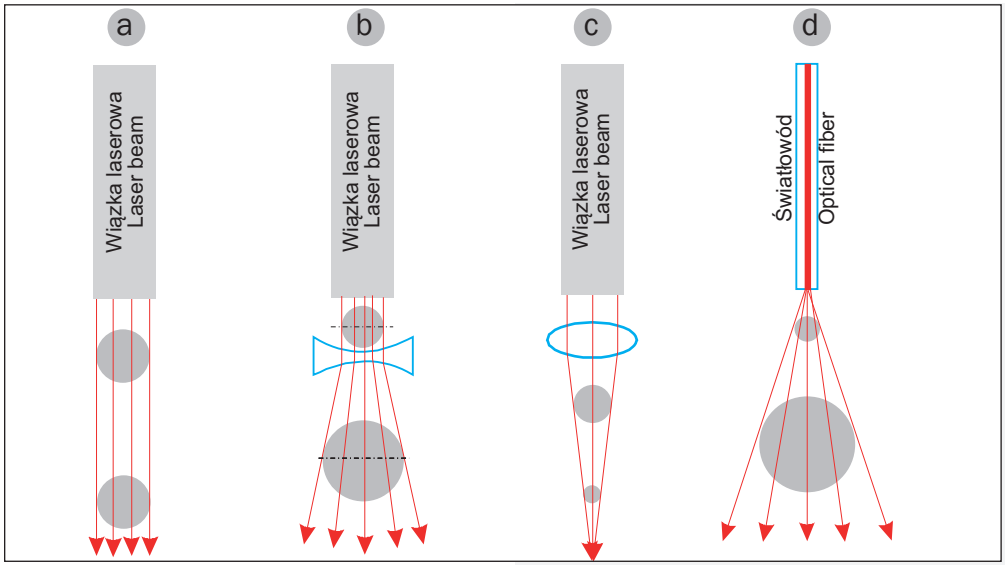
ad d). Rozbieżną wiązkę lasera uzyskuje się również przez wstawienie w tor wiązki wyjściowej układu optycznego, wprowadzającego promieniowanie do światłowodu energetycznego, a następnie poprzez jej wyprowadzenie. W zależności od odległości między wyjściem światłowodu a przedmiotem poddanym czyszczeniu, regulujemy – zmieniamy wartość gęstości energii. Istotne jest, że napromieniowując obiekt z różnych odległości, uzyskuje się różne gęstości energii, podobnie jak z soczewką. Tego typu układ optyczny stosowany jest z reguły do prób i wstępnych badań efektów czyszczenia oraz w przypadkach niejednorodnych nawarstwień i plam. Zaletą stosowania światłowodu lub wiązki światłowodów jest to, że rozkład gęstości energii w kierunku poprzecznym jest płaski tzw., *top hat*, najodpowiedniejszy w procesie czyszczenia powierzchni.

Obiektyw skupiający stosujemy z zasady do czyszczenia bardzo małych zanieczyszczonych obszarów (np. pozostałości po muchach), lub jak

distance from the object surface that is cleaned, the greater part of the energy will be absorbed in the resulting plasma and no effect of enhanced cleaning will be observed despite increasing the laser pulse energy. This phenomenon should be avoided for many reasons discussed in the next chapter. A focusing lens is generally used to clean very small contaminated areas (e.g. fly residues), and, as previously said, when no „strong" enough laser is available. The diameter of the laser spot for a typical lens, e.g. from a photo camera, may be several micrometres.

ad d). A divergent laser beam is also obtained by inserting in the path of the output beam an optical system, coupling radiation with an energetic optical fibre, and then drawing it out. The value of the energy density depends on the distance between the fibre output and the object to be cleaned. It is important that when irradiating an object from various distances, different energy densities are obtained, as in case of the lens. This type of optical system is generally used for testing (including preliminary testing) of cleaning results and in case of heterogeneous encrustation and stains. The advantage of using an optical fibre or a bundle of optical fibres is that the energy density distribution in the transverse direction is flat at maximum, so called "*top hat*", the most

Laser.indb 156 2015-03-04 13:30:58



Rys. 2.5.2. *Ilustracja praktycznych kształtów wiązki laserowej wykorzystywanej w renowacji – czyszczeniu powierzchni: a) – równoległa; b) – rozbieżna; c) – zbieżna; d) – rozbieżna, z płaszczyzny wyjściowej światłowodu.*

Fig. 2.5.2. *Illustration of practical shapes of the laser beam used in renovation - surface cleaning: a) - parallel; b) - divergent; c) - convergent; d) - divergent from the output plane of the fibre.*

powiedziano wcześniej, gdy nie dysponujemy odpowiednio „mocnym" laserem. Średnica plamki laserowej dla typowego obiektywu np. z aparatu fotograficznego może wynosić kilka mikrometrów.

Moc – oznaczana zwykle literą P jest wielkością fizyczną, która charakteryzuje szybkość przepływu „dawki" – energii promieniowania E w czasie t:

$$P = \frac{Q}{t} \qquad (2.5.3)$$

suitable in the process of surface cleaning.

Power – usually marked with the letter P is a physical quantity that characterises the flow rate of the „dose" - radiation energy E in time t:

$$P = \frac{Q}{t} \qquad (2.5.3)$$

Radiation power is measured in watts W and as above, the derived units can be milliwatts, kilowatts or megawatts.

Laser.indb 157 2015-03-04 13:30:58

Moc promieniowania mierzy się w watach W i podobnie jak wyżej, jednostkami pochodnymi mogą być: miliwaty, kilowaty czy też megawaty.

1 mW = 0,001 W = 10^{-3} W
1 kW = 1000 W = 10^{3} W
1 MW = 1.000.000 W = 10^{6} W

Laser generujący impulsy o mocy szczytowej rzędu megawatów jest najczęściej używany przy czyszczeniu powierzchni kamiennych. Jednym z najważniejszych zadań w technice konserwacji – jest dobór i dostarczenie właściwej dawki energii lub mocy promieniowania laserowego na jej oczyszczaną powierzchnię.

1 J = 1 W · 1 s
1 J = 1.000 W · 10^{-3} s
1 J = 1.000.000 W ·10^{-6} s
1 J = 1.000.000.000 W · 10^{-9} s

Natężenie napromienienia – lub inaczej gęstość mocy, oznaczana literą *I*, jest kolejną, bardzo użyteczna jednostką stosowaną w technologiach laserowych. W monografii będziemy używali zamiennie pojęć takich jak: natężenie napromienienia = intensywność promieniowania. Wielkość ta określa ilość energii w jednostce czasu na jednostkę powierzchni. Zwykle wielkość tej po-

1 mW = 0,001 W = 10^{-3} W
1 kW = 1000 W = 10^{3} W
1 MW = 1.000.000 W = 10^{6} W

The laser generating peak power pulses of the order of megawatts is most commonly used for cleaning stone surfaces. One of the most important tasks in the conservation technique is to select and provide the proper dose of energy or power of laser radiation onto the surface to be cleaned.

1 J = 1 W · 1 s
1 J = 1.000 W · 10^{-3} s
1 J = 1.000.000 W ·10^{-6} s
1 J = 1.000.000.000 W · 10^{-9} s

Irradiance intensity – or power density, marked with the letter *I*, is another very useful unit used in laser technology. This monograph interchangeably uses concepts such as irradiance intensity = radiation intensity. This value determines the amount of energy per unit of time per unit of surface. Usually the size of this surface, expressed in cm^2, is a cross-sectional area of a laser beam or an operating field of a beam on the object.

Average power – marked with the letter $P_{śr}$, is

Laser.indb 158 2015-03-04 13:30:59

wierzchni wyrażana w cm^2 jest polem przekroju poprzecznego wiązki laserowej lub polem pracy wiązki na obiekcie.

Moc średnia – oznaczana literą $P_{śr}$, wyrażana jest za pomocą iloczynu:

$$P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep} \qquad (2.5.4)$$

Parametry wyjściowe lasera impulsowego zostały zilustrowane na Rys. 2.5.3. $P(t)$ – moc lasera w funkcji czasu, t_{imp} - czas trwania impulsu laserowego, T – okres pracy (ilość czasu, w którym period $P(t)$ zostaje odtworzony), $f_{rep} = 1/T$ – szybkość repetycji impulsów (ilość impulsów na sekundę) oraz cykl pracy t_{imp}/T – stosunek czasu trwania impulsu do okresu pracy. Typowe wartości cyklu pracy w urządzeniach laserowych wykorzystywanych do czyszczenia dzieł sztuki są rzędu od 0,00001% do 0,001%.

W praktyce konserwatorskiej spotykamy się z promieniowaniem laserowym, które generowane jest w sposób impulsowy. Częstotliwość generowania takich impulsów w ciągu jednej sekundy określa się pojęciem *szybkości repetycji* $1/T$, czyli liczbą impulsów laserowych na sekundę. Producent urządzenia oprócz wielkości energii w impulsie, czasu jego trwania, kąta rozbieżności wiązki laserowej podaje

expressed as the following product:

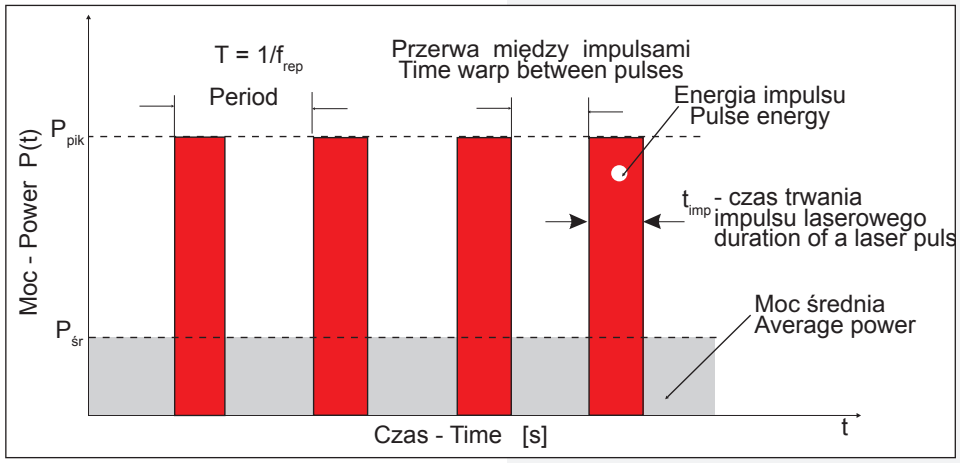
$$P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep} \qquad (2.5.4)$$

Pulse laser output parameters are illustrated in Fig.2.5.3. $P(t)$ – laser power as a function of time, t_{imp} – duration of laser pulse, T – operation period (amount of time, in which a period $P(t)$ is repeated), $f_{rep} = 1/T$ – pulse repetition rate (number of pulses per second) and the operation cycle t_{imp}/T – ratio of pulse duration to operation period. Typical values of operation cycle of laser devices used in cleaning of works of art are of the order ranging from 0.00001% to 0.001%.

In conservation practice we encounter laser radiation generated in a pulsed manner. The frequency of generation of such pulses per second is defined as repetition rate $1/T$, or the number of laser pulses per second. The device manufacturer, in addition to the magnitude of pulse energy, its duration, laser beam divergence angle, also provides the pulse repetition quantity. To determine the total „dose" of radiation energy emitted in the pulse regime, we have to determine the so-called pulse average power, which is kind of the equivalent power of continuous power laser radiation. The average power is determined by the formula

Laser.indb 159 2015-03-04 13:30:59

również wielkość repetycji impulsów. Aby określić całkowitą „dawkę" energii promieniowania emitowanego w sposób impulsowy musimy wyznaczyć tzw. moc średnią, będącą niejako mocą równoważną mocy ciągłej promieniowania laserowego. Moc średnią wyznacza się za pomocą wyrażenia (2.5.4), znając energię w pojedynczym impulsie oraz częstotliwość ich generacji w ciągu sekundy. Moc średnią ilustruje rys. 2.5.3.



Rys. 2.5.3. *Ilustracja „mocy szczytowej" i „mocy średniej" promieniowania emitowanego przez laser impulsowy pracujący z repetycją.*

W poniższej Tabeli 2.5.2, przytacza się wielkości mocy średniej wybranych systemów laserowych opisanych w literaturze, służących do renowacji – czyszczenia powierzchni obiektów zabytkowych.

(2.5.4), knowing the energy in a single pulse and the frequency of their generation per second. Fig.2.5.3 illustrates average power.

Fig. 2.5.3. I*llustration of „peak power" and „average power" of the radiation emitted by a pulse laser operating with repetition.*

The Table 2.5.2 below cites the quantities of average power of selected laser systems as described in the literature, used in the renovation - cleaning of the surface of historic objects.

Laser.indb 160 2015-03-04 13:30:59

Tabela 2.5.2. Laserowe systemy czyszczące **Table 2.5.2. Laser cleaning systems**

FIRMA / COMPANY	MODEL	RODZAJ MATERIAŁU AKTYWNEGO / ACTIVE MATERIAL TYPE	DŁUG. FALI EMISJI / EMISSION WAVELENGTH [nm]	CZAS TRWANIA IMPULSU / PULSE DURATION [µs]	MOC ŚREDNIA / AVERAGE POWER [W]	DOSTARCZANIE IMPULSU LASEROWEGO / LASER PULSE DELIVERY
Quantel	Laserblast					
	50;	Nd:YAG	1064	0,025;	10;	Światłowód / Optical fibre
	500;	Nd:YAG	1064	0,010;	20;	Światłowód / Optical fibre
	1000;	Nd:YAG	1064	0,012;	40;	Światłowód / Optical fibre
	2000;	Nd:YAG	1064	0,012	75	Światłowód / Optical fibre
Thales	NL 220	Nd:YAG	1064	0,07	30	Pantograf / Pantograph
EL.EN.SpA	SmartClean	Nd:YAG	1064	20	20	Światłowód / Optical fibre
EL.EN.SpA	EOS 1000	Nd:YAG	1064	50 – 120	20	Światłowód / Optical fibre
EL.EN.SpA	EOS 1340	Nd:YAG	1340	60 – 120	14	Światłowód / Optical fibre
EL.EN.SpA	DW 400	Nd:YAG	1064	1000 – 20000	40	Mikroskop / Microscope
Lambda Scientifica	Artlight; Artlaser	Nd:YAG	1064	0,008	5 11,5	Światłowód / Optical fibre Bezpośrednio / or Directly
Quanta System	Palladio; Michelangelo Cleaner 500	Nd:YAG Nd:YAG Nd:YAG	1064/532 1064/532 1064	0,006	10 12 50	Pantograf / Pantograph Pantograf / Pantograph Pantograf / Pantograph
Art. Innovation	LCS	Ekscimer	248	0,020	30	Pantograf / Pantograph
IOE – WAT	ReNOVALaser					
	1;	Nd:YAG	1064	0,006	2	Światłowód / Optical fibre
	2;	Nd:YAG	1064/532	0,008	5	Pantograf / Pantograph
	5;	Nd:YAG	1064/532 355/266	0,010	10	Pantograf / Pantograph
IOE – WAT	ReNOVALaser PIKO	Nd:YAG	1064 1064/532 1064/532 355/266/213	0,00006	3 1,7 1,2 0,8	Układ zwierciadeł / Mirrors arrangement
IOE – WAT	ReNOVALaserb 2936	Er:YAG	2936	60 – 200	2	Pantograf / Pantograph Bezpośrednio
Improgesa/LSI		Nd:YAG	1064	0,015	8,4	Pantograf / Pantograph
MPA	Maestro	Nd:YAG	1064	0,007	6	Światłowód / Optical fibre
Lynton Lasers	Sparta Atena Zenith	Nd:YAG Nd:YAG Nd:YAG	1064 1064/532 1064	0,005 0,010 0,010	5 10 20	Pantograf / Pantograph Pantograf / Pantograph Pantograf / Pantograph

Laser.indb 161 2015-03-04 13:30:59

W tym podrozdziale przedstawiono wielkości i jednostki miar charakteryzujące promieniowanie laserowe, służące do określania odpowiednich „dawek" stosowanych w praktyce konserwatorskiej. Umiejętne posługiwanie się nimi nie tylko ułatwi pracę konserwatora, ale także znajdzie swoje odzwierciedlenie podczas wymiany wspólnych doświadczeń. Jak pokazuje praktyka, do procesu czyszczenia laserem należy zawsze podchodzić bardzo ostrożnie – „przede wszystkim nie szkodzić". Proces czyszczenia należy zaczynać zawsze od jak najmniejszych gęstości energii, takich, aby nie były widoczne żadne zmiany spowodowane oddziaływaniem promieniowania laserowego, „strzelając" impulsem laserowym nawet kilkanaście razy w to samo miejsce. Każdy obiekt jest jedynym w swoim rodzaju. Dzieła sztuki nie mogą być testowane w sposób destruktywny (próbki do badań - testowania są niekiedy niemożliwe do osiągnięcia), a stany powierzchni są granicznie różne dla przeprowadzania nawet setek symulacji. Szereg zanieczyszczających skorup formowało się setki i tysiące lat, często w jedynej swego rodzaju specyficznej atmosferze i warunkach klimatycznych dziś nie do odtworzenia.

Większość badaczy koncentruje się głównie na jakości uzyskiwanego czyszczenia przy użyciu lasera, a nie na mechanizmach, za pomocą których zostało ono osiągnięte. Istotna trudność polega na

This section lists quantities and units of measure characterising laser radiation for determining the appropriate „doses" used in conservation practice. Their skilful use not only will facilitate the work of the conservator, but will also be reflected in the common exchange of experiences. As practice shows, laser cleaning process should always be approached very cautiously - „first, do no harm". The cleaning process should always begin from the lowest energy density, so that no changes are visible that are due to interaction of laser radiation, „firing" the laser pulse even several times in the same spot. Each object is unique. Works of art cannot be destructively tested (test samples are sometimes impossible to obtain) and the surface states are extremely different to perform even hundreds of simulations. A number of contamination crusts have been formed over hundreds and thousands of years, often in a unique, specific atmosphere and climatic conditions that cannot be today recreated.

Most researchers focus primarily on the quality of cleaning obtained using a laser, and not on the mechanisms by which it was achieved. A major difficulty is related to problems associated with constructing a theoretical model for a specific encrustation and a specific material with regard

Laser.indb 162 2015-03-04 13:30:59

kłopotach związanych ze skonstruowaniem modelu teoretycznego dla konkretnego nawarstwienia i konkretnego materiału z uwzględnieniem jego realnych właściwości. Zagadnienie to jest nieporównywalnie bardziej skomplikowane w przypadku substancji o nieznanym składzie chemicznym i strukturze, a z takim mamy do czynieniana co dzień w konserwacji. Laser nie jest jednakże panaceum. Podobnie jak każde inne narzędzie, laser może nadawać się idealnie i być jedynym narzędziem, ale są obiekty, do których nie nadaje się wcale. Jeśli używa się go nieodpowiednio lub nieostrożnie, może on spowodować nieodwracalne uszkodzenie obiektu. Natomiast doświadczony i dobrze wprawiony konserwator uzyska wspaniałą precyzję i doskonałą kontrolę, jaka nie była uprzednio dostępna przy użyciu dotychczasowych technik i metod czyszczących.

2.5.3 OSZACOWANIA GĘSTOŚCI ENERGII I MOCY W PRAKTYCE

Lasery o pracy ciągłej charakteryzowane są za pomocą emitowanej mocy. Lasery impulsowe charakteryzowane są za pomocą emitowanej w impulsie energii. Ponieważ moc z definicji jest energią dostarczaną w jednostce czasu, laser impulsowy o energii E i o czasie trwania impulsu t_{imp} posiada moc chwilową $P_{pik} = E / t_{imp}$, a słowo „chwilowa" oznacza, że laser impulsowy dostarcza moc P jedynie w przeto its actual properties. This issue is incomparably more complex in the case of substances of unknown chemical composition and structure, such as are encountered on an everyday basis in conservation. The laser, however, is not a cure-all. Like any other tool, the laser can be a perfectly suitable and the only tool, but there are objects for which it is not suitable at all. If used improperly or carelessly, it may cause irreversible damage to the object. However, an experienced and skilful conservator will enjoy great precision and perfect control, unprecedented when using previous cleaning techniques and methods.

2.5.3 ESTIMATING ENERGY AND POWER DENSITY IN PRACTICE

Continuous wave lasers are characterised by the power emitted. Pulsed lasers are characterised by the emitted energy in the pulse. Since power is, by definition, the energy delivered per unit of time, a pulse laser with the energy of E and pulse duration of t_{imp} has instantaneous power $P_{pik} = E / t_{imp}$, and the word „instantaneous" means that the pulse laser delivers power P only in the time interval defined by the duration t_{imp} of the laser pulse. For pulsed lasers operating with pulse repetition, the following definition has been applied: average power $P_{śr}$, i.e. total

Laser.indb 163 2015-03-04 13:30:59

dziale czasu określonym czasem trwania t_{imp} impulsu laserowego. Dla laserów impulsowych pracujących z repetycją impulsów, wprowadza się definicję: moc średnia $P_{śr}$, czyli całkowitą energię dostarczoną w ciągu jednej sekundy. Oznacza to, że moc średnia lasera impulsowego pracującego z repetycją impulsów ma moc średnią: $P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep}$.

Jako przykład rozważmy laser ReNOVALaser 2, generujący energię 960 mJ w czasie t_{imp} = 10 ns i pracujący z repetycją 10 impulsów na sekundę. Moc „chwilowa" $P_{pik} = E/t_{imp}$ = 960 mJ/10 ns = 960 · 10^{-3} J/ 10 · 10^{-9} s = 96 · 10^{6} W = 96 MW. Moc średnia, jest z kolei $P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep}$ = 10 s^{-1} · 0,96 J = 9,6 W. Moc „chwilowa" jest często nazywana mocą „szczytową".

Lasery cw charakteryzowane są jednym tylko parametrem, a mianowicie: mocą. Dla przykładu 5 W laser Ar – cw dostarcza energię równą 5 J w każdej sekundzie. Aby dostarczyć energię 20 J wymagana jest ekspozycja w czasie 4 sekund (20 J/ 5 W = 4 s). Z kolei aby dostarczyć tę samą energię 20 J za pomocą Lasera ReNOVALaser 2, wymagany czas ekspozycji wynosi niewiele ponad 2 sekundy (20 J/9,6 W ≈ 2 s). Nie będzie to jednak ten sam efekt oddziaływania energii laserowej z materią.

Poniżej został przedstawiony prosty, praktycz-

energy delivered per second. This means that the average power of a pulse laser operating with pulse repetition has the average power: $P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep}$.

As an example, let us consider a ReNOVALaser 2, generating energy of 960 mJ in the time t_{imp} = 10 ns and operating with repetition of 10 pulses per second. „Instantaneous" power $P_{pik} = E/t_{imp}$ = 960 mJ/10 ns = 960 · 10^{-3} J/ 10 · 10^{-9} s = 96 · 10^{6} W = 96 MW. Average power is, $P_{śr} = E_{imp} \cdot f_{rep}$ = 10 s^{-1} · 0,96 J = 9,6 W. „Instantaneous" power is often called „peak" power.

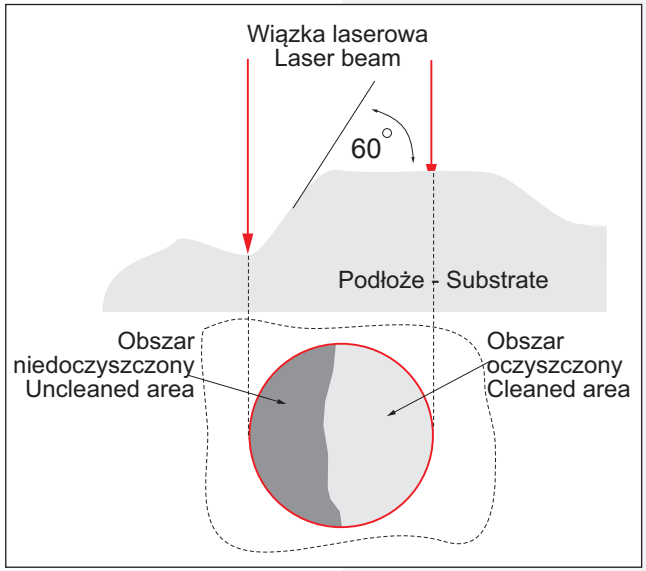
Cw (continuous wave) lasers are characterised by only one parameter, namely power. For example, a 5 W Ar - cw laser delivers energy equal to 5 J every second. To deliver 20 J of energy, exposure time of 4 seconds (20 J/5 W = 4 s) is required. On the other hand, in order to provide the same energy of 20 J using ReNOVALaser 2, the required exposure time is slightly over 2 seconds (20 J/9.6 W ≈ 2 s). But this will not be the same effect of laser energy interacting with matter.

Below there is a simple, practical example of removing encrustation presented. Let us

Laser.indb 164 2015-03-04 13:30:59

ny przykład usuwania nawarstwienia. Załóżmy, że wiązka impulsowego lasera ReNOVALaser 2 została tak ukształtowana, że jej pole przekroju wynosi 25 mm^2 = 0,25 cm^2. Padając prostopadle na próbkę otrzymamy wielkość „fluencji" równą: F = 0,96 J/0,25 $cm^2 \approx$ 4J /cm^2. Ta sama wiązka z kolei padając na powierzchnię próbki nachylonej pod kątem 30 stopni zapewni jedynie wielkość „fluencji" F = 2 J/cm^2. Co się stanie jeśli wiązka w przekroju poprzecznym ma pole powierzchni 1 cm^2, a w obszarze wiązki są powierzchnie nachylone? Ilustruje to Rys. 2.5.4.

W takich przypadkach należy skierować wiązkę lasera prostopadle do nachylonej powierzchni. Ale jaka jest gęstość energii w ciemniejszym obszarze? To zagadnienie pozostawiamy Szanownemu Czytelnikowi do oszacowania.



Rys. 2.5.4. *Ilustracja zmiany gęstości energii w obszarze objętym wiązką lasera. Widok z boku (górny rysunek) i widok z góry (dolny rysunek). Część oczyszczanego obszaru (lewa strona na dolnym rysunku) nie została oczyszczona.*

assume that the beam of the ReNOVALaser 2 pulse laser is formed so that its cross-sectional area is 25 mm^2 = 0,25 cm^2. With the perpendicular incidence on the sample, we will obtain the quantity of „fluence" equal to: F = 0,96 J/0,25 $cm^2 \approx$ 4J /cm^2. The same beam, when falling on the sample surface inclined at an angle of 30 degrees will provide only the quantity of „fluency" F= 2 J / cm^2. What will happen if the beam in cross-section has a surface area of 1 cm^2 and there are inclined surfaces within the area of the beam? This is illustrated in Fig.2.5.4.

In such cases, the laser beam should be directed perpendicular to the inclined surface. But what is the energy density in the darker area? We shall leave this problem for the consideration of the Reader.

Fig. 2.5.4. *Illustration of a change in energy density in the area covered by the laser beam. Side view (upper figure) and top view (lower figure). Part of the area to be cleaned (left side in the lower figure) has not been cleaned.*

Laser.indb 165 2015-03-04 13:30:59

2.6 RODZAJE LASERÓW

2.6.1 UWAGI WSTĘPNE

Najbardziej ogólnym, a jednocześnie bardzo popularnym stał się podział laserów według stanu skupienia ośrodka aktywnego – wzmacniającego. I tak lasery możemy dzielić na: lasery na ciele stałym, lasery gazowe, cieczowe i lasery półprzewodnikowe. Do laserów na ciele stałym nie włączono, jak można zauważyć, laserów półprzewodnikowych, które historycznie stanowią oddzielną grupę klasyfikacyjną.

Szczegółowe rozważania dotyczące licznych rodzajów laserów wymagają często odrębnej wiedzy specjalistycznej z różnych dziedzin: fizyki, elektroniki i chemii. W zasadzie każdemu z nich poświęcono osobne monografie, a ich dokładny opis wychodzi daleko poza obszar tej Monografii. Należy jednak w tym krótkim wprowadzeniu nadmienić, że istnieje czwarty stan materii tzw. „plazma", a zwłaszcza plazma wytwarzana przy oddziaływaniu impulsowego lasera dużej mocy z materią, w której zachodzi kierunkowe wzmocnienie emisji promieniowania rentgenowskiego. Są to lasery „X" lub inaczej lasery rentgenowskie.

Nasze rozważania dotyczące typów laserów będą koncentrować się głównie na tych laserach,

2.6 LASER TYPES

2.6.1 PRELIMINARY REMARKS

The most general, and also very popular classification of lasers is based on the physical state of the active – amplifying medium. Accordingly, lasers can be divided into solid-state lasers, gas lasers, liquid lasers and semiconductor lasers. A group of solid-state lasers does not include, as can be seen, semiconductor lasers, which historically are a separate classification type .

Detailed discussion of various types of lasers often require a specific expertise in different fields, including physics, electronics and chemistry. In fact, each of them had its own monographs, and their exact description goes far beyond the area of this Monograph. However, we shall say in this short introduction that there is a fourth state of matter, the so-called "plasma", in particular the plasma generated during an interaction of a high power pulse laser and matter, involving a directional amplification of x-ray radiation emission. These lasers are called "X" lasers or x-ray lasers.

Our presentation of the types of lasers

Laser.indb 166 2015-03-04 13:30:59

które zdolne są pracować głównie w sposób impulsowy i dostarczać odpowiednich parametrów wiązki laserowej: energii w impulsie (mocy średniej), czasu trwania impulsu, długości fali emisji, szczególnie przydatnych w laserowych urządzeniach i systemach wykorzystywanych w diagnostyce i konserwacji dzieł sztuki.

Pomimo iż minęło prawie 55 lat od zbudowania pierwszego lasera w 1960r., a akcję laserową zaabsorbowano w ponad stu materiałach, to liczba dostępnych komercyjne laserów jest ograniczona. W Tabeli 2.6.1 podano kilka najważniejszych typów laserów na ciele stałym, z kolei w Tabeli 2.6.2, laserów gazowych.

Bardziej dociekliwym Czytelnikom, a zainteresowanych innymi rodzajami laserów, w Bibliografii Rozdziału 2, podano literaturę (w języku polskim) umożliwiającą rozszerzenie i pogłębienie wiedzy na ten temat.

2.6.2 LASERY NA CIELE STAŁYM

Termin *laser na ciele stałym* stosowany jest w przypadku laserów, w których ośrodkiem czynnym – wzmacniającym jest szkło lub kryształ z domieszką jonów pierwiastków ziem rzadkich. Pierwszym laserem na ciele stałym i pierwszym zbudowanym

will focus on those lasers that are able to work mainly in a pulsed regime and provide appropriate parameters of the laser beam: pulse energy (average power), pulse duration time, emission wavelength, which are particularly useful in laser devices and systems used in diagnostics and conservation of artworks.

Although more than half a century has passed since the first laser was constructed, with lasing absorbed in more than one hundred materials (1960), the number of commercially available lasers is limited. Several major types of solid-state lasers are presented in Table 2.6.1, while those of gas lasers are included in Table 2.6.2.

More inquisitive Readers, interested in other types of lasers, are referred to the References at the end of Chapter 2, where they can find literature (in Polish) that can broaden their knowledge.

2.6.2 SOLID-STATE LASERS

The term *solid-state laser* is used in case of lasers which use as the active - amplifying medium glass or crystal doped with ions of rare

Laser.indb 167 2015-03-04 13:30:59

był laser rubinowy. Powstał on po wprowadzeniu do syntetycznego kryształu Al_2O_3 – szafiru, niewielkiej ilości trójwartościowych jonów chromu – Cr^{3+}. Uzyskana generacja rozbudziła apetyty naukowców, których badania rozszerzyły możliwości wykorzystania innych pierwiastków (jonów aktywnych) w odmiennych osnowach, szkłach i innych kryształach. I tak powstał laser neodymowy, nazywany tak w związku z wykorzystaniem jonów neodymu w szkle krzemianowym i fosfatowym. Jednak najbardziej efektywnym i efektownym okazał się, jak do tej pory, laser na syntetycznym krysztale $Y_3Al_5O_{12}$ – *granat itrowo – aluminiowy* (popularnie zwany YAG-iem), do którego wprowadzono domieszkę w postaci trójwartościowych jonów neodymu – Nd^{3+}. Opracowano również inną klasę laserów na ciele stałym, charakteryzującą się szerokim widmem emisji, a tym samym posiadającą możliwość przestrajania długości fali generacji. W tych laserach, jak np. w laserze aleksandrytowym, jony chromu Cr^{3+} wprowadzone są do kryształu $BeAl_2O_4$ – chryzoberylu, a powstały materiał aktywny w świetle sztucznym przybiera piękną fioletowo czerwoną barwę. Kolejnym laserem okazał się laser tytanowy – Ti w krysztale szafiru, o bardzo szerokim widmie przestrajania: od 650 nm do 1150 nm, za pomocą, którego uzyskuje się sprawna generację impulsów femtosekundowych.

Lasery na ciele stałym są pompowane optycz-

earth elements. The first solid-state laser, and also the first laser to be built, was a ruby laser. It was created after introducing to a synthetic Al_2O_3 crystal – sapphire, a small amount of trivalent chromium ions – Cr^{3+}. The generation achieved stimulated the appetite of scientists whose research extended the possibilities for using other elements (active ions) in different matrices, glasses and other crystals. And this is how a neodymium laser was created, so called due to the use of neodymium ions in silicate and phosphate glass. However, the most effective and impressive laser, so far, is thought to be the synthetic $Y_3Al_5O_{12}$ crystal - *yttrium aluminium garnet* - (commonly called YAG), which has been doped with trivalent neodymium ions - Nd^{3+}. Recently, the other class of solid state lasers have been developed, characterised by a broad emission spectrum, thereby having the ability to tune generation wavelengths. In these lasers, e.g. in the alexandrite laser, chromium Cr^{3+} ions are introduced into $BeAl_2O_4$ - chrysoberyl crystal, and the resulting active material in artificial light assumes a beautiful violet-red colour. Next important laser was Titanium laser – Ti ions in sapphire crystal, with a very large spectral tuning range: from 650 nm to 1150 nm. It allowed efficient generation of femtosecond pulses.

Laser.indb 168 2015-03-04 13:30:59

nie w szerokim przedziale widmowym za pomocą lamp błyskowych lub innych źródeł promieniowania optycznego o dużym natężeniu (np. diodami laserowymi).

Solid-state lasers are optically pumped in a wide spectral range using flash lamps or other high intensity sources of optical radiation (e.g. laser diodes).

Tabela 2.6.1. Lasery na ciele stałym.

Table 2.6.1. Solid-state lasers

Laser	Długość fali/ Wavelength [μm]	Charakter pracy/ Operation type	Sprawność/ Efficiency	Typowe zastosowania/ Typical applications
Rubin	0,694	Impulsowy (0,01÷10) imp./s	0,1÷0,5%	Pomiar odległości, holografia, obróbka materiałów
Nd: YAG	0,940; 1,064; 1,318; 1,338 1,352; 1,444	Ciągłego działa. Lub impulsowy (0,01÷10^4) imp/s	Pompa: lampowa (0.1÷3)% Diodowa (5÷15)%	Pomiar odległości i podświetlanie celów, obróbka materiałów
Nd: szkło	1,06	Impulsowy (0,1÷10) imp/s	(1÷5)% pompa lampowa	Obróbka materiałów mikrosynteza
Ti: szafir	Przestrajalna od 0,665÷1,13 max. Energii między 0,75÷0,85	Ciągłego działania lub impulsowy do 30 imp/s	0,01% pompa- laser Ar – cw; 0,1% pompa-II-ga harmoniczna lasera Nd	Separacja izotopów; badania biomedyczne
Aleksandryt	Przestrajalna od 0,71÷0,82 z max. W 0,755	Ciągłego działania lub do 50 imp/s	0,3% pompa lampowa	Technika lidarowa medycyna, spektroskopia
Nd:YLF	1,05 oraz 1,3	Impulsowy lub ciągłego działania	0,3% pompa - dioda GaAs	Komunikacja światłowodowa
Er:szkło	1,54	Impulsowy do 5 imp/s	0,2% pompa lampowa	Pomiar odległości – bezpieczny dla oka
Er:YAG	2,94	Impulsowy do 25 imp/s	1,5% pompa lampowa	Medycyna, badania biomedyczne
Co:MgF_2	Przestrajalna od 1,75÷2,50	Impulsowy do 10 imp/s	pompa laser YAG na dług. 1,3 μm	Monitoring środowiska, medycyna
Ho:YAG	2,1	Ciągłego działania lub do 20 imp/s	1,3% pompa lampowa	Medycyna
Lasery na centrach barwnych	Przestrajalna od 1,45÷1,75 oraz od 2,3÷3,45	Ciągłego działania lub do 10^8 imp/s	≤5% pompa laserowa	Spektroskopia molekularna

Laser.indb 169 2015-03-04 13:30:59

Laser	Długość fali/ Wavelength [µm]	Charakter pracy/ Operation type	Sprawność/ Efficiency	Typowe zastosowania/ Typical applications
Ruby	0.694	Pulse (0,01÷10) pulses/s	0,1÷0,5%	Range-finding, holography, materials processing
Nd: YAG	0,940; 1,064; 1,318; 1,338 1,352; 1,444	free-running or pulse (0,01÷10^4) pulses/sec	Pump: lamp type (0.1÷3)% Diode type (5 ÷15)%	Range-finding and target highlighting (designation), materials processing
Nd: glass	1.06	Pulse (0,1÷10) imp/s	(1÷5)% lamp type pump	Materials processing microsynthesis
Ti: sapphire	Tunable from 0,665÷1,13 max. Energy between 0,75÷0,85	free-running or pulse up to 30 pulses/sec	0.01% Pump - Ar laser – cw; 0,1% 2nd harmonic pump of a Nd laser	Separation of isotopes; Biomedical research
Alexandrite	Tunable from 0,71÷0,82 with max. W 0,755	Free-running or up to 50 pulses/sec	0.3% lamp type pump	Lidar technology, medicine, spectroscopy
Nd:YLF	1,05 and 1,3	Free-running or pulse	0.3% pump - GaAs diode	Optical fibre communication
Er:glass	1.54	Pulse up to 5 pulses/sec	0.2% lamp type pump	Range-finding - safe for eyes
Er:YAG	2.94	Pulse up to 25 pulses/sec	1.5% lamp type pump	Medicine, biomedical research
Co:MgF_2	Tunable from 1,75 ÷ 2,50	Pulse up to 10 pulses/sec	pump YAG laser for width 1,3 µm	Monitoring of environment, medicine
Ho:YAG	2.1	Free-running or up to 20 pulses/sec	1.3% lamp type pump	Medicine
Colour centre lasers	Tunable from 1,45 ÷ 1,75 and from 2,3 ÷ 3,45	continuous wave or up to 10^8 pulses/sec	≤ 5% laser pump	Molecular spectroscopy

Laser.indb 170 2015-03-04 13:30:59

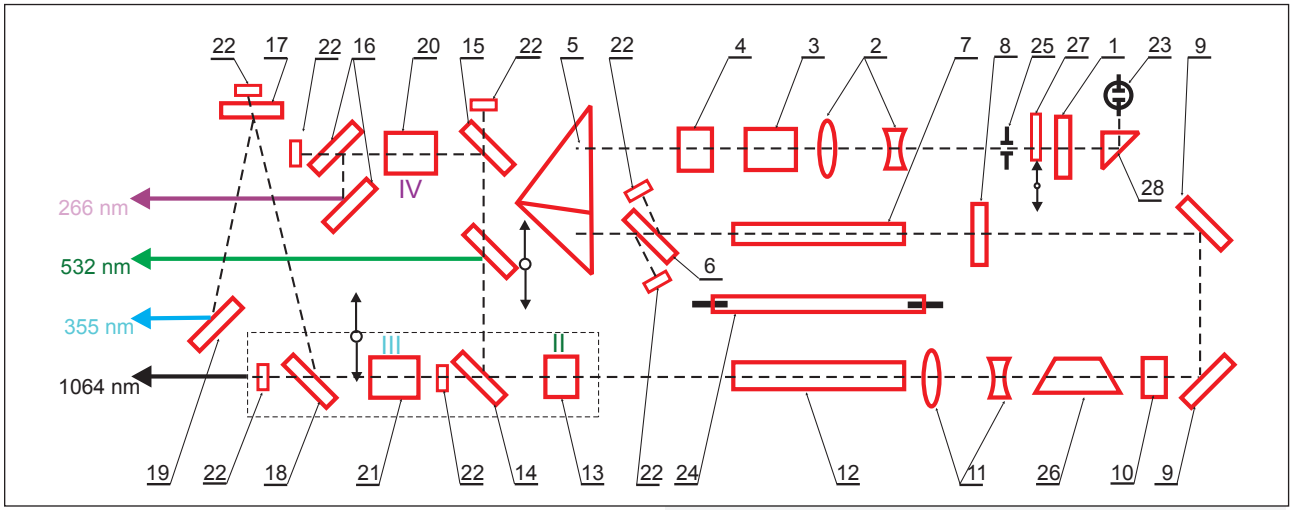
2.6.2.1 Generacja wyższych harmonicznych promieniowania laserowego

Zwielokrotnienie częstotliwości laserów na ciele stałym, tzn. zmianę jednej długości fali na inną – zwykle na dwukrotnie krótszą, osiąga się za pomocą tzw. konwerterów częstotliwości – odpowiednich kryształów nieliniowych typu: KDP, KTP, BBO, itp. Sprawność konwersji zależy od jakości kryształu, długości fali, natężenia promieniowania (ściślej od kwadratu natężenia) i waha się w granicach od kilku do 80%. W wyniku oddziaływania promieniowania danego lasera z kryształem nieliniowym przy spełnieniu określonych warunków, zachodzi nieliniowy proces generacji II harmonicznej (SHG - Second Harmonic Generation) i na wyjściu rezonatora z kryształem nieliniowym otrzymuje się promieniowanie o dwukrotnie mniejszej długości fali. Wstawienie następnego kryształu umożliwia ponowne przetworzenie na kolejną wyższą harmoniczną, aż do piątej włącznie, jak w systemach laserowych ReNOVALaser IV i V. Wymienione tu kryształy są kryształami higroskopijnymi, stąd muszą być utrzymywane w temperaturze wyższej niż temperatura otoczenia. Na rys.2.6.1 przedstawiono schemat lasera Nd:YAG, stosowany w urządzeniu ReNOVALaser IV – emitujący cztery długości fal.

2.6.2.1 Generation of higher harmonics of laser radiation

Multiplying the frequency of solid-state lasers, i.e. changing one wavelength to another - usually twice as short, is achieved using so-called frequency converters - appropriate non-linear crystals of the type KDP, KTP, BBO, etc. The conversion efficiency depends on the quality of the crystal, wavelength, radiation intensity (more precisely, square of the intensity) and ranges from a few per cent to 80%. As a result of the interaction of radiation of a specific laser with a non-linear crystal, under certain conditions, there occurs a non-linear 2nd harmonic generation process (SHG - Second Harmonic Generation). At the output of a non-linear crystal, radiation with a wavelength twice as short is obtained. Inserting another crystal makes it possible to reprocess to the next higher harmonic up to the fifth inclusive, as in ReNOVALaser IV and V. The crystals listed here are hygroscopic, so they need to be maintained at a temperature higher than the ambient temperature. Fig.2.6.1 presents a diagram of Nd: YAG laser, used in the ReNOVALaser IV device - emitting four wavelengths.

Laser.indb 171 2015-03-04 13:30:59



Rys.2.6.1. *Schemat optyczny lasera z urządzenia ReNOVALaser IV. 1 – zwierciadło całkowicie odbijające o współczynniku odbicia R > 99,5% dla λ = 1064 nm; 2 – teleskop Galileusza; 3 – komórka Pockelsa; 4 – rotator; 5 – narożny pryzmat sześcienny; 6 – polaryzator dielektryczny; 7 – pręt Nd:YAG generatora; 8 – zwierciadło wyjściowe; 9 – zwierciadło obrotowe; 10 – rotator polaryzacji liniowej o kąt 45°; 11 – teleskop; 12 – pręt Nd:YAG wzmacniacza, 13 – kryształ KTP do przetwarzania na 2-gą harmoniczną; 14÷19 – zwierciadła dichroiczne – selektywne, tzw. separatory długości fal; 20 – kryształ BBO do przetwarzania na 4-tą harmoniczną; 21 – kryształ KDP do przetwarzania na 3-cią harmoniczną; 22 – filtry absorpcyjne, 23 – detektor promieniowania 1064 nm; 24 – lampa błyskowa; 25 – diafragma; 26 – pryzmat Dove'a; 27 – migawka; 28 – pryzmat prostokątny.*

Fig.2.6.1. *Laser optical diagram of the ReNOVALaser IV device. 1 - fully reflecting mirror with reflectivity of R> 99.5% for λ = 1064 nm; 2 - Galileo's telescope; 3 - Pockels cell; 4 - rotator; 5 - corner cube prism; 6 - dielectric polariser; 7 - Nd: YAG oscillator rod; 8 - output mirror; 9 - rotating mirror; 10 - linear polarisation rotator with 45° angle; 11 - telescope; 12 - Nd: YAG amplifier rod, 13 - KTP crystal for transformation to 2nd harmonic; 14÷19 - dichroic - selective mirrors, so-called wavelength separators; 20 - BBO crystal for transformation to 4-th harmonic; 21 - KDP crystal for transformation to 3rd harmonic; 22 - absorption filters, 23 - 1064 nm radiation detector; 24 - flash lamp; 25 - diaphragm; 26 - Dove prism; 27 - shutter; 28 - rectangular prism.*

2.6.2.2 Lasery przestrajalne na ciele stałym

Materiałem aktywnym laserów przestrajalnych na ciele stałym są kryształy domieszkowane jonami metali o charakterystycznych własnościach, wynikających głównie z ich struktury atomowej. Są to jony chromu Cr, tytanu Ti lub kobaltu Co, a więc

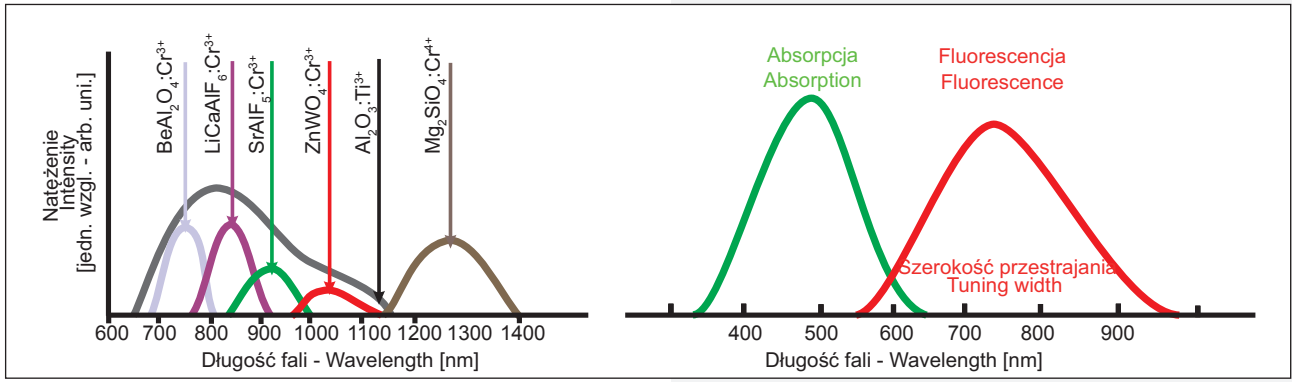
2.6.2.2 Tunable solid-state lasers

The active material of tuneable solid-state lasers is provided in the form of crystals doped with ions of metals with characteristic properties, mainly due to their atomic structure. These include ions of Cr chromium, Ti Titanium and

Laser.indb 172 2015-03-04 13:30:59

metali z niezapełnionymi wewnętrznymi powłokami elektronowymi. W wyniku oddziaływania tych jonów z polem elektrycznym sieci krystalicznej następuje rozszczepienie poziomów energetycznych. W wyniku pompowania optycznego, najczęściej z wykorzystaniem laserów, może być osiągnięta inwersja obsadzeń. Materiały te charakteryzują się szerokim widmem luminescencji i mogą generować dowolną długość fali z tego zakresu. Wynika stąd możliwość płynnej zmiany generowanej długości fali. Przestrajanie może odbywać się za pomocą siatek dyfrakcyjnych lub pryzmatów. Na rys.2.6.2 zilustrowano przedziały generacji długości fali niektórych laserów przestrajalnych na ciele stałym.

Co cobalt, which are metals with incompletely filled inner electron shells. As a result of the interaction of these ions with the electric field of a crystal lattice, there occurs a separation of energy levels. As a result of optical pumping, usually involving the use of a laser, inversion may be achieved. These materials are characterised by a wide luminescence spectrum and they can generate any wavelength within this range. Thus the possibility of a smooth change of the generated wavelength. Tuning may be done using diffraction gratings or prisms. Fig.2.6.2 illustrates generation ranges of wavelengths for some turneable solid-state lasers.



Rys.2.6.2. *Obszary generacji promieniowania przez niektóre przestrajalne lasery na ciele stałym.*

Fig.2.6.2. *Areas of radiation generation by some tunable solid-state lasers.*

Laser.indb 173 2015-03-04 13:30:59

Dotychczas praktyczne zastosowanie znalazły takie lasery przestrajalne jak: szafir domieszkowany tytanem – $Al_2O_3:Ti^{3+}$, tzw. laser tytanowy i laser forsterytowy $Mg_2SiO_4:Cr^{4+}$. Obszary przestrajania laserów, tj. 670÷1180 nm dla $Al_2O_3:Ti^{3+}$ i 1150÷1350 nm, dla $Mg_2SiO_4:Cr^{4+}$ można znacznie rozszerzyć, wykorzystując oddziaływanie generowanego przez te lasery promieniowania z kryształami o własnościach nieliniowych i generacją kolejnych harmonicznych.

2.6.3 LASERY GAZOWE

Jak już powiedziano w tym Podrozdziale, nasze rozważania dotyczące laserów gazowych ograniczą się jedynie do przedstawienia w Tabeli 2.6.2, praktycznie wszystkich ich rodzajów. Na uwagę zasługuje fakt, że impulsowe lasery, CO_2 i lasery ekcimerowe są z dużym powodzeniem wykorzystywane w usuwaniu farb (laser impulsowy CO_2), a z kolei laser ekscimerowy w usuwaniu werniksów.

So far, such tuneable lasers as titanium-doped sapphire – $Al_2O_3:Ti^{3+}$, the so-called titanium laser and forsterite laser $Mg_2SiO_4:Cr^{4+}$ have found a practical application. Laser tuning areas, i.e. 670÷1180 nm for $Al_2O_3:Ti^{3+}$ and 1150÷1350 nm, for $Mg_2SiO_4:Cr^{4+}$ may be significantly extended, using the interaction of the radiation generated by the lasers with crystals having non-linear properties and of subsequent harmonics.

2.6.3 GAS LASERS

As it has been already stated in this Chapter, our discussion concerning gas lasers will be limited only to the presentation, in Table 2.6.2, practically all their types. However, it should be noted that pulse CO_2 lasers and excimer lasers are equally well utilised in the removal of paints (CO_2 laser) and old varnishes (excimer laser).

Laser.indb 174 2015-03-04 13:30:59

Tabela 2.6.2. Lasery gazowe

Table 2.6.2. Gas lasers

Laser	Długość fali/ Wavelength [μm]	Sprawność/ Efficiency	Moc wyjściowa Energia/ Output power Energy	Typowe zastosowania/ Typical applications
He-Ne	0,543; 0,594; 0,604; 0,633; 1,15;1,52; 3,39	≤0,1%	0,1-150 mW dla 0,633 mm; ≤15 mW dla 1,15 mm i 3,39 mm	Justowanie, holografia, pomiary
He-Cd	0,325 lub 0,442	0,01–0,1%	1,5 –10 mW dla 0,325 mm; 50 mW dla 0,442 mm	Mikrolitografia, spektroskopia,medycyna
Argon	Kilka linii między 0,35-0,528; główne linie: 0,488 i 0,514	0,01–0,1%	2 mW do 20 W	Pokazy laserowe, spektroskopia, medycyna, pompa dla laserów barwnikowych
Krypton	Kilka linii między 0,35–0,8; główna linia: 0,647	≤0,05%	5 mW do 10 W	Pokazy laserowe, światło wielokolorowe, pompa dla laserów barwnikowych
ArF ekscimerowy	0,193	≤2%	Do 2 J/impuls	Badania, spektroskopia, litografia, fotochemia
KrF ekscimerowy	0,248	≤2%	Do 2 J/impuls	Badania, spektroskopia, litografia, fotochemia
XeCl ekscimerowy	0,308	≤2,5%	Do 2 J/impuls	Badania, spektroskopia, litografia, fotochemia
XeF ekscimerowy	0,351	≤2%	Do 0,5 J/impuls	Badania, spektroskopia, litografia, fotochemia
HF chemiczny	Kilka linii od 2,6 do 3	≤1%	Do 150 W cw Od 2 do 600 mJ/imp.	Badania atmosfery
DF chemiczny	Kilka linii od 3,6 do 4	≤1%	Do 100 W cw Od 2 do 600 mJ/imp	Badania atmosfery
CO_2	Kilka linii od 9 do 11 lub 10,6	Do 20%	Do 30 kW 150 J/impuls	Obróbka, chirurgia, fotochemia, radar laserowy, zdalny monitoring atmosfery

Laser.indb 175 2015-03-04 13:30:59

Laser	Długość fali/ Wavelength [µm]	Sprawność/ Efficiency	Moc wyjściowa Energia/ Output power Energy	Typowe zastosowania/ Typical applications
He-Ne	0,543; 0,594; 0,604; 0,633; 1,15;1,52; 3,39	≤ 0,1%	0,1–150 mW for 0,633 µm; ≤ 15 mW for 1,15 µm and 3,39 µm	Aligning, holography, measurements
He-Cd	0,325 or 0,442	0,01–0,1%	1,5-10 mW for 0,325 µm; 50 mW for 0,442 µm	Microlithography, spectroscopy, medicine
Argon	Several lines between 0,35-0,528; main lines: 0,488 and 0,514	0,01–0,1%	2 mW to 20 W	Laser shows, spectroscopy, medicine, dye laser pump
Krypton	Several lines between 0,35-0,8; main line: 0.647	≤ 0,05%	5 mW to 10 W	Laser shows, multi-colour lights, dye laser pumping
ArF excimer	0.193	≤ 2%	up to 2 J/pulse	Research, spectroscopy, lithography, photochemistry
KrF excimer	0.248	≤ 2%	up to 2 J/pulse	Research, spectroscopy, lithography, photochemistry
XeCl excimer	0.308	≤ 2,5%	up to 2 J/pulse	Research, spectroscopy, lithography, photochemistry
XeF excimer	0.351	≤ 2%	up to 0.5 J/pulse	Research, spectroscopy, lithography, photochemistry
HF chemical	several lines from 2.6 to 3	≤ 1%	up to 150 W cw from 2 to 600 mJ/pulse	Atmosphere studying
DF chemical	several lines from 3.6 to 4	≤ 1%	up to 100 W cw from 2 to 600 mJ/pulse	Atmosphere studying
CO_2	several lines from 9 to 11 or 10,6	up to 20%	up to 30 kW 150 J/pulse	Processing, surgery, photochemistry, laser radar, remote air monitoring

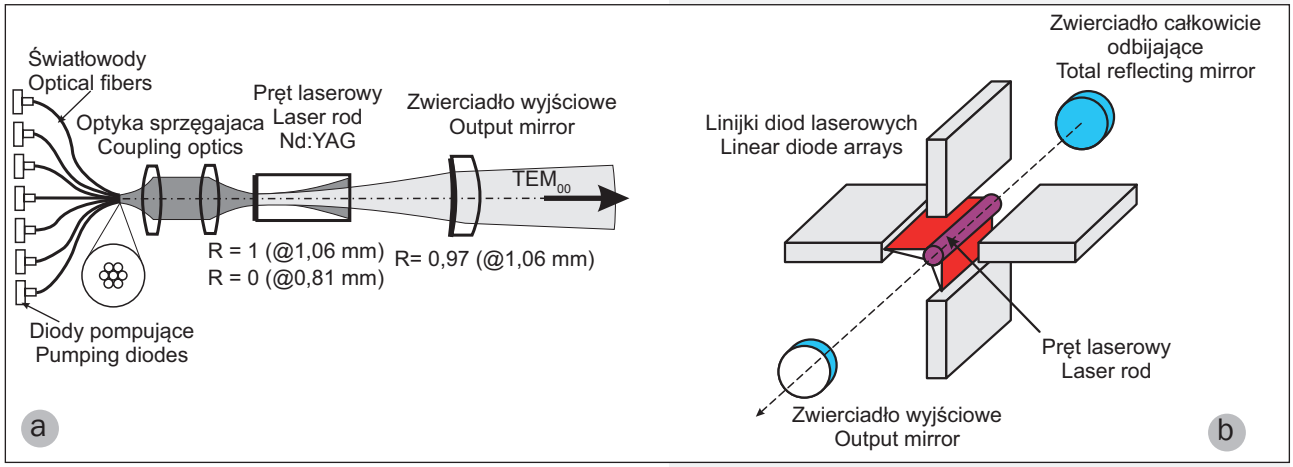
Laser.indb 176 2015-03-04 13:31:00

2.6.4 WSPÓŁCZESNE LASERY NA CIELE STAŁYM

Przedstawiony na rys.2.3.1 schemat budowy pierwszego lasera, mający już ponad pięćdziesiąt lat, został uruchomiony 16 maja 1960r. przez T. Maimana. Współczesne lasery i systemy laserowe pompowane są już głównie za pomocą laserów półprzewodnikowych (diod laserowych), emitujących długości fal dopasowane do widm absorpcji materiałów laserujących, rys.2.1.6. Pojawiły się więc nowe konstrukcje laserów pompowanych diodami laserowymi w sposób bezpośredni lub pośredni (poprzez światłowód), wzdłuż lub poprzecznie do materiału laserującego, rys.2.6.3.

2.6.4 MODERN SOLID-STATE LASERS

Fig.2.3.1 shows a construction diagram of the first laser, already over fifty years old, that was launched on May 16 1960 by T. Maiman. Modern lasers and laser systems are now mainly pumped using semiconductor lasers (laser diodes), emitting wavelengths matched to the absorption spectra of lasing materials, fig.2.1.6. Thus, new designs emerged of lasers pumped by laser diodes, either directly or indirectly (via optical fibre), along or across the lasing material, fig.2.6.3.



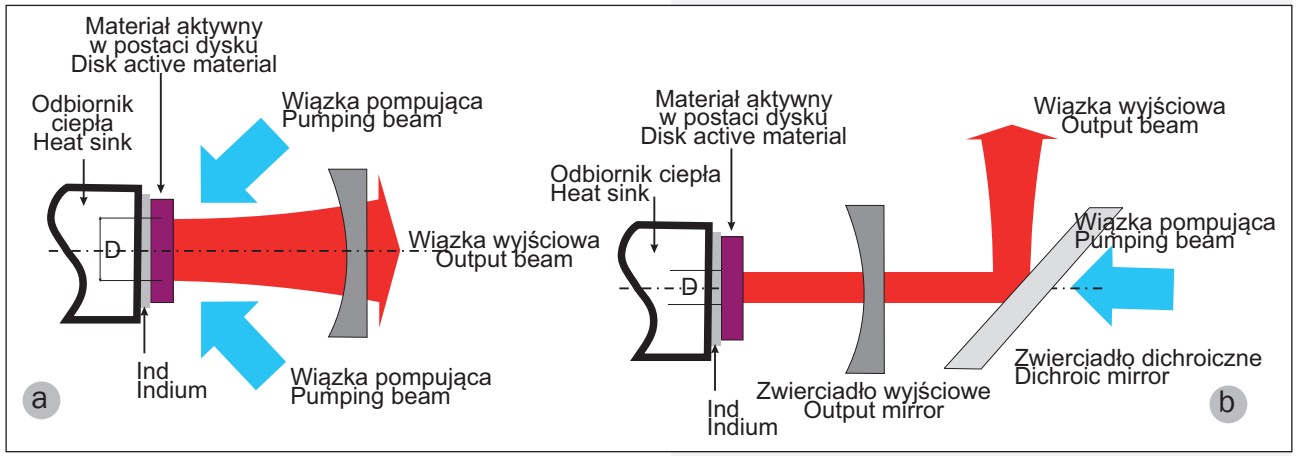
Rys.2.6.3. *Ilustracja laserów na ciele stałym pompowanych diodami laserowymi: a) – wzdłuż i b) – w kierunku poprzecznym ośrodka aktywnego.*

Fig.2.6.3*. Illustration of solid-state lasers pumped with laser diodes: a) - along b) - and across the active medium.*

Laser.indb 177 2015-03-04 13:31:00

Konkurencją laserów, których materiały aktywne wykonywane są w postaci prętów i tzw. slabów są lasery dyskowe. Takie lasery wykonane są w postaci cienkich dysków (o grubości kilku milimetrów), w których materiałem aktywnym jest jon Yb w YAG o dużo większym współczynniku wzmocnienia niż jon Nd w YAG. Taki dysk pompowany jest również diodami laserowymi w różnych konfiguracjach, z których dwie przedstawiono na rys.2.6.4.

Lasers with active materials made in the form of rods and as so-called slabs are facing a competition of disk lasers. Such lasers are made in the form of thin disks (several millimetres thick) in which the active material is a Yb ion in YAG with a much higher gain coefficient than the Nd ion in the YAG laser. Such a disk is also pumped with laser diodes in various configurations, two of which are shown in fig.2.6.4.



Rys.2.6.4. *Ilustracja laserów dyskowych: pompowanych diodami laserowymi w różnej geometrii oświetlającej cienki dysk wykonany z Yb:YAG: a) – wieloma wiązkami i b) – jedną wiązką promieniowania z diody laserowej.*

Fig.2.6.4. *Disk laser illustration: lasers pumped with laser diodes at various geometry illuminating a thin disk made of Yb: YAG: a) - with multiple beams b) - with a single beam of a laser diode*

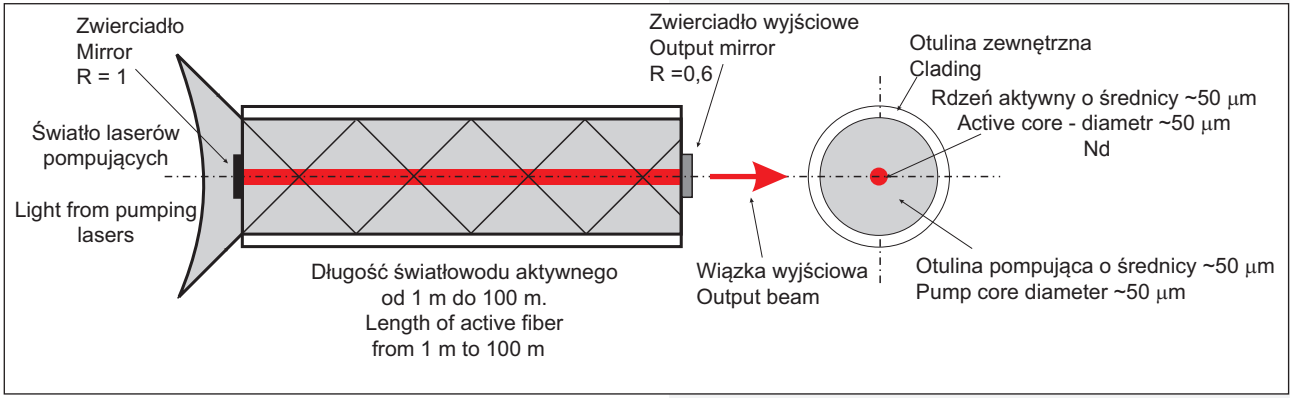
Najciekawszą i bardzo sprawną geometrią pompowania jest laser światłowodowy pompowany poprzez otulinę, w której znajduje się aktywny światłowód, rys.2.6.5. W tego typu laserach zwier-

The most interesting and very efficient geometry is a fibre laser pumped through a buffer in which there is an active optical fibre, fig.2.6.5. In this type of lasers, mirrors can be

Laser.indb 178 2015-03-04 13:31:00

ciadła mogą być mocowane na obu końcach światłowodu lub wykonane w samym światłowodzie aktywnym, tzw. zwierciadła Bragga w postaci odpowiedniej, liniowej siatki dyfrakcyjnej.

fixed on both ends of the optical fibre or made in the active optical fibre itself, so-called Bragg mirrors as an appropriate linear diffraction grating.



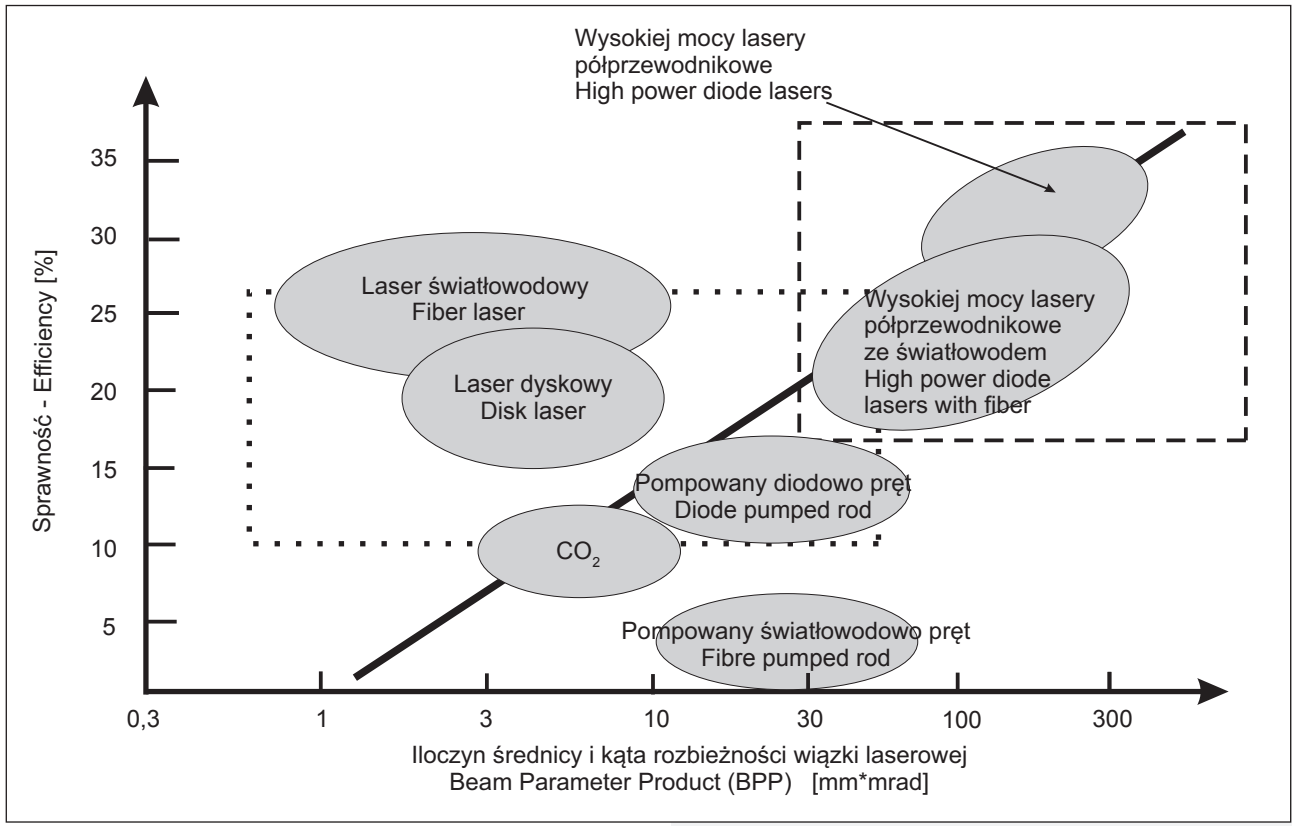
Rys.2.6.5. *Ilustracja lasera światłowodowego pompowanego diodami laserowymi przez otulinę.*

Fig.2.6.5. *Illustration of an optical fibre laser pumped by laser diodes through a buffer.*

Możliwości łączenia diód laserowych w tzw. macierze – matryce o dość dużych rozmiarach stanowią zarówno potężne źródło pobudzające, jak i same stanowią źródło promieniowania laserowego o potężnych mocach i wysokiej sprawności. Na rys.2.6.6 przedstawiono zbiorczy wykres sprawności wielu rodzajów laserów w funkcji tzw. iloczynu średnicy wiązki laserowej i jej kąta rozbieżności. Jest to praktyczny parametr systemu laserowego stosowany w procesach obróbki materiałów. Jeśli ten iloczyn jest mały tym mniejsza moc jest wymagana dla danego procesu obróbki, mniejsze straty materiału i wyższa jakość obróbki.

The possibility of combining laser diodes into the so-called matrices, as stencils of a relatively large size creates also a powerful excitation source, and these matrices are themselves also the independent sources of laser radiation providing high power and efficiency. Fig.2.6.6 presents a collective performance graph of various types of lasers as a function of the laser beam diameter and its divergence angle product. It is a practical parameter of the laser system used for materials processing. The smaller the product, the less power is required for processing, with less material loss and higher processing quality.

Laser.indb 179 2015-03-04 13:31:00



Rys.2.6.6. *Wykres zbiorczy ilustrujący sprawności poszczególnych rodzajów laserów w funkcji tzw. iloczynu średnicy wiązki laserowej i jej kąta rozbieżności.*

Fig.2.6.6. *Collective performance graph illustrating each type of laser as a function of the so-called laser beam diameter and its divergence angle product.*

2.7 AKTUALNE KIERUNKI BADAŃ – PODSUMOWANIE

Rozwój badań nad laserami oraz ich zastosowaniem w podstawowych dziedzinach nauki i techniki charakteryzuje wielka różnorodność

2.7 CURRENT TRENDS IN RESEARCH – SUMMARY

Progress of research on lasers and their application in key areas of science and technology is characterised by great diversity

Laser.indb 180 2015-03-04 13:31:00

oraz duża dynamika. Tematyce tej poświęcana jest stale rosnąca liczba publikacji i konferencji, a także powstają nowe tytuły specjalistycznych czasopism. Jednym z pierwszoplanowych i dominujących kierunków są badania nad laserami półprzewodnikowymi. Badania te ukierunkowane są na poszukiwaniu struktur laserujących o możliwie maksymalnej sprawności i trwałości, a także generujących promieniowanie z różnych obszarów widma – zwłaszcza z obszaru nadfioletu i miękkiego promieniowania „X". Im krótsza długość fali generacji, tym większe upakowanie – gęstość zapisu w pamięciach optycznych. Z kolei im większa moc generacji, tym sprawniejsze pompowanie innych ośrodków laserujących, zwłaszcza na ciele stałym. Kolejnym zagadnieniem jest poszukiwanie szerokich i przestrajalnych źródeł promieniowania koherentnego, w tym przestrajalnych w trakcie generacji z dużą szybkością dla koherentnej tomografii optycznej.

Dotyczy to również rozwoju i badań nad nowymi materiałami, zwłaszcza nieliniowymi. Rozwijane są technologie i techniki generacji już nie tylko impulsów o czasie trwania femtosekund, ale również attosekund, z częstotliwościami przekraczającymi setki gigaherców, a prace te związane są nierozerwalnie z techniką telekomunikacyjną i z uzyskaniem generacji z zakresu twardego promieniowa-

and high dynamics. There is an ever growing number of publications and conferences dedicated to this field, and there are also new specialised magazines emerging. One of the primary and prevalent directions of research involve semiconductor lasers. This research focuses on the search for lasing structures with highest possible performance and durability, that would also generate radiation in different areas of the spectrum - especially in the area of ultraviolet and soft "X" radiation. The shorter the generation wavelength, the higher the compactness - density of recording in optical memories. In turn, the greater the generation power, the higher is the efficiency of pumping of other lasing media, especially in case of the solids. Another issue is the search for wide and tuneable coherent radiation sources, including those tuneable during high-speed generation for coherent optical tomography.

This also applies to the development and research of new materials, especially non-linear ones. Technologies and techniques are developed for the generation of pulses of a duration of not only femtoseconds, but also attoseconds, with frequencies exceeding hundreds of gigahertzes, and these works are inextricably associated with telecommunications

Laser.indb 181 2015-03-04 13:31:00

nia rentgenowskiego o długość fali generacji 1 Å (1Å = 10^{-10} m), a nawet krótszych długości fal – z obszaru promieniowania gamma. Na potrzeby kontrolowanej syntezy termojądrowej budowane są systemy laserowe (pompowane laserami półprzewodnikowymi), pozwalające na uzyskanie w impulsie laserowym o czasie trwania jednej nanosekundy (1 ns = 10^{-9} s) energii przekraczającej dziesiątki MJ. W inżynierii powierzchni i inżynierii materiałowej wiązka laserowa jest wykorzystywana do modyfikacji warstw wierzchnich (utwardzanie falą uderzeniową – laser shock peening), wytwarzania struktur przestrzennych – periodycznych w warstwach metalowych, wytwarzania nanocząsteczek oraz tworzenia nowych materiałów – metamateriałów.

Zasadniczy rozwój wydaje się koncentrować wokół różnic, jakie wykazuje energia optyczna względem innych form energii przyczyniając się do nowych opracowań odpowiednich narzędzi czy wyposażenia, które zmienią całkowicie nasze życie i nasze możliwości. Główne różnice między energią optyczną a innymi formami energii przemysłowej są takie, że:

- Jest to energia w czystej postaci – w procesie np. oddziaływania z materiałami nie wprowadza żadnych domieszek do obrabianego materiału.

technology and with obtaining generation in the range of hard X-ray radiation with a generation wavelength of 1 Å (1Å = 10^{-10} m), and even shorter wavelengths - from the gamma radiation range. For the purposes of controlled thermonuclear fusion, laser systems (pumped with semiconductor lasers) are constructed that are capable of obtaining the energy exceeding tens of MJ in a laser pulse with a duration of one nanosecond (1 ns = 10^{-9} s). In surface engineering and materials engineering, the laser beam is used to modify surface layers (laser shock peening), generation of spatial - periodic structures in metal layers, formation of nanoparticles and the production of new materials - metamaterials.

Significant development seems to concentrate mainly around the differences presented by optical energy in relation to other forms of energy contributing to developing new appropriate tools or equipment that will completely change our lives and our possibilities. The main differences between optical energy and other forms of industrial energy are as follows:

- It is energy in its pure form - in the process of e.g. interaction with materials it leaves no additives to the material treated.

Laser.indb 182 2015-03-04 13:31:00

- Aktualne gęstości mocy promieniowania laserowego (dziś 10^{21} W/cm^2) to jedne z największych dostępnych dziś w przemyśle.
- Kształtowanie mocy i jej rozkładu stanowi unikalną możliwość w przypadku energii optycznej, zarówno w przestrzeni jak i czasie (np. odwracanie frontu falowego).
- Łatwość wejścia do automatyzacji procesów technologicznych – światłowody, co może rozszerzać obróbkę wszelkich materiałów.
- Spójność światła laserowego umożliwia realizację zadziwiających efektów optycznych poprzez zjawiska dyfrakcji, interferencji oraz jedno lub wielofotonowe procesy pochłaniania kwantów świetlnych.
- Czystość spektralna i ogromne uzyskiwane gęstości mocy mogą pozwolić na selektywną obróbkę chemiczną o nieoczekiwanych właściwościach termodynamicznych.
- Energia przesyłana jest z prędkością światła!

Poniżej przedstawiono szersze omówienie powyższych zalet promieniowania laserowego.

Gęstość energii (mocy). Szybkie i precyzyjne sterowanie gęstością energii (mocy) pozwoli w szerokim zakresie na precyzyjne sterowanie procesami termicznymi i chemicznymi. Pozwoli na precyzyjne sterowanie szybkościami nagrze-

- Currently, laser radiation power density (today 10^{21} W/cm^2), is one of the largest available in the industry.
- Shaping power and its distribution is a unique possibility in case of optical energy both in space and time (e.g. wavefront reversal).
- Easy automation of technological processes - optical fibre, which may extend the treatment of all materials.
- Laser light coherence allows amazing optical effects produced by diffraction, interference, and one or multiphoton processes of light quanta absorption.
- Spectral purity and great power densities obtained may allow for selective chemical treatment with unexpected thermodynamic properties.
- The energy is transmitted at the speed of light!

A more detailed presentation of these advantages of laser radiation may be found below.

Energy (power) density. Fast and precise control of the energy (power) density will allow a wide range of precise control of thermal and chemical processes. It will allow for precise

Laser.indb 183 2015-03-04 13:31:00

wania i chłodzenia, czasem powyżej określonych i profilowanych temperatur. Należy oczekiwać powstania nowych materiałów do specjalnych zastosowań powierzchniowych, czerpiących wzory z przyrody (biomimetyka), tworzenia *in situ* stopów i kompozytów, które zawierają np. materiały termoczułe.

Transmisja energii (mocy). Energia optyczna jest jedną z niewielu form energii, która może być przenoszona na ogromne odległości (w powietrzu lub kosmosie). Obecny wielki rozwój systemów światłowodowych przenoszenia wiązki laserowej, poszerza tę możliwość transportu. Umieszczenie energii optycznej wewnątrz istniejących narzędzi i maszyn może prowadzić do ogromnych oszczędności w jednostkowych operacjach technologicznych (głębokie wiercenia ze wspomaganiem laserowym). Zastosowanie światłowodów, a w szczególności światłowodów jednomodowych, znacznie zwiększyło możliwości włączania wiązki laserowej do linii produkcyjnych. Powstają pierwsze opracowania dotyczące zdalnego spawania i cięcia przy użyciu długich ogniskowych wiązek o dużych mocach. Światłowody zawsze będą zagrożone przez ograniczoną moc, którą mogą przenieść bez uszkodzenia włókna lub przez ich zdolność do ogniskowania, ale granica jest aktualnie wystarczająco wysoka dla większość zastosowań w obróbce materiałów.

control of heating and cooling speeds, sometimes above set and profiled temperatures. Emergence of new materials for special surface applications is to be expected that will be inspired by nature (biomimetics), *in situ* formation of alloys and composites that contain e.g. heat sensitive materials.

Energy (power) transmission. Optical energy is one of the few forms of energy that can be transferred over great distances (in air or space). The current great development of optical fibre systems for laser beam transmission enhances this transfer possibility. Placing optical energy within the existing tools and machines can lead to huge savings in single technological operations (deep laser-assisted drilling). The use of optical fibres, in particular single-mode optical fibres, greatly increased the possibility of coupling the laser beam with production lines. First studies are now emerging on remote welding and cutting using long focal high power beams. Optical fibres will always be threatened by the limited power that may be transferred without damaging the fibre or by their ability to focus, but the limit is currently high enough for most applications in the field of material processing.

Laser.indb 184 2015-03-04 13:31:00

Kształtowanie energii (mocy). Żadna inna forma energii nie może być kształtowana z taką precyzją jak energia optyczna. Wdrożono zwierciadła holograficzne i sprzężone fazowo, a te opracowania są bardzo obiecujące (tzw. odwracanie frontu falowego). Coraz subtelniejsze są systemy skanowania. Przyszłość wygląda tak, że można będzie w sposób złożony kształtować wiązki wysokich mocy, umożliwiając obróbkę w jednym impulsie obszarów przy kształtowaniu powierzchni, nakładaniu, drążeniu lub nawet cięciu. Rozwój optyki dostosowującej modowo (mode-matching) może prowadzić do przetwarzania dowolnych modów w mody Gaussa wysokiej jakości. Powstaje już obróbka przy pomocy dwóch lub więcej długości fal, dając jednocześnie różne obrazy, jak na obrazku kolorowym.

Automatyzacja. Jest bardzo wiele sposobów na sterowanie mocą laserową, a sam proces jest szeroko otwarty na próbkowanie wewnętrzne i opracowanie niespotykanej do tej pory obróbki inteligentnej.. Przykładem może być proces czyszczenia laserowego dzieł sztuki za pomocą promieniowania laserowego, którego główną zaletą jest samoograniczenie. To już się dzieje i nie jest snem.

Shaping energy (power). No other form of energy cannot be shaped with such precision as optical energy. Holographic and phase coupled mirrors have been implemented, and these developments are very promising (i.e. wavefront reversal). Scanning systems are becoming finer and finer. The future outlook leads us to believe that it will be possible to shape the beam of high power in a sophisticated way, allowing the processing of areas when shaping the surface, sintering, drilling, or even cutting in a single pulse. The development of mode-matching optics may lead to convert any modes into high quality Gaussian modes. This results in processing involving two or more wavelengths, simultaneously providing different images, as in a colour picture.

Automation. There is a plethora of methods to control the laser power, and the process itself is ready to embrace the internal sampling and developing intelligent processing which was so far unprecedented. An example of this is the process of laser cleaning of works of art using laser radiation, with its main advantage being the process self-limitation. This is already happening and it is not a dream.

Laser.indb 185 2015-03-04 13:31:00

Spójność wiązki. Jest to właściwość jeszcze niewykorzystana przez inżynierów procesowych, choć umożliwia pomiar odległości, a nawet odległości penetracji wewnątrz procesu. Pozwala na właściwość powstawania efektów interferencyjnych, które z kolei pozwolą na powstanie niezwykle szczegółowych, powierzchniowych źródeł ciepła, takich jak systemy prążków wielu wiązek. Takie pomysły są w trakcie opracowywania.

Czystość spektralna wiązki. Jest to kolejna właściwość rzadko wykorzystywana w obróbce materiałów z wyjątkiem separacji izotopów i selektywnego odparowywania materiałów.

Zjawiska wielofotonowe. Jest to coś, co laser zaoferował światu, a o czym nigdy nie myśleliśmy wcześniej. Laser ekscimerowy, ze swoją zdolnością do cięcia „na zimno" wykazał niezwykłą aktywność wielofotonowości. Istnieje wiele procesów nieliniowych pokazujących, że fotony w swojej objętości prowadzą do niezwykłych zjawisk: np. rozproszenia Brillouina, Rayleigha i Ramana. Wszechobecne wewnętrznie trawione bloczki szkła w sklepach turystycznych ilustrują, jak zjawiska wielofotonowe mogą przekształcać przezroczysty materiał w mętny i *vice versa*, jak np. w nasycających się reflektorach Bragga. Ten obszar nauki dotyczący intensywnych fal sił elektrycznych dopiero raczkuje.

Beam coherence. This is a property that is still unused by process engineers, although it allows the measurement of distance, and even the distance of penetration inside the process. This property allows for the formation of interference effects, which in turn will allow the creation of highly detailed surface heat sources, such as interference pattern systems of multiple beams. Such concepts are now being developed.

Spectral beam purity. It is another property rarely use d in processing materials with the exception of isotope separation and selective evaporation of materials.

Multiphoton phenomena. This is something that the laser has offered the world, which has never been imagined before. The excimer laser, with its ability of "cold" cutting, has shown remarkable multiphoton activity. There are many of non-linear processes showing that photons in their volume trigger unusual phenomena, such as the Brillouin, Rayleigh and Raman scattering. The ubiquitous internally etched glass blocks in tourist shops illustrate how multiphoton phenomena can turn a transparent material opaque and *vice versa*, e.g. in saturable Bragg reflectors. This area of science researching intense waves of electrical forces is only in its infancy.

Laser.indb 186 2015-03-04 13:31:00

Nieustannie rosnąca różnorodność badań nad problemami związanymi z laserami oraz ich aplikacjami powoduje coraz mocniejsze przekonanie, że najważniejsze zastosowania laserów zostaną dopiero odkryte. Wydaje się również, że niezbędne będzie następne stulecie na eksplorację tego, co za pomocą kwantów promieniowania możemy uzyskać i stworzyć. W jednym z czasopism naukowych z końca ubiegłego wieku stwierdzono nawet, że *„przyszłość będzie należała do fotonów”*.

A na końcu, jest bardzo możliwe, że istnieje bogactwo zastosowań tak nowych, iż nawet nie widzieliśmy dotąd ich możliwości – było to oczywiście również w przypadku rozwoju zastosowań ognia, pary, elektryczności i ropy.

The ever-increasing diversity of research on problems associated with lasers and their applications leads to an increasingly strong conviction that major applications of lasers are yet to be discovered. It also seems that another century will be necessary to explore what may be obtained and created using quantum radiation. One of the scientific journals dating from the end of the last century stated that “*the future will belong to photons*”.

And finally, it is more than possible that there is a wealth of new applications so new that we hitherto did not even see the possibilities they present - it was, of course, the very same case as regards the development of applications of fire, steam, electricity and oil.

Laser.indb 187 2015-03-04 13:31:00

BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 2 / REFERENCES TO CHAPTER 2

1. Einstein A., Zur Quanten Theorie der Strahlung, Phisische Zeitschrift., Vol. 18, p.121- 128, marzec (1917), tłum. angielskie: On the quantum theory of radiation – w książce B.L. van der Waerden: Source of quantum mechanics, North-Holland, Amsterdam (1967);
2. Maiman T., Stimulated Optical Radiation in Ruby Masers, Nature, Vol. 187, pp.493-494, (1960);
3. Schawlow A.L., Advances in Quantum Electronics, J.R. Singer, New York, London str.50, 1961;
4. Piekara A.H., Nowe oblicze optyki, PWN, Warszawa (1976);
5. Kaczmarek F., Wstęp do fizyki laserów, PWN, Warszawa (1978);
6. Klejman H., Lasery, PWN, Warszawa, (1979);
7. Gros R.W.F., Bott J.F., (red), Handbook of Chemical Laser, John Viley & Sons, New York, (1976);
8. Laser Handbook, Unstable Resonators, North-Holland Publ., V.II, str. 3-39, (1979);
9. Mroziewicz B., Bugajski M., Nakwaski W., Lasery półprzewodnikowe, PWN, Warszawa (1985);
10. Born M., Wolf E., Principles of Optics, Pergamon Press, Oxford (1986);
11. Siegmann A.E., Lasers, University Science Book, California (1986);
12. Badziak J., Lasery ekscymerowe dużej mocy, Instytut Fizyki Plazmy I Laserowej Mikrosyntezy, Warszawa (1995);
13. Svelto O., Principles of Lasers, Plenum Press, New York (1998);
14. Kujawski A., Szczepański P., Lasery. Podstawy fizyczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (1999);
15. Koechner W., Solid State Laser Engineering, Springer-Verlag, New York (2006);

Laser.indb 188 2015-03-04 13:31:00

Fotografia wykonana została za pomocą „camery obscury" (ciemny pokój), w dniu 22-09-2007 roku na Plaza Major w Madrycie, podczas pobytu autorów na Międzynarodowej Konferencji LACONA VII poświęconej technice laserowej w konserwacji dzieł sztuki.

The photograph was taken using the "camera obscura" (dark room) technology, on 22 September 2007, at Plaza Mayor in Madrid, when the authors participated in the International Conference LACONA VII dedicated to laser technology in the conservation of works of art.

Laser.indb 189 2015-03-04 13:31:00

Laser.indb 190 2015-03-04 13:31:00

ROZDZIAŁ 3 / BEZPIECZEŃSTWO PRACY Z LASERAMI

3.1 WPROWADZENIE

Celem niniejszego Rozdziału jest zapoznanie potencjalnego użytkownika, zwłaszcza współczesnego konserwatora dzieł sztuki, z wymogami warunków bezpieczeństwa podczas wykorzystywania urządzeń laserowych. W konserwacji dzieł sztuki, promieniowanie laserowe wykorzystywane jest głównie w nieniszczącej diagnostyce i analizie dzieł, jak również w oczyszczaniu obiektów w spo sób nadzwyczaj selektywny i w pełni kontrolowany. Wspaniałe właściwości promieniowania laserowego spowodowały, że czyszczenie laserowe stało się wartościową techniką dla konserwatorów. Jednakże te same właściwości, które czynią promieniowanie laserowe bardzo atrakcyjnym dla wielu zastosowań naukowych i technologicznych, stanowią również groźne i potencjalne zagrożenie dla użytkownika, a także przypadkowych i nieświadomych niebezpieczeństwa obserwatorów [1].

Zapoznanie się z normą bezpieczeństwa może być dla wielu użytkowników urządzeń laserowych

CHAPTER 3 / OPERATIONAL LASER SAFETY

3.1 FOREWORD

The purpose of this Chapter is to present to potential users, especially to contemporary art conservators, the requirements of safety conditions when using laser devices. In the conservation of works of art, laser radiation is mainly used for non-destructive diagnosis and analysis of works, as well as in cleaning objects in a very selective and fully controlled manner. Great properties of laser radiation made the laser cleaning technique a valuable tool for conservators. However, the same properties that make laser radiation very attractive for many applications of science and technology, are also a dangerous potential threat to its users, as well as to bystanders unaware of the danger [1].

For many users of laser devices, getting to know the safety standard may be a very deterrent and tedious or even incomprehensible prospect. Therefore, this Chapter aims at presenting and explaining to laser users the

Laser.indb 191 2015-03-04 13:31:00

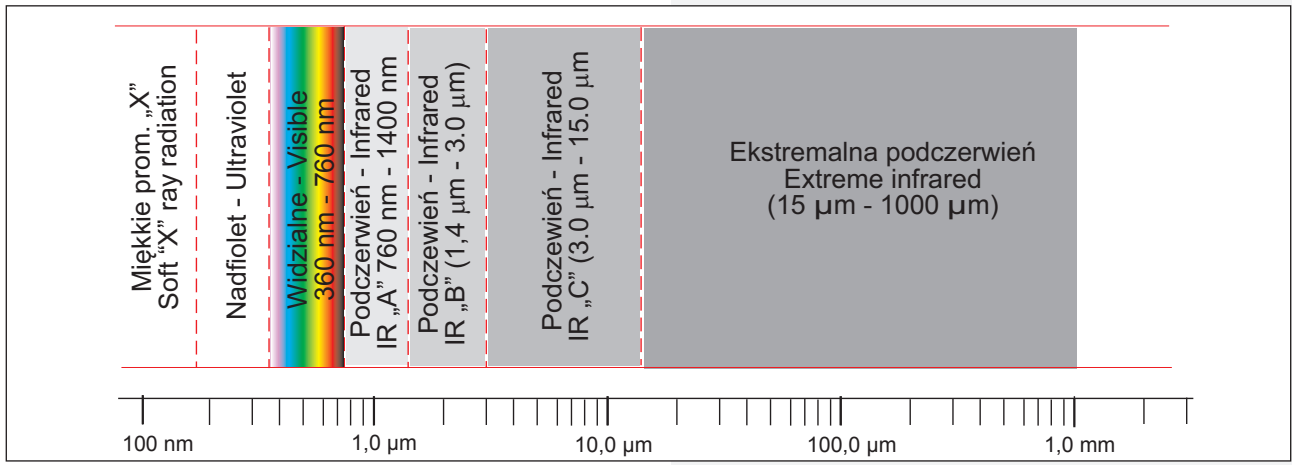
perspektywą dalece zniechęcającą i nudną, a niekiedy nawet niezrozumiałą. Celem tego Rozdziału jest więc przybliżenie i objaśnienie użytkownikom laserów zasad Polskiej Normy Bezpieczeństwa [2], a w perspektywie zapewnienie bezpiecznej pracy.

Pod pojęciem laser będziemy tu rozumieć urządzenie emitujące koherentne promieniowanie w przedziale długości fal od 180 nm aż do 1 mm, rys.3.1.1.

rules of the Polish Safety Standard [2], and, consequently, to ensure safe operation.

The term laser is here used to mean a device emitting coherent radiation in the wavelength range from 180 nm up to 1 mm, fig. 3.1.1.

Laser radiation in the range from 180 nm to 1 mm is a small part of the full range of electromagnetic waves, and the range of visible



Rys.3.1.1. *Przedziały długości fal promieniowania elektromagnetycznego z obszaru fal optycznych i ich nazewnictwo.*

Fig.3.1.1. *The ranges of electromagnetic radiation wavelengths from the optical waves region and their names.*

Promieniowanie laserowe w przedziale od 180 nm do 1 mm stanowi niewielką część pełnego zakresu fal elektromagnetycznych, a zakres fal widzialnych jest jeszcze węższy. Komercyjnie dostępne lasery emitują promieniowanie w obszarze

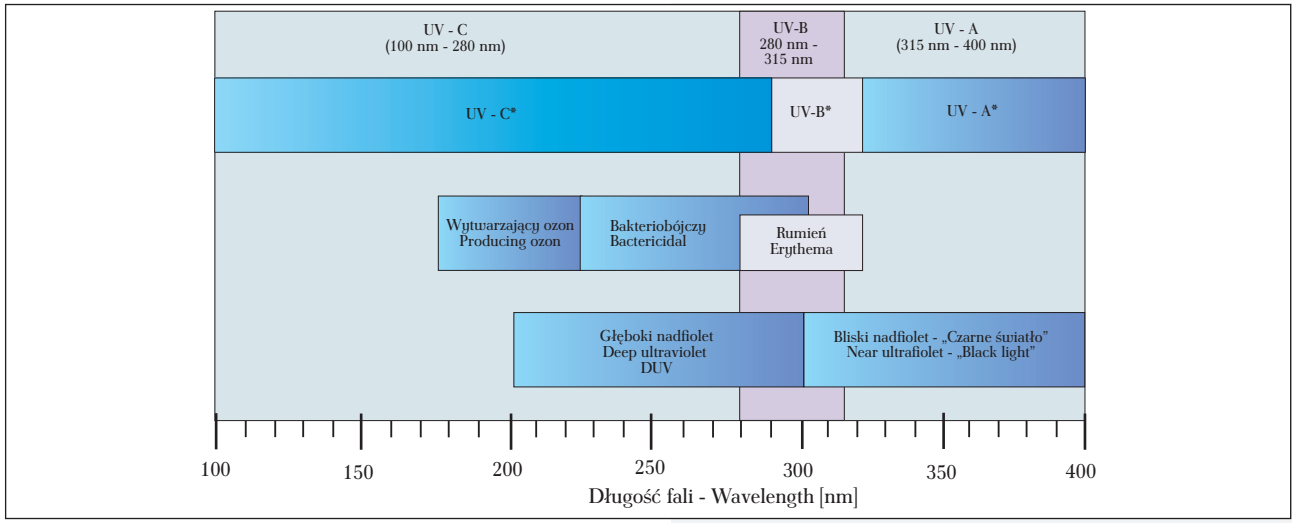
wavelengths is narrower still. Commercially available lasers emit radiation in the ultraviolet region, in visible and infrared ranges. As shown in fig. 3.1.2, radiation from the ultraviolet region comprises wavelengths between 180 nm and

Laser.indb 192 2015-03-04 13:31:00

nadfioletu, w zakresie widzialnym i w zakresie podczerwonym. Jak pokazano na rys.3.1.2, promieniowanie z obszaru nadfioletu zawiera długości fal od 180 nm do 360 nm. Obszar widzialny zawiera z kolei długości fal od 360 nm do 760 nm. Są to te części widma elektromagnetycznego, którą nazywamy światłem widzialnym. Obszar podczerwony widma zawiera długości fal od 760 nm aż do 1 mm. Długość fali emitowanego światła zależy generalnie od rodzaju ośrodka laserującego, a ośrodkami aktywnymi mogą być: ciała stałe, gazy, ciecze i materiały półprzewodnikowe. Niektóre materiały laserujące są w stanie emitować więcej niż jedną długość fali jednocześnie, np. laser argonowy (Ar). Wykorzystując tzw. optyczne przetworniki częstotliwości światła laserowego możemy uzyskać kolejne jego harmoniczne częstotliwości podstawowej. I tak np. z lasera Nd:YAG, generującego promieniowanie 1064 nm, możemy otrzymać, w kolejnych harmonicznych długości fal: 532 nm, 355 nm, 266 nm oraz 213 nm. Długości fal emitowane przez lasery zależą od szerokości linii emisyjnej materiału aktywnego, jak również od optycznej konfiguracji lasera. W takim przypadku bezpieczeństwo pracy z takimi laserami wymaga oddzielnego uwzględnienia wielu długości fal jednocześnie, a tym samym innego podejścia do sprawy bezpieczeństwa, szczególnie dla oczu.

360 nm. The visible region, in turn, comprises wavelengths from 360 nm to 760 nm. This are the part of the electromagnetic spectrum called visible light. The infrared region of the spectrum comprises wavelengths from 760 nm up to 1 mm. The wavelength of the emitted light generally depends on the lasing medium type, while possible active media include solids, gases, liquids and semiconductor materials. Some lasing materials can emit more than one wavelength simultaneously, e.g. the argon (Ar) laser. Using the so-called optical laser light frequency converters make it possible to achieve its successive harmonics from the basic frequency. For example the Nd: YAG laser can give us its subsequent harmonics or wavelengths: 532 nm, 355 nm, 266 nm and 213 nm. The wavelengths emitted by lasers depend on the width of the emission line of the active material, as well as on the optical configuration of the laser. In this case, the safety of operating such lasers requires to separately take into consideration various wavelengths at the same time, and thus approaching the issue of safety in a different way, especially when it comes to eyes.

Laser.indb 193 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.1.2. *Światło nadfioletowe, opis i definicje pasm. * Oznacza definicje przedziałów nadfioletu w oparciu o efekty biologiczne.*

Fig.3.1.2. *Ultraviolet light, description and definitions of bands.* Indicates definitions of ultraviolet ranges based on biological effects.*

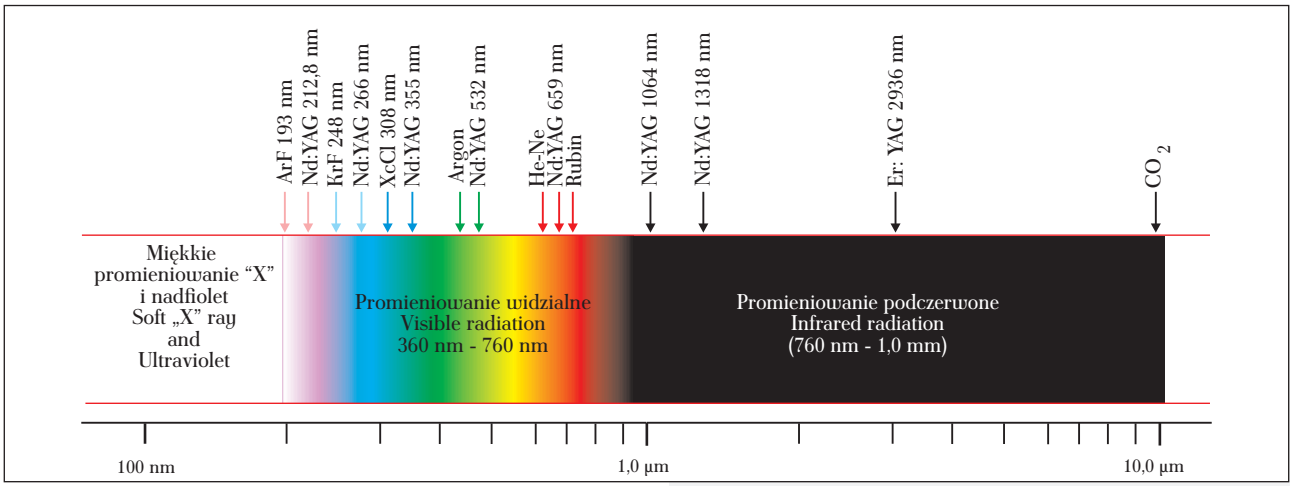
Na rys.3.1.3 przedstawiono lasery dostępne komercyjnie na tle widma fal elektromagnetycznych z obszaru optycznego.

Na charakter i przebieg akcji laserowej wpływ ma proces pompowania materiału aktywnego. W zależności od charakteru przebiegu tego procesu, który może być ciągły lub impulsowy, lasery możemy podzielić na dwie kategorie: lasery ciągłego działania (ang. cw – continuous wave) oraz lasery impulsowe (ang. pulse lasers). Pracę impulsową lasera można uzyskać zarówno pompując materiał aktywny w sposób ciągły, jak i impulsowy. W praktyce konserwatorskiej najczęściej spotykamy się z promieniowa-

Fig.3.1.3 presents commercially available lasers on the background of electromagnetic waves spectrum from the optical region.

The nature and duration of lasing is influenced by the process of pumping of the active material. Depending on the nature of the course of such process, continuous or pulsed, lasers may be divided into two categories: continuous wave lasers and pulse lasers. Pulsed operation may be obtained either by pumping the active material in a continuous and pulse regime. In conservation practice we usually encounter laser radiation generated

Laser.indb 194 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.1.3. *Komercyjnie dostępne lasery na tle widma fal elektromagnetycznych.*

Fig.3.1.3. *Commercially available lasers on the background of the electromagnetic waves spectrum.*

niem laserowym, które generowane jest w sposób impulsowy (usuwanie nawarstwień). Częstość generowania impulsów laserowych określa się pojęciem szybkości repetycji, czyli ilości impulsów laserowych emitowanych w ciągu jednej sekundy. Producent danego urządzenia laserowego, oprócz wielkości energii w impulsie, czasu jego trwania i kąta rozbieżności wiązki laserowej, podaje również szybkość repetycji impulsów, a także wiele innych parametrów. Była o tym mowa w Podrozdziałach 2.4 i 2.5.

3.2 ŚWIATŁO LASEROWE – ZAGROŻENIA

Aby zrozumieć, w jaki sposób może być spowodowane uszkodzenie tkanki ludzkiej, w tym

in a pulsed mode (removal of encrustations). The frequency of generation of laser pulses is defined as repetition rate, or the number of laser pulses emitted per second. The manufacturer of each device, in addition to the amount of pulse energy, its duration, laser beam divergence angle, also provides the pulse repetition rate any many more parameters. This has already been described in Sections 2.4 and 2.5.

3.2 LASER LIGHT - THREATS

In order to understand how human tissue damage may suffer damage, this section

Laser.indb 195 2015-03-04 13:31:01

podrozdziale zostaną przedstawione podstawowe mechanizmy wynikające z oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką. Tymi mechanizmami są:

1. Efekty fototermiczne.
2. Efekty fotochemiczne.
3. Efekty fotoakustyczne.

Ad.1). W tym mechanizmie, promieniowanie absorbowane przez tkankę powoduje wzrost jej temperatury aż do jej uszkodzenia, lub inaczej aż do jej oparzenia lub zwęglenia. Sam proces zależy głównie od szybkości, z jaką absorbowane jest promieniowanie, tzn. raczej od mocy promieniowania niż od całkowitej ilości zaabsorbowanej energii. Tym samym obrażenia, które następują natychmiast po ekspozycji – naświetleniu są w większym stopniu spowodowane efektem fototermicznym. Większość komórek jest w stanie wytrzymać temperaturę około 45° C, zaczną one natomiast umierać przy temperaturze 60° C, a ich odparowywanie następuje w temperaturze około 350° C. Fototermiczne mechanizmy mogą w sposób natychmiastowy lub permanentny uszkadzać tkankę ludzką – skórę lub oczy.

Ad.2). Efekty fotochemiczne bardziej zależą od całkowitej zaabsorbowanej energii przez tkankę niż od szybkości, dla której zostaje zaabsorbowa-

presents the basic mechanisms resulting from the interaction of laser radiation with tissue. These mechanisms include the following:

1. Photothermal effects.
2. Photochemical effects.
3. Photoacoustic effects.

Ad.1). In this mechanism, the radiation absorbed by the tissue causes the rise in temperature of the tissue finally leading to its damage, i.e. burn or carbonisation. The process itself depends mainly on the speed with which the radiation is absorbed, i.e. rather than on the radiation power than on the total amount of the energy absorbed. Thus, the injury produced immediately after the exposure is to a greater extent due to the photothermal effect. Even if the majority of cells is able to withstand a temperature of about 45° C, cells start to die at a temperature of 60° C, and they are evaporated at a temperature of about 350°C. Photothermal mechanisms can, immediately or permanently, damage human tissue - the skin or the eyes.

Ad.2). Photochemical effects depend more on the total energy absorbed by the tissue than on the absorption rate. Thus, the photochemical effect is the result of energy accumulation. Although power levels may not be sufficient

Laser.indb 196 2015-03-04 13:31:01

na. Efekt fotochemiczny jest tym samym wynikiem kumulacji energii. Mimo że poziomy mocy mogą nie być wystarczające do uszkodzenia termicznego, przedłużone okresy ekspozycji tkanki mogą powodować jej uszkodzenie. Mechanizm zawiera zmiany struktury chemicznej tkanki leżącej poniżej, np. powstanie opalenizny w wyniku absorpcji nadfioletu ze słońca, co jest naturalnym zjawiskiem fotochemicznym. Chociaż tego typu efekty fotochemiczne mogą być odwracalne po zatrzymaniu absorpcji promieniowania, to efekt kumulacyjny może spowodować uszkodzenia nawet po dłuższym czasie. W wyniku takiego procesu zależnego od energii, istotną rolę zaczyna odgrywać energia fotonu. Jak wiemy, energia fotonu rośnie (jest większa) wraz z maleniem długości fali, i dlatego światło nadfioletowe jest bardziej niebezpieczne niż światło z zakresu widzialnego. Promieniowanie podczerwone generalnie nie powoduje uszkodzeń związanych z mechanizmem fotochemicznym (większa długość fali, foton o niższej energii), lecz jest niebezpieczne dla oka, o czym będzie mowa w dalszej części tego Rozdziału.

Ad.3). Efekty fotoakustyczne są generalnie związane z krótkimi i ultrakrótkim impulsami laserowymi o dużej energii. Takie impulsy powodują gwałtowną ekspansję (ablację) tkanki. Ablacji tkanki towarzyszy efekt akustyczny, niekiedy generato cause thermal damage, prolonged periods of tissue exposure may lead to its damage. The mechanism comprises changes in the chemical structure of the underlying tissue, for example tanning of the skin due to absorption of ultraviolet light from the sun, which is a natural photochemical phenomenon. Although photochemical effects of this type may be reversible when the radiation absorption ceases, a cumulative effect may lead to damage even after a long period of time. Given such a energy-dependent process, photon energy begins to play an important role. As we know, photon energy increases (it is higher) as the wavelength decreases, thus making ultraviolet light more dangerous than the light from the visible range. Infrared radiation generally does not cause any damage related to the photochemical mechanism (higher wavelength, lower energy photon), but it is dangerous to the eye - this issue will be discussed later in this Chapter.

Ad.3). Photoacoustic effects are generally related to short and ultra-short high energy laser pulses. These pulses cause the rapid expansion (ablation) of tissue. Tissue ablation is accompanied by an acoustic effect, and sometimes by a shock wave generation in the tissue itself, causing mechanical rupture of the

Laser.indb 197 2015-03-04 13:31:01

cja fali uderzeniowej w samej tkance, powodując mechaniczne rozerwanie struktur tkankowych. Ten proces zależy głównie od energii promieniowania zawartej w krótkich impulsach laserowych.

Wiemy już, że laser emituje wiązkę światła o bardzo dużym natężeniu w danym kierunku. Zasadnicza różnica między światłem lasera a światłem emitowanym przez tzw. źródła światła białego (np. światło słoneczne) jest taka, że światło laserowe jest monochromatyczne (jednobarwne), skolimowane (ukierunkowane) i koherentne (spójne). Monochromatyczność oznacza, że światło wytworzone przez laser jest pojedynczą (jedną) długością fali. Światło białe jest zbiorem wszystkich długości fal z obszaru widzialnego (od 400 nm do 700 nm). Kolimacja określa wielkość kąta rozbieżności wiązek świetlnych. Światło ze źródeł konwencjonalnych, np. takich jak żarówki, rozbiega się, poszerzając się we wszystkich kierunkach. Zilustrowano to na rys.3.2.1a.

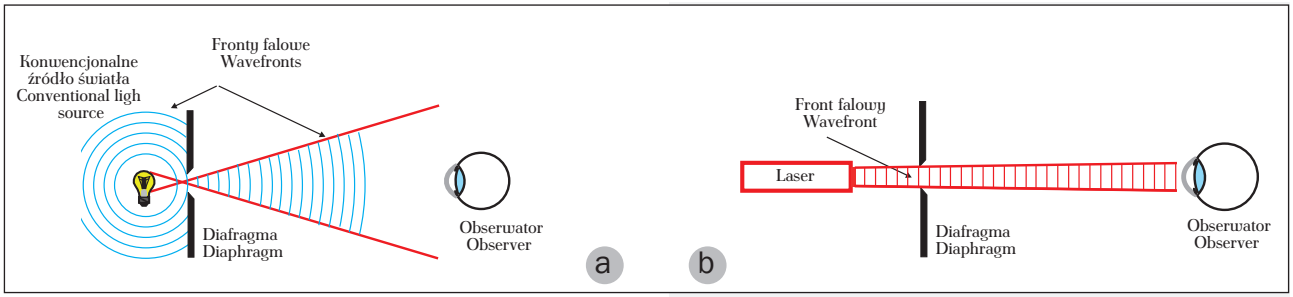
Natężenie źródła światła konwencjonalnego może być bardzo duże tuż przy jego powierzchni, ale zmniejsza się bardzo szybko z kwadratem odległości obserwatora od źródła. W przeciwieństwie do źródeł konwencjonalnych, wiązka wyjściowa z lasera przedstawiona na rys.3.2.1b ma bardzo mały kąt rozbieżności. Oznacza to również, że za

tissue structure. This process depends mainly on the radiation energy contained in short laser pulses.

We already know that the laser emits a very high intensity beam of light in a given direction. The main difference between the laser light and the light emitted by the so-called white light sources (e.g. sunlight) lies in the fact that the laser light is monochromatic (one colour), collimated (oriented) and coherent. Monochromaticity means that the light generated by the laser is single (one) wavelength. White light is a set of all wavelengths from the visible range (400 nm to 700 nm). Collimation determines the divergence angle of light beams. The light from conventional sources, such as the light bulb, diverges, extending in all directions. This is illustrated in fig.3.2.1a.

The intensity of a conventional light source may be very large immediately at its surface, but it dramatically decreases in the function of the square of the distance of the observer from the source. In contrast to conventional sources, the laser output beam shown in fig.3.2.1b has a very small divergence angle. This also means that by using lasers of relatively low power,

Laser.indb 198 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.2.1. *Ilustracja rozbiegania się promieni światła: a) – ze źródła konwencjonalnego i b) – z lasera.*

Fig.3.2.1. *Illustration of the divergence of light rays: a) - from a conventional source b) - from a laser.*

pomocą laserów o stosunkowo małej mocy można otrzymać wysokie natężenie napromienienia nawet w bardzo dużej odległości od lasera.

Jak już powiedziano wcześniej, te same właściwości, które czynią promieniowanie laserowe bardzo atrakcyjnym dla wielu zastosowań naukowych i technologicznych, stanowią również potencjalne zagrożenie dla użytkownika. Soczewka oka ogniskuje równoległą wiązkę emitowaną z lasera do bardzo małej plamki na siatkówce. Ekstremalnie krótkie czasy trwania impulsów laserowych, promieniowanie niewidzialne, to kolejne potencjalne zagrożenia, na które człowiek nie jest w stanie zareagować (np. zamknięciem powiek). Stanowi to poważny problem związany nie tylko z możliwością uszkodzenia siatkówki, lecz również i skóry. Światło emitowane ze źródeł konwencjonalnych – rozciągłych, a więc emitujące światło we wszystkich kierunkach, tworzy na siatkówce obraz o określonych

high irradiance intensity, even at a very large distance from the laser, may be obtained.

As previously stated, the same properties that make laser radiation very attractive for many applications of science and technology, are also a potential threat to its users. The lens of the eye focuses the parallel beam emitted from the laser to a very small spot on the retina. Extremely short laser pulse durations and invisible radiation are other potential threats to which a person cannot counteract (e.g. by closing the eyelids). This is a serious problem involving not only the possibility of damage to the retina, but also to the skin. The light emitted from conventional – extended sources, i.e. those emitting light in all directions, creates an image of specific dimensions on the retina (fig.3.2.2b). Each point of such a source emits rays in all directions, and these points appear on the retina as an image

Laser.indb 199 2015-03-04 13:31:01

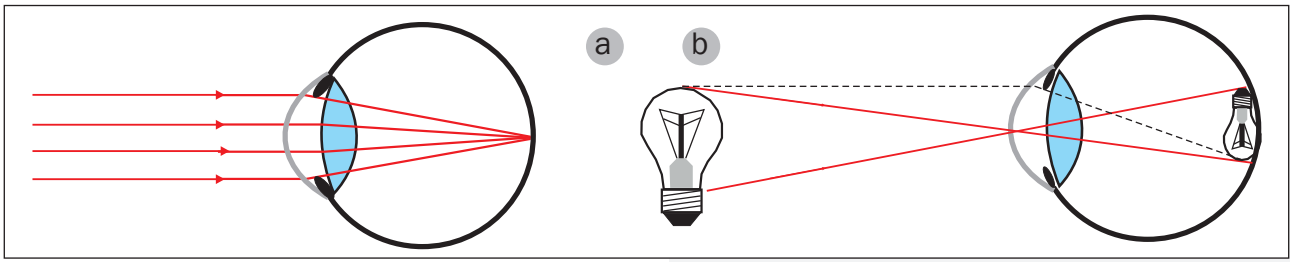
rozmiarach (rys.3.2.2b). Każdy punkt takiego źródła emituje promienie we wszystkich kierunkach, a punkty te ukazane są na siatkówce jako obraz, którego wymiar zależy od odległości i wymiaru źródła. Dla przykładu, patrząc prosto w słońce, obraz na siatkówce ma średnicę około 160 mm, co daje natężenie napromienienia około 30 W/cm^2. Światło lasera może być zogniskowane przez soczewkę oka do obrazu punktowego, o średnicy od 10 μm do 20 μm (rys.3.2.2a). Jeśli źrenica jest rozszerzona wystarczająco, aby przepuścić padającą wiązkę lasera o mocy wyjściowej tylko 1 mW, to gęstość mocy może spowodować poważne uszkodzenia siatkówki. W najgorszym przypadku, dla oka skupionego na nieskończoności i całkowicie rozszerzonej źrenicy (do 7 mm) – stosunek gęstości mocy na siatkówce do gęstości mocy na soczewce może osiągnąć wartość 100 000 razy większą. Z powodu bardzo małego rozmiaru plamki na siatkówce, 50 mW laser He-Ne lub Ar (wykorzystywane np. w badaniach interferencyjnych i holografii) może wytwarzać gęstość mocy rzędu $5 \cdot 10^4$ W/cm^2. Takie natężenie napromienienia powoduje natychmiastowe termiczne uszkodzenie siatkówki poprzez denaturację protein, porównywalną z ugotowaniem białka jajka.

Lasery o krótkich czasach trwania impulsów i wysokich mocach szczytowych mogą powodo-

of dimensions depending on the distance and size of the source. For example, looking at the sun, the image on the retina has a diameter of about 160 mm, thus giving the irradiance intensity of about 30 W/cm^2. The laser light can be focused by the eye lens to a point image with a diameter between 10 μm and 20 mm (fig.3.2.2a). If a pupil is widened enough to let an incident laser beam with an output power of 1 mW only, the power density may cause serious damage to the retina. In the worst case, for the eye focused at infinity and with a completely dilated pupil (7 mm) - the ratio of power density on the retina to power density on the lens may be 100 000 times higher. Due to the very small size of the spot on the retina, a 50 mW He-Ne or Ar laser (e.g. used in interference and holography research) may produce a power density of the order of $5 \cdot 10^4$ W/cm^2. Such irradiance intensity causes immediate thermal damage to the retina due to the denaturation of proteins, comparable to cooking the white of an egg.

Lasers with short pulse durations and high peak power may cause optical puncture and mechanical damage to retinal tissues due to the shock wave generation, causing bleeding from the gap in the retina and an effusion of blood.

Laser.indb 200 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.2.2. *a) – Rogówka i soczewka oka ogniskują wiązkę lasera do bardzo małej plamki na siatkówce, dając w efekcie bardzo dużą gęstość mocy; b) – Konwencjonalne światło reprezentuje z kolei źródło rozciągłe i obrazowane jest na siatkówce jako rozciągły obraz z odpowiednio mniejszą gęstością mocy.*

Fig.3.2.2. *a) - The cornea and the lens of the eye focus the laser beam to a very small spot on the retina, resulting in very high power density; b) - Conventional light is, in turn, an extended source and it is imaged on the retina as an extended image with correspondingly lower power density.*

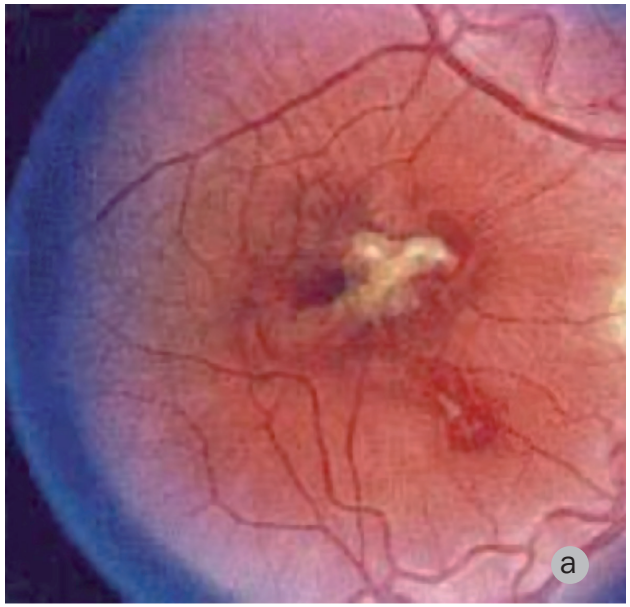
wać optyczne przebicie i uszkodzenia mechaniczne tkanek siatkówki, spowodowane generacją fali uderzeniowej, powodując krwotok z otworu w siatkówce i wysięk krwi. Fotografię dna oka z różnymi rodzajami jego uszkodzeń pokazano na rys.3.2.3a. Typowe oparzenie skóry laserem CO_2 ciągłego działania przedstawiono na rys.3.2.3b.

Statystykę obrażeń identyfikuje się głównie z laserami emitującymi krótkie impulsy, szczególnie z lasera Nd:YAG z Q – modulacją, jako typem lasera, który powoduje najczęstsze i najpoważniejsze obrażenia oka. Jakiekolwiek uszkodzenie czy obrażenie, które jest zlokalizowane w centrum siatkówki, nawet jeśli ono jest minimalne, powoduje permanentną, poważną utratę widzenia. Nie tylko siatkówka narażona jest na ryzyko uszkodzenia. Inne części oka lub skóra mogą ulec uszkodzeniu w wyniku absorpcji promieniowania laserowego

Fig.3.2.3a.is a photograph of the ocular fundus and various types of its damage. Fig.3.2.3b. presents typical skin burns caused by continuous wave CO_2 laser.

Injury statistics are identified primarily with lasers emitting short pulses, particularly from the Nd: YAG, Q - switched laser, as the laser type that causes the most common and most serious eye damage. Any damage or injury located in the centre of the retina, even a minimal one, causes permanent, severe loss of vision. Not only retina is exposed to the risk of damage. Other parts of the eye or the skin may be damaged as a result of the absorption of laser radiation by the tissue. The nature of the interaction of laser radiation with tissue, in particular ocular tissue, depends on the wavelength and on exposure time, or the pulse duration. The most effective way of

Laser.indb 201 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.2.3. *Ilustracja uszkodzeń spowodowanych laserem: a) – impulsowa wiązka lasera Nd:YAG zogniskowana na siatkówce; b) – oparzenie laserem CO_2. Biała plamka w centrum (a) jest wynikiem wypalenia termicznego, tzn. efektem koagulacji warstw siatkówki. Przy większych energiach, w siatkówce wytwarzane są dziury powodujące albo krwawienie do ciała szklistego, albo krwawienie to pozostaje w warstwach siatkówki, powodując utratę funkcji w tym obszarze.*

Fig.3.2.3. *Illustration of a laser-induced damage: a) - Nd: YAG laser pulse beam focused on the retina; b) - CO_2 laser burns. White spot in the centre is the result of a thermal burn, i.e. the effect of retina layers coagulation. At higher energies, holes are formed in the retina causing haemorrhage into the vitreous body or haemorrhage within the layers of the retina, leading to loss of function in this area.*

przez tkankę. Natura oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką, a w szczególności z tkanką oka zależy od długości fali oraz czasu naświetlenia, czyli długości impulsu. Najbardziej skutecznym przeciwdziałaniem uszkodzeniu tkanki ludzkiej jest zapewnienie takiego zamknięcia wiązki laserowej, aby nie mogła ona zetknąć się z człowiekiem. W przypadku wystawienia człowieka na naświetlenie, ewentualne wystąpienie uszkodzeń

preventing damage to human tissue is to ensure that the laser beam is closed in a way to avoid coming into contact with the human. In case of human exposure, possible occurrence of tissue damage is determined by the level of exposure. The exposure or irradiation level, which may be defined as the boundary between the safe and the potentially dangerous level is called MPE (Maximum Permissible Exposure).

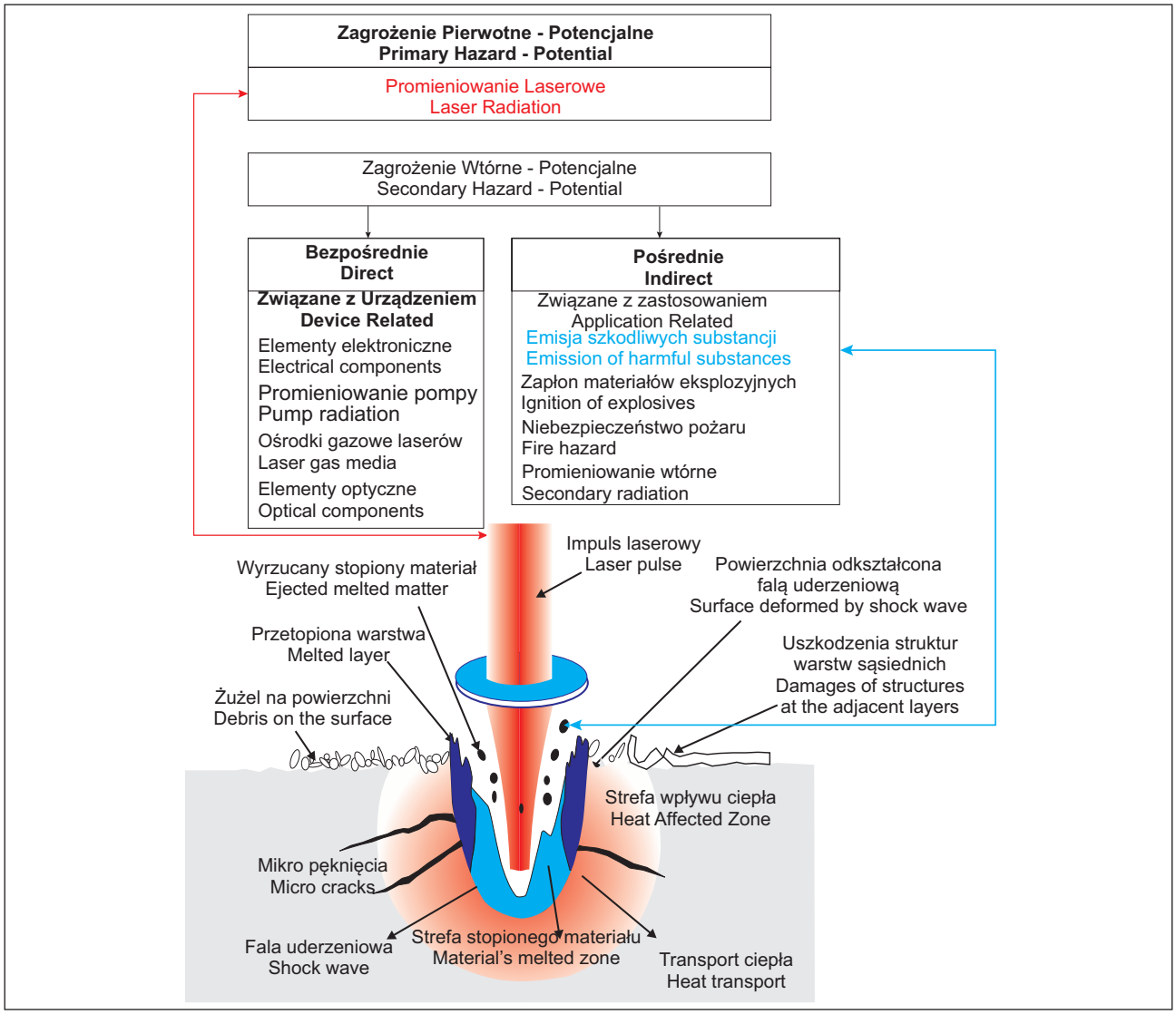
Laser.indb 202 2015-03-04 13:31:01

tkanki określa poziom ekspozycji. Poziom naświetlenia lub napromieniowania, który można określić jako granicę między jego bezpiecznym i potencjalnie niebezpiecznym poziomem nazywany jest MDE (Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja), w nomenklaturze anglojęzycznej określana jako MPE (Maximum Permissible Exposure – maksymalne dozwolone naświetlenie). Jeżeli dla danej długości fali i czasu ekspozycji poziom naświetlenia oka i skóry znajduje się poniżej odpowiednich MDE, to nie wystąpi żadne uszkodzenie. Zaleca się (patrz norma [2]), aby w każdym przypadku ekspozycja na promieniowanie laserowe była tak mała, jak jest to możliwe. Obszar wokół instalacji laserowej, w którym może być przekroczona MDE dla oka, nazywany jest nominalnym obszarem zagrożenia wzroku NObZW (NOHA – Nominal Ocular Hazard Area). Jest to obszar, w którym natężenie napromienienia lub napromienienie przewyższają odpowiednią maksymalną dopuszczalną ekspozycję (MDE) rogówki, włączając możliwość przypadkowego, niewłaściwego skierowania wiązki laserowej. Odpowiadająca temu odległość od apertury wyjściowej lasera nazywana jest nominalną odległością zagrożenia wzroku – NOdZW (NOHD – Nominal Okular Hazard Distance). Wartość NOdZW jest odległością, dla której natężenie napromienienia lub napromienienie przewyższają odpowiednią maksymalną dopuszczalną ekspozycję (MDE) ro-

If for a given wavelength and exposure time the exposure of the eye and skin is below the respective MPE, no damage occurs. It is recommended (see standard [2]), that exposure to laser radiation was always as low as possible. The area in the vicinity of the laser installation, where eye-related MPE may be exceeded is called Nominal Ocular Hazard Area (NOHA). This is an area in which the irradiance intensity or irradiation exceed the appropriate maximum permissible exposure (MPE) of the cornea, including the possibility of accidental misdirection of the laser beam. The corresponding distance from the laser output aperture is called Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD). NOHD value is the distance for which the irradiance intensity or irradiation exceed the appropriate maximum permissible exposure (MPE) of the cornea. The nominal ocular hazard distance NOHD depends on the power (energy) of the laser, beam geometric parameters - divergence angle and the MPE.

Since it is somewhat difficult and complex to calculate the MPE and the NOHD, international standardization bodies have developed a laser safety classification scheme, according to which laser devices were grouped into classes with different threat levels, from the completely safe

Laser.indb 203 2015-03-04 13:31:01



Rys.3.2.4. *Klasyfikacja i ilustracja potencjalnych zagrożeń w procesie laserowej obróbki materiałów.*

Fig.3.2.4. *Illustration of classification of potential threats due to laser processing of materials.*

Laser.indb 204 2015-03-04 13:31:02

gówki. Nominalna odległość zagrożenia wzroku NOdZW zależy od mocy (energii) lasera, parametrów geometrycznych wiązki – kąta rozbieżności oraz od MDE.

Ponieważ obliczenia MDE i NOdZW są trochę skomplikowane i zawiłe, międzynarodowe komitety normalizacyjne opracowały schemat klasyfikacji bezpieczeństwa laserów, zgodnie z którym urządzenia laserowe zgrupowano w klasy o różnym poziomie zagrożeń, od urządzeń całkowicie bezpiecznych – Klasa 1, do urządzeń laserowych niebezpiecznych dla oka i skóry – Klasa 4. W dalszych częściach tego Rozdziału omówiono klasy bezpieczeństwa, wspomniano również o etykietowaniu urządzeń laserowych oraz o wymaganiach stawianych producentom. W przypadku zastosowania laserów do obróbki materiałów, naświetlenie wiązką laserową nie jest często największym zagrożeniem. Gryzące dymy, opary i emitowane gazy reprezentują poważne, potencjalne zagrożenia dla zdrowia i bezpieczeństwa zarówno dla operatora, jak i osób postronnych. Potencjalne niebezpieczeństwa związane z pracą z laserami dotyczą generalnie dwóch zagrożeń. Zagrożenia te dzielimy na pierwotne i wtórne. Z kolei zagrożenia wtórne dzielimy na zagrożenia bezpośrednie i pośrednie, co zilustrowano na rys.3.2.4.

devices - Class 1, to laser devices hazardous to the eyes and the skin - Class 4. The following sections of this Chapter discuss safety classes, also including labelling laser devices and requirements for the manufacturers. In case of using lasers for processing of materials, laser beam irradiation is often not the biggest threat. Acrid fumes, vapours and gases emitted represent a major potential threat to the health and safety of both the operator and bystanders. Potential hazards related to operating lasers generally involve two threats. These may be divided into primary and secondary. Secondary hazards are divided into direct and indirect, as illustrated in fig.3.2.4.

Laser.indb 205 2015-03-04 13:31:02

3.3 PROMIENIOWANIE LASEROWE A OKO

3.3.1. OKO

Generalnie, w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego z ośrodkiem mogą w nim zachodzić procesy odwracalne i nieodwracalne. Aby wystąpiły jakiekolwiek trwałe efekty w ośrodku lub na jego powierzchni, promieniowanie laserowe musi być najpierw zaabsorbowane. Absorpcja promieniowania laserowego w materii, tkance biologicznej, a zwłaszcza w tkance ocznej, bardzo silnie zależy od długości fali. Z kolei rodzaj oddziaływania zależy od długości absorbowanej fali, czasu trwania impulsu oraz natężenia napromienienia. Zanim przejdziemy do omawiania zagrożeń związanych z promieniowaniem laserowym, zobaczmy, jak zbudowane jest oko (rys.3.3.1). Oko jest specjalnie przystosowane do odbioru i przetwarzania promieniowania optycznego z zakresu fal widzialnych. Oko składa się z gałki ocznej i narządów pomocniczych, takich jak zewnętrzne mięśnie gałki ocznej, spojówka i powieki. Gałka oczna ma w przybliżeniu kształt kulisty o średnicy około 25 mm. Jej ściankę tworzą trzy zasadnicze warstwy: zewnętrzna błona włóknista, środkowa błona naczyniowa oraz wewnętrzna, unerwiona błona zwana siatkówką. Siatkówka jest tym właściwym, światłoczułym elementem oka. Fotoreceptorami są pręciki i czopki,

3.3 LASER RADIATION AND THE EYE

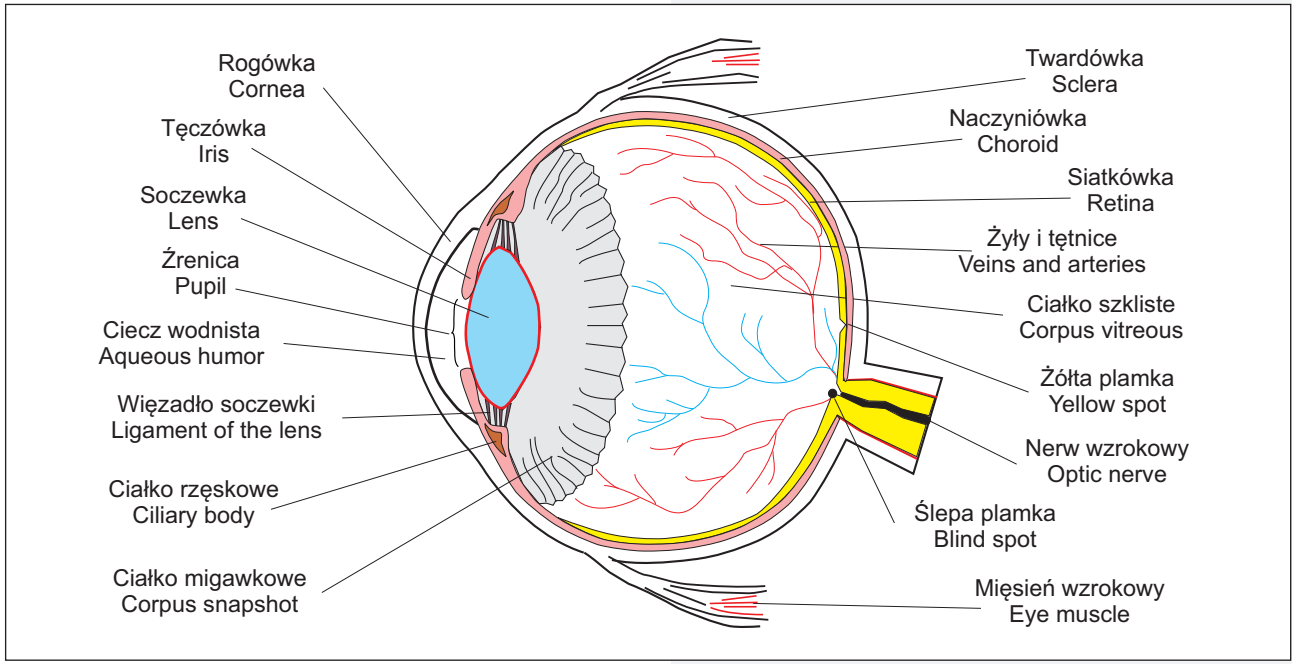
3.3.1. EYE

Generally, as a result of interaction of laser radiation with the medium, reversible and irreversible processes may occur therein. Before any lasting effects occur either in the medium or on its surface, laser radiation must first be absorbed. Absorption of laser radiation in matter, biological tissue, especially ocular tissue, depends to a large extent on the wavelength. The type of interaction depends on the absorbed wavelength, pulse duration and irradiance intensity. Before moving on to discuss risks related to laser radiation, let us see how the eye is constructed (fig.3.3.1). The eye is specially adapted to receive and process optical radiation from the visible wavelength range. The eye is composed of the eyeball and auxiliary organs, such as external muscles of the eyeball, conjunctiva, and eyelids. The eyeball is substantially spherical in shape and has a diameter of about 25 mm. Its wall consists of three basic layers: external fibrous membrane, vascular membrane in the middle and internal innervated membrane called the retina. The retina is the light-sensitive element of the eye. Photoreceptors are provided in the form of

Laser.indb 206 2015-03-04 13:31:02

z których pobudzenie przekazywane jest z oka do ośrodków wzrokowych mózgu za pośrednictwem nerwu wzrokowego.

rods and cones, and from them excitation is transferred from the eye to the visual centres of the brain via the optic nerve.



Rys.3.3.1. *Schemat ludzkiego oka w przekroju poprzecznym. Centralne ostre widzenie jest możliwe jedynie w centralnej części siatkówki. Interesujące jest to, że główna moc załamująca - ogniskująca światło generowana jest przez rogówkę (około 40 dioptrii), podczas gdy soczewka (około 20 dioptrii) adaptuje – obrazuje oddalone i bliskie obiekty.*

Fig.3.3.1. *Diagram of a human eye in cross-section. Sharp central vision is only possible in the central part of the retina. It is interesting that the main refraction power focusing the light is generated by the cornea (approximately 40 dioptres), while the lens (approximately 20 dioptres) adapts - depicts distant and near objects.*

Zewnętrzna błona włóknista składa się z przezroczystej, przedniej części zwanej rogówką i nieprzezroczystej części tylnej zwanej twardówką. W środkowej błonie naczyniowej rozróżnia się tęczówkę i ciałko rzęskowe oraz położoną w tyle

The external fibrous membrane is composed of transparent front portion called the cornea and an opaque rear part known as the sclera. The middle vascular membrane comprises the iris and the ciliary body as well as the choroid

Laser.indb 207 2015-03-04 13:31:02

naczyniówkę. Tęczówkę przebija pośrodku otwór zwany źrenicą, o wielkości zmienianej przez mięśnie – zwieracz i rozszerzacz źrenicy. Źrenica spełnia rolę przesłony regulującej ilość światła wpadającego do oka. Ciało rzęskowe, zgrubiały pierścień na granicy tęczówki i naczyniówki, zawiera mięsień rzęskowy, który za pośrednictwem wiązadełek reguluje zmiany krzywizny soczewki oka (akomodacja). Przed soczewką, wewnątrz gałki ocznej znajdują się komory oka wypełnione przezroczystym płynem, zwanym cieczą wodnistą. Za soczewką leży przezroczyste, galaretowate ciało szkliste. Rogówka, ciecz wodnista, soczewka i ciało szkliste tworzą układ optyczny oka, który załamuje promienie światła i kieruje je na siatkówkę, na której powstaje rzeczywisty, pomniejszony i odwrócony obraz oglądanego przedmiotu.

3.3.2. DŁUGOŚĆ FALI

Ilustrację zachowania się (propagacji) różnych długości fal w tkance ocznej przedstawiono na rys.3.3.2. W zakresie długości fal od 400 nm do 1400 nm wiązka laserowa transmitowana jest do siatkówki, na której jest ogniskowana do bardzo małej średnicy od 10 μm do 20 μm.

Promieniowanie z obszaru nadfioletu, środkowej i dalekiej podczerwieni absorbowane jest

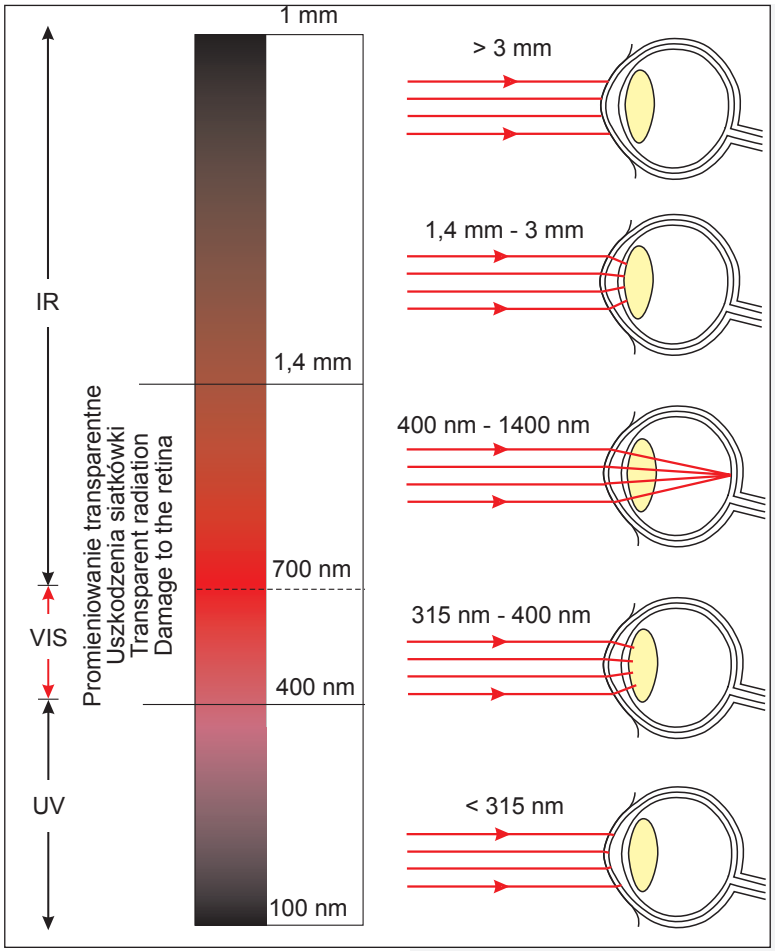
located in the back. In the middle of the iris there is a hole called the pupil, with size adjusted by muscles - sphincter and dilator of the pupil. Pupil acts as a shutter regulating the amount of light entering the eye. The ciliary body, a thickened ring between the iris and the choroid, comprises the ciliary muscle which, through ligaments, regulates changes in the curvature of the lens of the eye (accommodation). In front of the lens, inside the eyeball, there are eyeball chambers filled with a transparent fluid called aqueous humour. Behind the lens there is transparent and gelatinous vitreous body. The cornea, the aqueous humour, the lens and the vitreous body form an optical system of the eye, which refracts rays of light and directs them to the retina, where a real, scaled and inverted image of the object being viewed is produced.

3.3.2. WAVELENGTH

An illustration of the behaviour (propagation) of different wavelengths in the ocular tissue is shown in fig.3.3.2. In the wavelength range from 400 nm to 1400 nm, the laser beam is transmitted to the retina, where it is focused to a very small diameter between 10 μm and 20 μm.

Laser.indb 208 2015-03-04 13:31:02

w rogówce i soczewce ocznej. Promieniowanie z zakresu długości fal od 400 nm do 1400 nm ogniskowane jest na siatkówce. W konsekwencji gęstość energii (mocy) na siatkówce jest dużo większa niż na rogówce, nawet 100 000 razy. Oznacza to, że wiązka z lasera nawet o bardzo małej mocy może być wystarczająca do uszkodzenia siatkówki. Zauważmy, że niebezpieczny obszar uszkodzenia siatkówki zawiera długości fal z przedziału widzialnego (od 400 nm do 700 nm), jak również z zakresu bliskiej podczerwieni (od 700 nm do 1400 nm), które nie jest widzialne dla oka, ale również ogniskowane na siatkówce.



Rys.3.3.2. *Zakresy widm promieniowania elektromagnetycznego interesujące ze względu na bezpieczeństwo podczas pracy z laserami.*

Fig.3.3.2. *The ranges of electromagnetic radiation spectra relating to safe operation of lasers.*

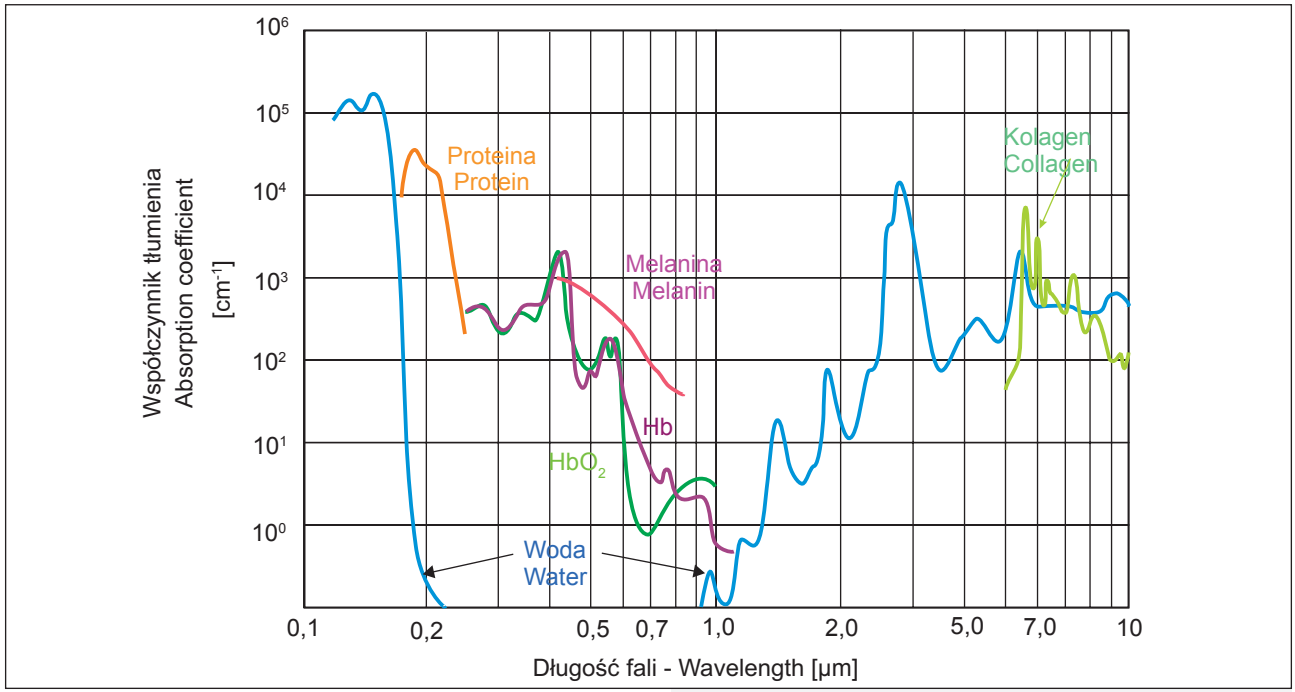
The radiation from the ultraviolet, middle and far infrared regions is absorbed in the cornea and lens of the eye. The radiation from the wavelength range between 400 nm and 1400 nm is focused on the retina. Consequently, the density of energy (power) on the retina is much larger than on the cornea, up to 100 000 times. This means that the laser beam, even one with a very low power, may be sufficient to damage the retina. Let us note that a retinal damage hazard area comprises wavelengths from the visible range (between 400 nm and

Laser.indb 209 2015-03-04 13:31:02

wane jest na siatkówce (rys.7.3.2). Zasadniczo nie ma ostrego rozgraniczenia pomiędzy obszarem widzialnym i niewidzialnym dla oka. Czułość oka ludzkiego została zdefiniowana i unormowana przez CIE w 1924 roku. Czułość oka podczas widzenia dziennego jest największa dla żółtawo-zielonego światła o długości fali 555 nm. Dla tej długości fali oko ludzkie detekuje około 10 fotonów w ciągu sekundy (lub światło o mocy $3{,}58 \cdot 10^{-18}$ W). W porównaniu, dla światła niebieskiego (450 nm) i czerwonego (650 nm) granice reakcji na ilość fotonów wynoszą odpowiednio: 214 i 126 fotonów na sekundę. Obszar nadfioletu oraz podczerwieni jest również podzielony na podzakresy, które odpowiadają za różne rodzaje oddziaływań fotobiologicznych. Z danych CIE, przedziały długości fal w obrębie UV i IR są ściśle związane z głębokością absorpcji promieniowania w tkance, opisywaną za pomocą współczynnika absorpcji. Głębokość wnikania promieniowania w tkankę definiowana jest prawem absorpcji Lamberta – Beera. Mówi ono, że odwrotna wartość współczynnika absorpcji reprezentuje wielkość głębokości, dla której natężenie zmniejsza się o wielkość „e" czyli około 2,7 razy w porównaniu z natężeniem na powierzchni. Stąd duży współczynnik absorpcji odpowiada małej głębokości wnikania. Współczynniki absorpcji wody i tkanki w funkcji długości fali przedstawiono na rys.3.3.3.

700 nm) and near infrared range (700 nm to 1400 nm), which is not visible to the eye but is also being focused on the retina (fig.3.3.2). Basically, there is no sharp distinction between the areas that are visible and invisible to the eye. The sensitivity of the human eye has been defined and regulated by the CIE in 1924. The sensitivity of the eye during daytime vision is the highest for the yellowish-green light with a wavelength of 555 nm. For a wavelength of 555 nm, the human eye detects about 10 photons per second (or light with the intensity of $3{,}58 \cdot 10^{-18}$ W). Compared to blue light (450 nm) and red light (650 nm) the limits of the reaction to the number of photons are 214 and 126 per second, respectively. Ultraviolet and infrared range is also divided into sub-ranges, corresponding to various types of photobiological effects. According to the CIE data, wavelength bands within the UV and the IR are closely related to the depth of radiation absorption in tissue and described using the absorption coefficient. The depth of penetration of radiation in tissue is defined by Lambert - Beer absorption law. It says that the reciprocal value of the absorption coefficient represents the value of the depth at which the radiation decreases by „e" value, or approximately 2.7 times compared to the intensity at the surface. Hence, a large

Laser.indb 210 2015-03-04 13:31:02



Rys.3.3.3. *Właściwości absorpcyjne wody i tkanek w przedziale długości fal 0,1 – 10 µm.*

Fig.3.3.3. *The coefficients of water and tissue absorption in the wavelenght range 0.1 – 10 µm.*

W obszarach nadfioletu (poniżej 400 nm) oraz w środkowej i dalekiej podczerwieni (powyżej 1400 nm), rogówka i soczewka absorbują padające promieniowanie, które nie jest transmitowane do siatkówki. Jednak może wystąpić ich uszkodzenie, jeśli natężenie padającego promieniowania będzie zbyt duże, co objawi się przymgleniem rogówki i soczewki, a tym samym utratą widzenia. Ekspozycja skóry na promieniowanie z obszaru nadfioletu objawiać się będzie jako rumień i opa-

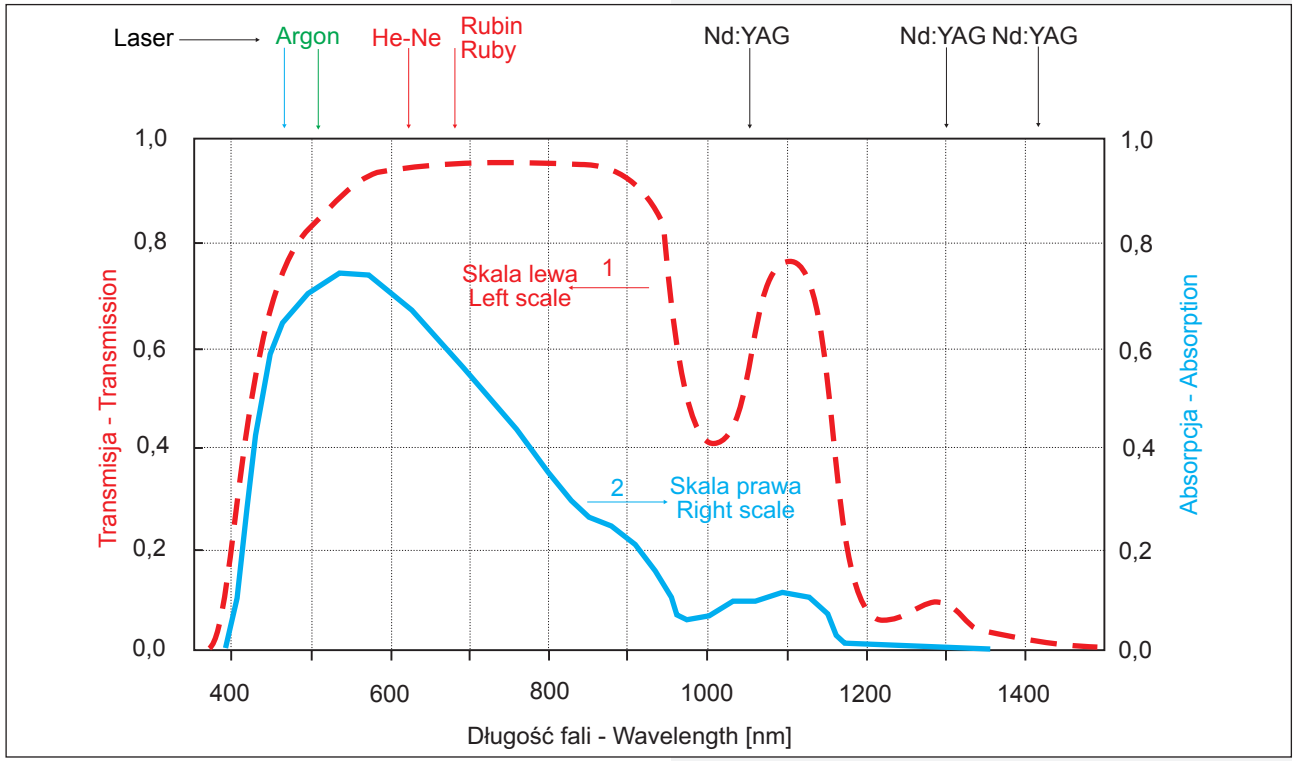
absorption coefficient corresponds to a small depth of penetration. The coefficients of water and tissue absorption as a function of wavelength is shown in fig.3.3.3.

In the areas of ultraviolet (below 400 nm) and in the middle and far infrared (above 1400 nm), the cornea and the lens absorb the incident radiation which is not transmitted to the retina. However, they may suffer damage if the intensity

Laser.indb 211 2015-03-04 13:31:02

rzenie słoneczne. Lasery dużej mocy stosowane w technologii mogą powodować duże i głębokie rany, rys.3.2.3b. Na rys.3.3.4 przedstawiono krzywą transmisji oka na drodze do siatkówki i krzywą absorpcji promieniowania w siatkówce.

of the incident radiation is too large, which will result in the mistiness of the cornea and of the lens, and thus the loss of vision. Exposure of the skin to ultraviolet radiation will manifest itself as erythema and sunburn. High-power lasers used in technology may cause large and deep wounds, fig.3.2.3b. Fig.3.3.4 illustrates the eye



Rys.3.3.4. *Unormowane wykresy: (1) – transmisji promieniowania na drodze do siatkówki; (2) – absorpcji promieniowania w siatkówce.*

Fig.3.3.4. *Normalised graphs: (1) - radiation transmission on the way to the retina; (2) - radiation absorption in the retina.*

Laser.indb 212 2015-03-04 13:31:02

Obszary UV i IR są dalej podzielone na przedziały długości fal zgodnie z oddziaływaniami fotobiologicznymi (Tabela 3.3.1).

transmission profile on the way to the retina and the radiation absorption profile in the retina.

UV and IR regions are further divided into wavelength ranges in accordance with photo-biological interactions (Table 3.3.1).

Tabela 3.3.1. Przedziały długości fal odnoszące się do oddziaływań fotobiologicznych, uwzględniając notację CIE.

Table 3.3.1. Ranges of wavelengths relating to photo-biological interactions, taking into account the CIE notation.

Skrót CIE	Zakres długości fal	Oddziaływanie z tkanką
UV-C	100 nm – 280 nm	Absorbowane w najwyższych warstwach komórek oka i skóry; bardzo skuteczne w wytwarzaniu oparzeń słonecznych; bakteriobójcze. Promieniowanie o długości fali poniżej 180 ÷ 200 nm jest silnie pochłaniane przez tlen w powietrzu i jest także nazywane „ultrafioletem próżniowym". Próżniowy UV zazwyczaj nie musi być brany pod uwagę przy ocenie zagrożeń.
UV-B	280 nm – 315 nm	Pośrednia głębokość absorpcji; wysoka skuteczność wytwarzania oparzeń słonecznych.
UV-A	315 nm – 400 nm	Penetruje głęboko oko i skórę; możliwość uszkodzenia soczewki.
IR-A	700 nm – 1400 nm	Promieniowanie skupiane na siatkówce, ale niewidzialne; głęboko penetruje skórę.
IR-B	1400 nm – 3000 nm	Promieniowanie absorbowane w objętości oka.
IR-C	3000 nm – 1 mm	Promieniowanie absorbowane przez najbardziej zewnętrzne komórki oka i skóry.
CIE abbreviation	**Wavelength range**	**Interaction with tissue**
UV-C	100 nm – 280 nm	Absorbed in the top cells layers of the eye and the skin; very effective in producing sunburn; bactericidal effect. Radiation of a wavelength below 180 ÷ 200 nm is highly absorbed by oxygen in the air and is also called "vacuum ultraviolet". Vacuum UV generally does not need to be taken into account when assessing risks.
UV-B	280 nm – 315 nm	Intermediate absorption depth; high efficiency of producing sunburn.
UV-A	315 nm – 400 nm	Penetrates deeply into the eyes and the skin; potential damage to the lens.
IR-A	700 nm – 1400 nm	Radiation focused on the retina, but invisible; deeply penetrates into the skin.
IR-B	1400 nm – 3000 nm	Radiation absorbed in the volume of the eye.
IR-C	3000 nm – 1 mm	The radiation absorbed by the outermost cells of the eye and of the skin.

Laser.indb 213 2015-03-04 13:31:02

3.4 RODZAJE ODDZIAŁYWAŃ PROMIENIOWANIA LASEROWEGO Z TKANKĄ BIOLOGICZNĄ

Mechanizm wywoływania uszkodzeń przez promieniowanie laserowe jest podobny we wszystkich strukturach biologicznych i dotyczy oddziaływań cieplnych, przejść termoakustycznych, procesów fotochemicznych i efektów nieliniowych. Stopień, w jakim te mechanizmy są odpowiedzialne za uszkodzenie, może być związany z pewnymi fizycznymi parametrami napromieniowującego źródła, z których najważniejsze to: długość fali, czas trwania impulsu, rozmiary obrazu, napromienienie i jego natężenie. Na ogół, w przypadku ekspozycji nadprogowych, dominujący mechanizm jest silnie związany z czasem trwania impulsu. I tak, przy ekspozycjach nanosekundowych i subnanosekundowych dominują efekty akustyczne i efekty nieliniowe. Efekty cieplne występują przy ekspozycjach ponad 10 s, a efekty fotochemiczne przy ekspozycjach od 1 ms do kilku sekund. Promieniowanie laserowe wyróżnia się spośród znanych typów promieniowania kolimacją wiązki. Kolimacja ta, w połączeniu z dużą początkową energią promieniowania, powoduje przekazywanie nadmiernej ilości energii do tkanek biologicznych. Pierwotną przyczyną wszystkich rodzajów uszkodzeń struktur biologicznych przez promieniowanie laserowe

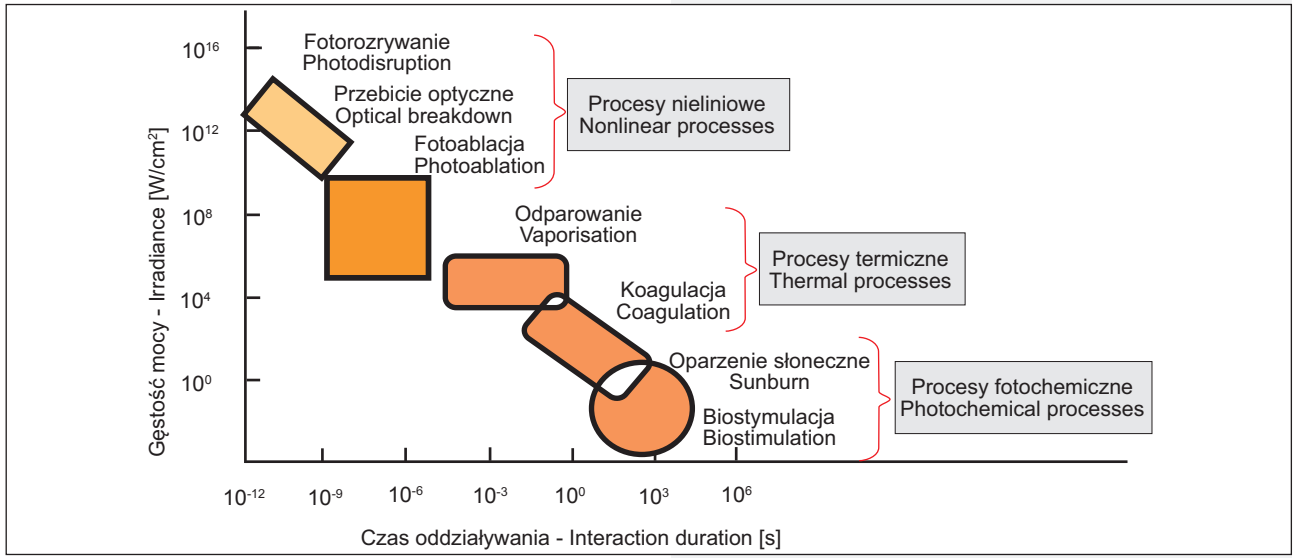
3.4 TYPES OF INTERACTION OF LASER RADIATION WITH BIOLOGICAL TISSUE

The mechanism of laser radiation causing damage is similar in all biological structures and it involves thermal effects, thermoacoustic transitions, photochemical processes and non-linear effects. The extent to which these mechanisms are responsible for the damage may be associated with certain physical parameters of the irradiating source, including primarily wavelength, pulse duration, image dimensions, irradiation and its intensity. In general, in over-threshold exposures, the dominant mechanism is strongly associated with the duration of the pulse. Therefore, the exposure durations of the order of nanoseconds and subnanoseconds are dominated by acoustic and non-linear effects. Thermal effects occur at exposures of over 10 sec, while photochemical effects at exposures from 1 ms to several seconds. Laser radiation stands out among known types of radiation due to the beam collimation. This collimation, combined with high initial radiation energy results in the transfer of excessive energy to biological tissues. The primary cause of all kinds of damage to biological structures by laser radiation of any type is optical radiation absorption. Absorption takes place at the atomic,

Laser.indb 214 2015-03-04 13:31:02

dowolnego rodzaju jest absorpcja promieniowania optycznego. Absorpcja odbywa się na poziomie atomowym, molekularnym i jest procesem zależnym od długości fali. Długość fali decyduje więc, która tkanka może być uszkodzona przez dany laser (długość fali). W zależności od napromienienia i czasu oddziaływania promieniowania laserowego z ośrodkiem, w tym i z tkanką, rodzaje oddziaływań można przedstawić w domenach, zilustrowanych na rys.3.4.1.

molecular level, and it is a process dependent on the wavelength. The wavelength determines, therefore, which tissue may be damaged by specific laser (wavelength). Depending on the time of irradiation and the duration of interaction of laser radiation with the medium, including with tissue, types of interactions may be represented in the domains illustrated in fig.3.4.1.



Rys.3.4.1. *Rodzaj oddziaływania promieniowania laserowego z tkanką będzie określony przez czas oddziaływania z jednej strony i przez wielkość napromieniowania – z drugiej.*

Fig.3.4.1. *Type of interaction of laser radiation with the tissue will be determined by the duration of interaction on the one hand and the irradiation value on the other.*

Jak widzimy, rodzaje oddziaływania promieniowania laserowego z ośrodkami określane są

As we see, types of laser radiation-media interactions are determined by duration of

Laser.indb 215 2015-03-04 13:31:02

za pomocą czasu oddziaływania z jednej strony i gęstością energii z drugiej. Dla przykładu, fotochemiczny mechanizm oddziaływania dominuje dla małych gęstości energii i długich czasów ekspozycji, podczas gdy nieliniowe efekty występują jedynie dla krótkich impulsów i przy dużej gęstości mocy (energii) oświetlanego ośrodka. Skutki tego oddziaływania w zależności od czasu ekspozycji, gęstości energii i długości fali opisujemy poniżej.

3.4.1 EFEKTY TERMICZNE

W wyniku zaabsorbowania dostatecznej energii promieniowania przez tkanki, jej cząsteczki (molekuły) zwiększą częstotliwość drgań, prowadzącą do wzrostu temperatury tkanki. Większość uszkodzeń laserowych jest spowodowana właśnie procesem nagrzewania tkanki. To termiczne uszkodzenie jest zwykle ograniczone do obszaru sięgającego wszystkich granic miejsca absorpcji energii laserowej. Komórki w tym obszarze wykazują cechy spalenia, a uszkodzenie tkanki spowodowane jest głównie denaturacją białek. Jak wskazano wyżej, pojawienie się wtórnych mechanizmów uszkodzeń na skutek działania lasera może wynikać z przebiegu czasowego reakcji cieplnych w tkankach, który zależy bezpośrednio od czasu trwania impulsu i okresu chłodzenia. Reakcje termochemiczne pojawiają się zarówinteraction on the one hand and the energy density on the other. For example, the photochemical interaction mechanism is prevalent in small energy densities and long exposure times, while non-linear effects occur only for short pulses and high density of power (energy) inside the illuminated medium. The effects of this interaction, depending on the exposure time, energy density and wavelength are described below.

3.4.1 THERMAL EFFECTS

As a result of absorbing sufficient radiation energy by tissues, their particles (molecules) will increase the frequency of vibration, leading to an increase in tissue temperature. Most of the laser damage is caused by tissue heating process. This thermal damage is usually confined to the area reaching all the boundaries of laser energy absorption site. Cells in this area show signs of burns, and the damage to the tissue is mainly due to denaturation of proteins. As indicated above, the appearance of secondary mechanisms of damage induced by laser may be due to the time course of thermal reactions in the tissues, depending directly on the pulse duration and the cooling period. Thermochemical reactions occur during both

Laser.indb 216 2015-03-04 13:31:02

no podczas okresu nagrzewania, jak i podczas okresu chłodzenia, zwiększając zależność uszkodzenia termicznego od wielkości plamki. Jeśli do tkanki doprowadzane jest promieniowanie ciągłe lub promieniowanie w postaci długiego impulsu to, na skutek przewodnictwa, obszar biologiczny tkanki doznający wzrostu temperatury stopniowo się powiększa. Ten rozprzestrzeniający się front termiczny powoduje wzrost strefy uszkodzenia, ponieważ coraz więcej komórek przekracza swój próg odporności termicznej. Rozmiary obrazu wiązki są również bardzo ważne, ponieważ stopień rozprzestrzeniania się ciepła na zewnątrz na skutek przewodzenia zależy w równej mierze od wymiarów, jak i od temperatury początkowego obszaru nagrzewania tkanki. Ten rodzaj uszkodzenia termicznego jest zwykle obserwowany w przypadku ekspozycji na ciągłe promieniowanie laserowe lub na promieniowanie w postaci długich impulsów, ale pojawia się również przy krótkich impulsach o odpowiednio dużej energii.

3.4.2 EFEKTY FOTOCHEMICZNE

Efekty destrukcji tkanek mogą być bezpośrednim wynikiem specyficznej, molekularnej absorpcji danej długości fali promieniowania. Ten proces powstaje w wyniku absorpcji energii promieniowania o ściśle określonej długości fali. Wiąże się on

the heating and cooling period, increasing the dependence of thermal damage on the spot size. If the tissue is exposed to continuous radiation or radiation in the form of a long pulse, then due to conduction, the biological tissue area experiencing temperature rise gradually expands. Such an expanding thermal front leads to increased damage area, as more and more cells exceed their thermal resistance threshold. The dimensions of the beam image are also very important, in that the extent to which heat spreads to the outside due to conduction depends as much on the dimensions as on the temperature of the initial tissue heating area. This type of thermal damage is usually observed in the case of exposure to continuous wave laser radiation or to radiation in the form of long pulses, but it also occurs with short pulses of sufficiently high energy.

3.4.2 PHOTOCHEMICAL EFFECTS

The effects of tissue destruction may be a direct result of a specific molecular absorption of specific radiation wavelength. This process results from the absorption of radiation energy with a precisely determined wavelength. However, it involves rather a chemical reaction specific for the excited state than the release of

Laser.indb 217 2015-03-04 13:31:02

jednak raczej z reakcją chemiczną, specyficzną dla stanu wzbudzonego, niż z wyzwalaniem energii w postaci ciepła. Taka reakcja fotochemiczna jest odpowiedzialna za uszkodzenia w przypadku małych poziomów ekspozycji. Na skutek tego mechanizmu, takie tkanki biologiczne jak skóra, soczewka oka, a w szczególności siatkówka mogą podlegać nieodwracalnym zmianom wywołanym wydłużonymi ekspozycjami na promieniowanie UV lub promieniowanie krótkofalowe o umiarkowanych poziomach. Fotochemicznie wywołane zmiany mogą powodować uszkodzenie struktury, jeśli czas napromieniowania jest nadmiernie długi, lub jeśli krótsze ekspozycje są powtarzane przez przedłużające się okresy. Zależność od rozmiarów plamki, jaka występuje przy oddziaływaniu termicznym wywołanym dyfuzją ciepła, tutaj nie istnieje.

3.4.3 EFEKTY NIELINIOWE

Krótkie impulsy promieniowania laserowego o dużej mocy szczytowej (np. z laserów z modulacją dobroci lub z synchronizacją modów) mogą powodować wzrost uszkodzenia tkanki na skutek różnych mechanizmów oddziaływania. Energia jest dostarczana do obiektu biologicznego w bardzo krótkim czasie, a efektem jest wysokie natężenie napromienienia. Tkanki poddawane są tak

energy in the form of heat. This photoreaction is responsible for the damage in case of small exposure levels. Due to this mechanism, biological tissues such as skin, eye lens, an in particular retina may undergo irreversible changes caused by extended exposure to UV radiation or short-wave moderate level radiation. Photochemically induced changes can cause damage to the structure, if the irradiation time is exceedingly long, or if shorter exposures are repeated for prolonged periods of time. The dependence of the size of the spot occurring at thermal interaction resulting from the diffusion of heat does not exist here.

3.4.3 NON-LINEAR EFFECTS

Short laser pulses with high peak power (e.g. Q-switched lasers or lasers with synchronization of modes) may give rise to tissue damage due to different mechanisms of interaction. Energy is supplied to the biological object in a very short period of time, and the result is a high irradiation intensity. Tissues are subjected to a rise in temperature that is so rapid that the liquid components of the cells are converted into gas. In most cases, these phase changes are so rapid that they are explosive, and the cells are ruptured and when they explode, they undergo

Laser.indb 218 2015-03-04 13:31:02

szybkiemu wzrostowi temperatury, że składniki ciekłe jego komórek są przekształcane w gaz. W większości przypadków te zmiany fazy są tak szybkie, że mają charakter eksplozyjny i komórki rozrywają się, a eksplodując – ulegają ablacji. Zmiany ciśnienia w tkance są również wywołane ekspansją termiczną i na skutek znacznego przemieszczenia mogą również wspólnie powodować uszkodzenia mechaniczne w tkankach odległych od warstw absorbujących. Ponadto pojawiają się inne mechanizmy nieliniowych zjawisk optycznych (np. samo-ogniskowanie), które odgrywają znaczną rolę w uszkodzeniach siatkówki w zakresie subnanosekundowych impulsów laserowych.

3.5 ZAGROŻENIA PIERWOTNE

3.5.1 ZAGROŻENIA OKA

Lasery emitujące promieniowanie nadfioletowe i w dalekiej podczerwieni stanowią zagrożenie dla rogówki, a promieniowanie z urządzeń emitujących długości fal z zakresu widzialnego i w bliskiej podczerwieni będzie przenoszone do siatkówki. Lasery działające w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni są szczególnie niebezpieczne dla oka, ponieważ właśnie te cechy, które są niezbędne aby oko byto skutecznym przetwornikiem światła, powodują występowanie dużego napromienienia

ablation. Pressure changes in the tissue are also caused by thermal expansion and as a result of substantial displacement they may also jointly cause mechanical damage to tissues that are far from the absorbing layers. In addition, there are other mechanisms of non-linear optical phenomena (e.g. self-focusing), which play a significant role in the damage of the retina in the range of subnanosecond laser pulses.

3.5 PRIMARY HAZARDS

3.5.1 EYE HAZARDS

Lasers emitting ultraviolet radiation and far infrared radiation are a threat to the cornea, and radiation from devices emitting wavelengths within the visible and near infrared range will be transmitted to the retina. Lasers operating in the visible and near-infrared ranges are particularly dangerous to the eye, as the very same properties that are necessary for the eye to be an effective light transmitter cause the occurrence of large irradiation on highly coloured

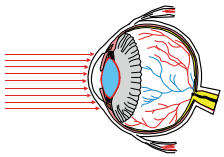
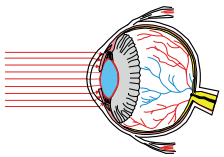
Laser.indb 219 2015-03-04 13:31:02

na mocno zabarwionych tkankach. Wzrost natężenia napromienienia od rogówki do siatkówki jest w przybliżeniu równy stosunkowi pola źrenicy do pola obrazu na siatkówce. W Tabeli 3.5.1 przedstawiono rodzaje uszkodzeń oka promieniowaniem z danego zakresu długości fal. Przedstawiono również, jak głęboko promieniowanie z poszczególnych zakresów wnika w głąb gałki ocznej.

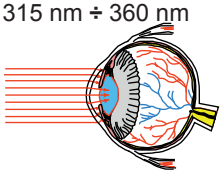
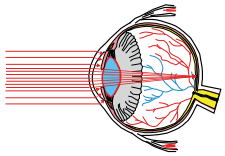
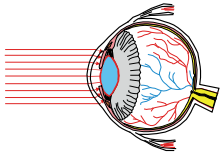
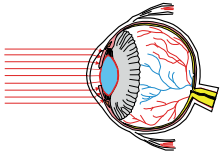
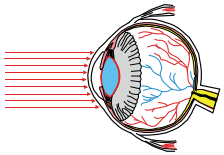
tissues. The increase in the irradiation intensity from the cornea to the retina is approximately equal to the ratio of the pupil surface to the image surface on the retina. Table 3.5.1 shows types of damage to the eye due to radiation from a specific wavelength range. It also shows how deep the radiation from particular ranges penetrates into the eyeball.

Tabela 3.5.1. Rodzaje uszkodzeń oka promieniowaniem z danego zakresu długości fal.

Table 3.5.1. Types of damage to the eye due to radiation from a specific wavelength range.

Zakres widma promieniowania/ Radiation spectrum range	Rodzaj uszkodzenia oka/ Type of eye damage
Nadfiolet - Ultraviolet „C” (UV – „C”) 100 nm ÷ 280 nm 	Promieniowanie absorbowane jest przez najbardziej zewnętrzne warstwy gałki ocznej i skóry. Może wywoływać zapalenie spojówek, sterylizację, zapalne uszkodzenie rogówki, rumień (oparzenie słoneczne), przyspieszone starzenie skóry, a nawet nowotwory skóry (czerniaki). Promieniowanie z tego zakresu znajduje zastosowanie w fotoablacji tkanek i bezpośrednim zrywaniu wiązań chemicznych.
	Radiation is absorbed by the outermost layers of the eyeball and of the skin. It may cause conjunctivitis, sterilisation, inflammatory cornea damage, erythema (sunburn), accelerated skin ageing, and even skin cancer (melanomas). Radiation in this range is used in tissue photoablation and direct breaking of chemical bonds.
Nadfiolet - Ultraviolet „B” (UV-„B”) 280 nm ÷ 315 nm 	Promieniowanie z tego zakresu widmowego charakteryzuje się małą głębokością wnikania w tkankę (lecz również zależy od typu skóry). Wywołuje zapalne uszkodzenie rogówki, przyspiesza starzenie się skóry i wywołuje opaleniznę.
	Radiation from this spectral range is characterised by a low depth of penetration in the tissue (but it also depends on the skin type). It induces inflammatory cornea damage, accelerates skin ageing and produces tan.

Laser.indb 220 2015-03-04 13:31:02

Nadfiolet - Ultraviolet „A" (UV-„A") 315 nm ÷ 360 nm 	Wnika głębiej niż UV-„B" do gałki ocznej i w skórę. Możliwe jest wówczas uszkodzenie soczewki, katarakta fotochemiczna i oparzenie słoneczne skóry, ciemnienie skóry. Reakcja fotouczuleniowa
	It penetrates deeper than UV - „B" to the eyeball and the skin. It may induce lens damage, photochemical cataract and sunburn of the skin, darkening of the skin. Photoallergic reaction.
Widzialne - Visible (VIS) 360 nm ÷ 760 nm 	Słabo (szczególnie dla fal krótszych) wnika w skórę, ale przechodzi doskonale przez gałkę oka do siatkówki (największa czułość oka dla światła zielonego, λ ≈ 555 nm). Promieniowanie z zakresu zielonej i niebieskiej części widma wywołuje efekty fotochemiczne. Z zakresu żółci i czerwieni, przy odpowiednio dużym natężeniu napromienienia, powoduje termiczne uszkodzenie siatkówki.
	It does not strongly (especially for shorter wavelengths) penetrate into the skin, but it goes freely through the eyeball to the retina (the highest sensitivity of the eye to green light, λ ≈ 555 nm). Radiation from the green and blue ranges of the spectrum causes photochemical effects. The one from the yellow and red ranges with a sufficiently high irradiation intensity, causes thermal damage to the retina.
Podczerwone - Infrared (IR „A") 760 nm ÷ 1400 nm 	Promieniowanie niewidzialne dla oka ludzkiego. Wnika do gałki ocznej, a po skupieniu przez soczewkę oka może oparzyć lub uszkodzić siatkówkę, wywołać kataraktę. Głęboko penetruje skórę i wywołuje oparzenie. Dla większych długości fal głębokość wnikania w tkankę maleje.
	Radiation invisible to the human eye. It penetrates into the eyeball, and after focusing by the eye lens it may burn or damage the retina and cause cataracts. It penetrates deeply into the skin and causes burns. The depth of penetration into tissues decreases with the increase of wavelength.
Podczerwone - Infrared (IR „B") 1400 nm ÷ 3000 nm 	Promieniowanie to ze względu na duży współczynnik absorpcji wody jest niewidzialne dla oka, absorbowane jest w wierzchnich warstwach rogówki, może wywołać kataraktę, przymglenie i oparzenie rogówki, a także oparzenie skóry.
	This radiation, which due to the high water absorption coefficient is invisible to the eye, and which is absorbed in the top layers of the cornea, may cause cataracts, corneal mistiness and burn, as well as skin burns.
Podczerwone - Infrared (IR „C") 3000 nm ÷ 15 000 nm 	Promieniowanie z tego zakresu jest absorbowane przez najbardziej zewnętrzne warstwy gałki ocznej i skóry. Może wywoływać oparzenie rogówki i skóry.
	Radiation in this range is absorbed by the outermost layers of the eyeball and skin. May cause corneal and skin burns.

Laser.indb 221 2015-03-04 13:31:02

3.5.2 ZAGROŻENIA SKÓRY

Na ogół skóra ludzka może znieść znacznie większe ekspozycje na działanie energii laserowej niż oko. Biologiczny skutek napromieniowania skóry przez lasery działające w widzialnym (od 400 nm do 700 nm) i podczerwonym (ponad 700 nm) zakresie widmowym może zmieniać się od łagodnej rumieni do dotkliwych pęcherzy. Popielate zwęglenie dominuje w tkankach o dużej absorpcji powierzchniowej po wystawieniu ich na działanie bardzo krótkich impulsów promieniowania laserów o dużej mocy szczytowej. Może powodować zabarwienie skóry, owrzodzenie, wytwarzać blizny na skórze oraz uszkadzać znajdujące się pod skórą tkanki, zwłaszcza pod wpływem szczególnie silnego natężenia napromienienia. W zakresie długości fali od 1500 nm do 2600 nm badania progów biologicznych wskazują, że ryzyko uszkodzenia skóry wykazuje podobne cechy jak dla oka.

3.6 NORMY BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS PRACY Z LASERAMI I PODSTAWOWE DEFINICJE

Moce i energie impulsów emitowane przez lasery osiągają wartości niebezpieczne dla zdrowia człowieka. Uszkodzenia skóry, a zwłaszcza oczu, znane są niemal od początku wynalezienia

3.5.2 SKIN HAZARDS

In general, human skin can withstand much greater exposure to the laser energy than the eye. The biological effect of irradiation of the skin by lasers operating in the visible (400 nm to 700 nm) and infrared (over 700 nm) spectral ranges may vary from mild erythema to severe blistering. Ashen charring is prevalent in tissues with a high surface absorption after they have been exposed to very short pulses of radiation of lasers with high peak power. This may cause skin discolouration, ulcers, skin scars and damage subcutaneous tissue, especially due to particularly high irradiation intensity. In the wavelength range between 1500 nm and 2600 nm, research on biological thresholds indicates that the risk of skin damage is similar to this of the eye.

3.6 SAFETY STANDARDS WHEN WORKING WITH LASERS AND BASIC DEFINITIONS

Power and energy of pulses emitted by lasers reach values that are no safe for human health. Damage to the skin and especially to the eyes has been observed almost since the moment

Laser.indb 222 2015-03-04 13:31:03

lasera. Wydarzyło się już wiele wypadków z całkowitym oślepieniem jego użytkowników, a także postronnych obserwatorów. Wynikało to głównie z braku ostrożności podczas użytkowania sprzętu laserowego, a także z braku świadomości, że laser wysokiej mocy emitujący długość fali poza obszarem widzialnym jest aktualnie włączony. Sprzęt laserowy może być bardzo niebezpieczny i warto przytoczyć fakt, że studentka wyższej uczelni w USA prowadząca badania z laserem impulsowym została oślepiona przez impuls odbity od przypadkowo pozostawionej szklanki na drodze propagacji wiązki [1].

W USA, w 1971 roku wydano normę ANSI-71, na podstawie której po licznych poprawkach wprowadzono normy europejskie IEC 60825 w trzech językach (angielski, francuski, niemiecki) mające tę samą ważność w krajach Unii Europejskiej. Obecna forma polskiej normy PN-EN 60825-1 [2] została zatwierdzona 8 marca 2005 roku przez Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (ważna do 1.09.2010) i jest bez jakichkolwiek zmian tłumaczeniem angielskiej wersji normy europejskiej. Przedmiotem normy PN-EN 60825-1, zgodnie z p. 1.2 normy, jest ochrona osób przed promieniowaniem laserowym w zakresie długości fal od 180 nm do 1 mm przez wskazanie bezpiecznych poziomów roboczych oraz wprowadzenie systemu

of the laser invention. There have already been many cases involving total blinding of both laser users and bystanders. This was mainly due to insufficient caution in the use of laser equipment, and not knowing that a high-power laser emitting a wavelength beyond the visible spectrum was currently switched on. Laser equipment may be very dangerous: notably, a university student in the United States who was conducting tests with pulse laser was blinded by a pulse reflected from a glass accidentally left on the path of beam propagation [1].

A standard ANSI-71 was issued in the US in 1971, which, following a number of amendments, served as a basis to developing European standards IEC 60825 in three languages (English, French, German) that are equally valid in the European Union member countries. The current form of the Polish standard PN-EN 60825-1 [2] was approved on March 8, 2005 by the Head of the Polish Committee for Standardization (valid until 1 September 2010) and it is an unchanged translation of the English version of the European standard. The standard BS EN 60825-1, according to its section 1.2, aims at protecting people from laser radiation in the wavelength range from 180 nm to 1 mm by indicating safe working

Laser.indb 223 2015-03-04 13:31:03

klasyfikacji laserów, określenie wymagań zarówno dla użytkownika jak i dla producenta, zapewnienie odpowiedniego systemu ostrzegania ludzi przez zastosowanie oznakowania, etykiet i instrukcji itp. W normie przez słowo laser rozumie się również diodę elektroluminescencyjną w sensie zagrożenia przez jej promieniowanie. Ważnym uzupełnieniem są dodatkowe normy [3-11] dotyczące szczegółowych problemów, takich jak bezpieczeństwo światłowodowych systemów telekomunikacyjnych [3], filtry, ekrany i środki ochrony oczu [4,5], także przy justowaniu laserów, bezpieczeństwo maszyn przy obróbce laserowej [7,8] i inne [6,9-11].

Polska Norma PN-EN 60825-1 p.t. „Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika", wprowadzona w 2005r. jest bardzo obszerna i zapoznanie się z nią, a w szczególności nabycie umiejętności stosowania jej zaleceń jest nadzwyczaj czasochłonne. Samo poznanie treści normy i jej wdrożenie nie wystarczy. Konieczne jest stałe śledzenie zmian. Norma europejska (EN 60825-1) do czerwca 2002 była czterokrotnie nowelizowana. Pierwsza polska norma została zatwierdzona w roku 2000 jako dosłowne tłumaczenie z języka angielskiego na podstawie jednej z wersji europejskich. Norma z 2005 roku utraciła ważność 1 września 2010 roku, gdyż poprzednia norma europejska została znowelizowana w roku 2007.

levels and introducing a system of classification of lasers, defining the requirements for both the user and the manufacturer, providing an adequate system of warning people through the use of signage, labels and instructions, etc. The standard uses the word "laser" also to designate a light emitting diode in that its radiation poses a threat. An important addition is provided in the form of supplementary standards [3-11] involving specific problems, such as optical fibre communication systems safety [3], filters and eye protection [4,5] including laser adjustment, safety of machines involved in laser processing [7,8] and others [6,9-11].

The Polish Standard PN-EN 60825-1 entitled "Classification of devices, requirements and users guide", introduced in 2005 is very extensive and it takes a lot of time to read it, and in particular to develop the skill to observe its instructions. It is not enough only to get acquainted with the content of the standard and implement it. It is necessary to continuously track changes. European standard (EN 60825-1) was amended four times by June 2002. First Polish standard was approved in 2000 as a literal translation from English on the basis of one of the European versions. As mentioned earlier, the 2005 standard was

Laser.indb 224 2015-03-04 13:31:03

Nowa wersja angielska będzie zapewne tłumaczona na język polski. Chwilowo jest dostępna tylko w wersji oryginalnej, ale od kwietnia 2008 roku decyzją Polskiego Komitetu Normalizacyjnego ma ona status Polskiej Normy. Należy jednak zaznaczyć, że z punktu widzenia prawnego norma ta jest tylko **dokumentem zalecanym** i to jest explicite stwierdzone w jej treści (patrz strona 43 w [2]). Norma może stać się dokumentem obowiązującym z momentem wprowadzenia zarządzenia wydanego przez odpowiedni organ państwowy (lub lokalnie inny), zobowiązującym odpowiednie jednostki do jego przestrzegania. Ale każdy użytkownik lasera zgodnie z dobrze pojętym własnym interesem powinien jednak zapoznać się z normą i podejmować decyzje na podstawie danych zawartych w aktualnej normie.

Tak jak to przedstawiono również w Podrozdziale 3.2, norma wprowadza najwyższy poziom promieniowania laserowego nie powodujący obrażeń oczu lub skóry, który jest określany jako Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja – MDE. Wartości MDE w polskiej normie odniesione są do: długości fali promieniowania laserowego, czasu trwania impulsu laserowego lub czasu trwania ekspozycji, charakteru ekspozycji (bezpośrednie patrzenie w wiązkę promieniowania lub patrzenie w promieniowanie rozproszone) i rozmiaru obrazu

valid until September 1, 2010, as the previous European standard was revised in 2007. New English version will probably be translated into Polish. It is currently only available in the original version, but since April 2008, by the decision of the Polish Committee for Standardization, it has a status of the Polish Standard. It should be noted that from the legal standpoint, the standard is only a **recommended document**, which fact is explicitly stated in the standard (see page 43 [2]). The standard may become a binding document at the time of introduction of a regulation issued by the appropriate state body (or another local body), obliging relevant institutions to follow it. However, all laser users following their well-understood self-interest should get acquainted with the standard and make decisions based on information contained in its current version.

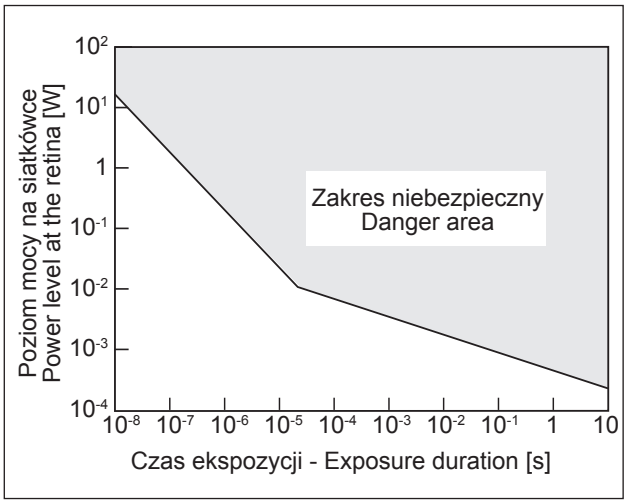
As also shown in section 3.2, the standard introduces the highest level of laser radiation that does not cause damage to eyes or skin, referred to as Maximum Permissible Exposure – MPE. MPE values in the Polish standard refer to the wavelength of the laser radiation, laser pulse duration or the duration of exposure, the nature of exposure (looking directly into the beam of radiation or viewing

Laser.indb 225 2015-03-04 13:31:03

na siatkówce oka (w przypadku promieniowania w zakresie od 400 nm do 1400 nm). W przypadku bezpośredniej ekspozycji oka MDE jest określana w jednostkach natężenia napromienienia (gęstość mocy) [W/m^2] lub napromienienia (gęstość energii) [J/m^2]. W przypadku patrzenia na laserowe źródło rozciągłe lub w wiązkę po odbiciu rozpraszającym, MDE jest określana w jednostkach luminancji energetycznej [W/m^{2}sr]. Podstawą do określenia zagrożenia wywołanego promieniowaniem laserowym jest określenie ekspozycji na podstawie pomiaru lub danych katalogowych urządzenia laserowego i porównanie jej z wartościami katalogowymi podanymi w normie. Jako przykład, na rys.3.6.1 przedstawiono krzywą progu uszkodzenia siatkówki wyznaczającą poziom mocy promieniowania laserów z obszaru długości fal od 400 nm do 1400 nm w funkcji czasu ekspozycji. Z kolei na rys.3.6.2 przedstawiono obszar pracy bezpiecznej, wewnątrz którego nie występuje uszkodzenie rogówki, jeśli pracujemy z laserem CO_2, w funkcji czasu ekspozycji.

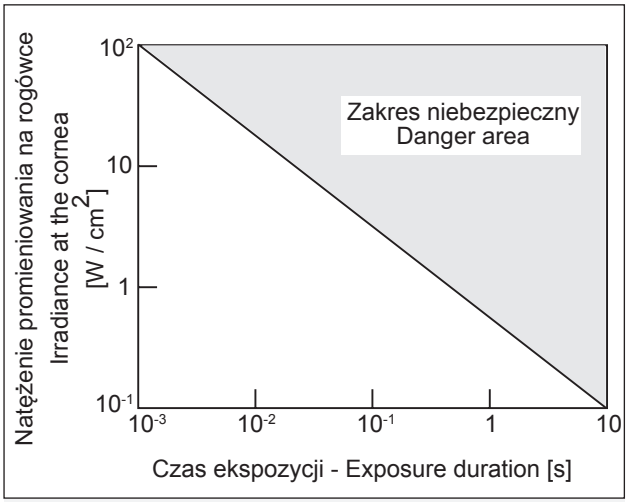
scattered radiation) and the size of the image on the retina (in case of radiation in the range between 400 nm and 1400 nm). In the case of direct eye exposure, MPE is defined in units of irradiation intensity (power density) [W/m^2] or irradiance (energy density) [J/m^2]. When looking at a laser extended source or a beam following a scattered reflection, MPE is defined in units of radiance [W/m^{2}sr]. The basis for determining the risk due to laser radiation is to determine exposure based on measurement or catalogue data of the laser device and comparing it to the catalogue values specified in the standard. As an example, fig.3.6.1 shows a retinal damage threshold profile determining the laser radiation power level from the wavelength range between 400 nm and 1400 nm as a function of exposure time. Fig.3.6.2, in turn, shows the safe work area, inside which there is no damage to the cornea, when working with CO_2 laser, as a function of exposure time.

Laser.indb 226 2015-03-04 13:31:03



Rys.3.6.1. *Diagram progu uszkodzenia siatkówki przez lasery z obszaru długości fal od 0,4 µm do 1,4 µm.*

Fig.3.6.1. *Retinal damage threshold profile for lasers with a wavelength region from 0,4 µm to 1,4 µm.*



Rys.3.6.2. *Diagram progu uszkodzenia rogówki określająca natężenie promieniowania lasera CO_2 (λ = 10,6 µm)*

Fig.3.6.2. *Corneal damage threshold profile determining the laser radiation intensity CO2 (λ = 10,6 µm)*

Ponadto, w Tabeli 3.6.1 podano maksymalny poziom promieniowania laserowego nie powodujący obrażeń wzroku, określany jako Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja – MDE.

In addition, Table 3.6.1 specifies the maximum level of laser radiation that does not cause eye damage, referred to as Maximum Permissible Exposure - MPE.

Tabela 3.6.1. Wartości graniczne MDE dla kilku rodzajów laserów

Table 3.6.1. MPE limit values for several types of lasers

Rodzaj lasera	Długość fali	Graniczna ekspozycja
Argonowo-fluorowy	193	3,0 mJ/cm^2 przez 8 godz.
Ksenonowo-chlorowy	308	40,0 mJ/cm^2 przez 8 godz.
Argonowy	488 nm i 514,5 nm	3,2 mW/cm^2 przez 0,1 s
Miedziowy (na parach miedzi)	510 nm i 578 nm	2,5 mW/cm^2 przez 0,25 s
Helowo-Neonowy	632,8 nm	1,8 mW/cm^2 przez 1,0 s

Laser.indb 227 2015-03-04 13:31:03

Kryptonowy	568 nm i 647 nm	1,8 mW/cm^2 przez 1,0 s
Nd:YAG	1064 nm	5,0 mJ/cm^2 dla 1 ns do 50 ms 5,0 mW/cm^2 przez 10 s
Gazowy CO_2	10640 nm	100 mW/cm^2 przez 10 s
Laser type	**Wavelength**	**Limit exposure**
Ar-F	193	3.0 mJ/cm^2 for 8 h
Xe-Cl	308	40.0 mJ/cm^2 for 8 h
Ar	488 nm and 514,5 nm	3.2 mW/cm^2 for 0.1 sec
Cu (copper vapours)	510 nm and 578 nm	2.5 mW/cm^2 for 0.25 sec
H-Ne	632.8 nm	1.8 mW/cm^2 for 1.0 sec
Kr	568 nm and 647 nm	1.8 mW/cm^2 for 1.0 sec
Nd:YAG	1064 nm	5,0 m/cm^2 for 1 ns to 50 m 5.0 mW/cm^2 for 10 sec
CO_2 gas	10640 nm	100 mW/cm^2 for 10 sec

Norma **PN-EN 60825-1** wprowadza i definiuje również nominalny obszar zagrożenia wzroku (NObZW). Jest to obszar, w którym natężenie napromienienia lub napromienienie przewyższają odpowiednią maksymalną dopuszczalną ekspozycję (MDE) rogówki, włączając możliwość przypadkowego niewłaściwego skierowania wiązki laserowej. Norma definiuje również nominalną odległość zagrożenia wzroku (NOdZW). Jest to odległość, w której natężenie napromienienia lub napromienienie przewyższają odpowiednią maksymalną dopuszczalną ekspozycję (MDE) rogówki. Wykorzystując maksymalne dopuszczalne wartości (MDE) dla oka jako linię graniczną, obszar przekroczenia

In addition, the **PN-EN 60825-1** standard introduces and defines the nominal ocular hazard area (NOHA). This is an area in which the irradiation intensity or irradiance exceed the appropriate maximum permissible exposure (MPE) of the cornea, including the possibility of accidental misdirection of the laser beam. The standard also defines the nominal ocular hazard distance (NOHD). This is the distance for which the irradiation intensity or irradiance exceed the appropriate maximum permissible exposure (MPE) of the cornea. Using the maximum permissible exposure values (MPE) for the eye as the limit, the area where this maximum value

Laser.indb 228 2015-03-04 13:31:03

tej wartości maksymalnej jest nazywany nominalnym obszarem zagrożenia wzroku (NObZW), w którym natężenie napromienienia lub napromienienie przewyższają odpowiednią maksymalną dopuszczalną ekspozycję rogówki. Strefa ta obejmuje nie tylko przestrzeń z przodu lasera, ale każdy obszar, na którym odbicie wiązki może prowadzić do naświetlenia. Często używane jest określenie NOdZW, jako nominalna odległość zagrożenia wzroku od apertury wyjściowej lasera do granicy NOdZW tzn. do punktu, w którym napromieniowanie jest równe MDE. Jest to schematycznie narysowane na rys.3.6.3. Jeśli NObZW i NOdZW uwzględniają możliwość użycia optyki zbierającej, takiej jak lornetki, teleskopy lub lupy wspomagające widzenie, określane są odpowiednio: „rozszerzony NOdZW" i „rozszerzony NOdZW".

Rozszerzony obszar i rozszerzona odległość z użyciem przyrządów wspomagających są znacznie większe niż dla oka nieuzbrojonego w przyrząd optyczny.

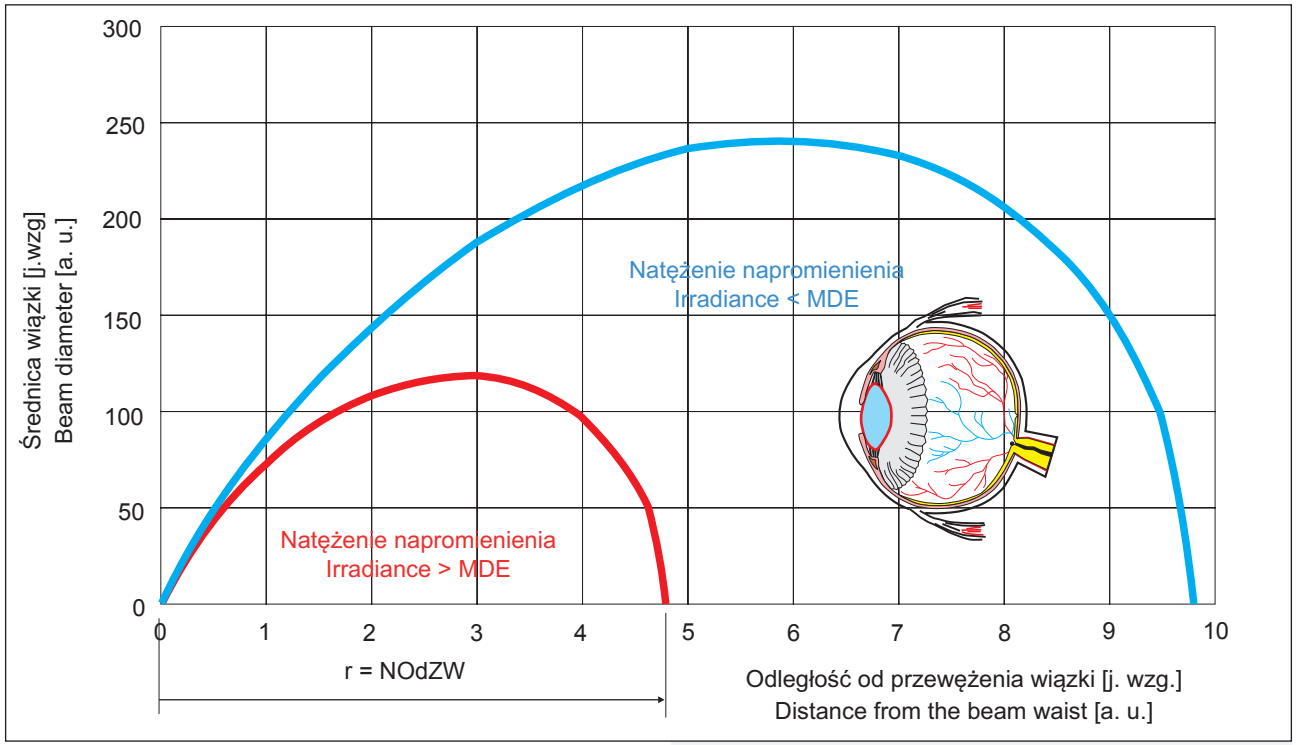
Najlepiej zapobiec naświetleniu przez zamknięcie wiązki laserowej. Jeśli istnieje jednak groźba naświetlenia, należy nosić okulary ochronne, a nawet ubranie chroniące skórę. Wymagana gęstość optyczna osłony oczu zależy od długości fali emisji. Jeśli konieczne jest, aby ochrona obejmowała

is exceeded is called nominal ocular hazard area (NOHA), in which the irradiation intensity or irradiance exceed the corresponding maximum permissible exposure of the cornea. This area includes not only the space in front of the laser, but any area where the reflection of the beam may lead to irradiation. The term NOHD is often used to determine the nominal distance of the eye hazard from the laser output aperture to the NOHD limit, i.e. to the point where the irradiation is equal to MPE. This is schematically drawn in fig.3.6.3. If NOHA and NOHD allow for using light collecting optics such as binoculars, telescopes or magnifying glasses as vision aids, they are referred to as „extended NOHD" and „extended NOHA", respectively.

When supporting devices are used, extended area and extended distance are much larger than in case of an eye unaided by an optical device.

Irradiation may best be prevented by closing the laser beam. If there is, however, the risk of irradiation, it is necessary to wear safety glasses, and even skin-protective clothing. The required optical density of the eye protection depends on the emission wavelength. If the protection needs to include a specific radiation range, it

Laser.indb 229 2015-03-04 13:31:03



Rys.3.6.3. *Ilustracja obszaru w którym napromieniowanie lub naświetlenie przez impuls jest równe MDE dla oka – definiuje granicę NOdZW – czerwona linia. Wewnątrz tej strefy (pod czerwoną linią), poziom napromieniowania przekracza MDE i naświetlenie potencjalnie prowadzi do uszkodzenia wzroku. Poza czerwona linią, np. na poziomie linii niebieskiej, poziom napromieniowania nie przekracza MDE.*

Fig.3.6.3. *Illustration of the area where irradiation or exposure by a pulse is equal to the ocular MPE - defining the NOHD limit - red line. Inside this area (below the red line), the level of irradiation exceeds the MPE and the exposure potentially leads to eye damage. Beyond the red line, e.g. at the level of the blue line, the level of irradiation does not exceed the MPE.*

określone pasmo promieniowania, należy podać minimalną wartość gęstości optycznej osłony (okularów ochronnych) w tym paśmie. Wymaganą wartość gęstości optycznej oblicza się z zależności:

is necessary to specify the minimum value of the optical density of the protection (goggles) in this range. Required optical density valueis calculated using the equation:

Laser.indb 230 2015-03-04 13:31:03

$$D_\lambda = \log_{10} \frac{H_0}{MDE} \qquad (3.6.1)$$

gdzie: H_0 jest spodziewanym poziomem ekspozycji niechronionego oka.

Producent okularów ochronnych podaje wartość gęstości optycznej na okularach ochronnych. Jeśli gęstość optyczna D_λ = 6, oznacza to tłumienie wiązki laserowej milion razy.

3.6.1 OSZACOWANIA NOMINALNEJ ODLEGŁOŚCI ZAGROŻENIA WZROKU

Na rysunkach 3.6.4 - 3.6.7 zilustrowano nominalne odległości zagrożenia wzroku, dla których natężenie napromienienia i napromienienie jest mniejsze od odpowiednich wartości MDE obliczanych dla takich przypadków z Normy **PN-EN 60825-1**.

Przykład 1.

Nominalna odległość zagrożenia wzroku oznacza odległość, w której natężenie napromienienia i napromienienie są mniejsze od odpowiednich wartości MDE. Natężenie napromienienia E w [Wm^{-2}], w odległości w [m] od źródła laserowego (bez tłumienia w atmosferze), wyraża się następująco:

$$D_\lambda = \log_{10} \frac{H_0}{MDE} \qquad (3.6.1)$$

where: H_0 is the expected level of exposure of unprotected eyes.

Goggles manufacturer provides the value of the optical density on protective glasses. If the optical density D_λ = 6, then the laser beam is attenuated one million times.

3.6.1 EVALUATION OF NOMINAL OCULAR HAZARD DISTANCE

Figures 3.6.4 - 3.6.7 illustrate the nominal ocular hazard distances, for which irradiation intensity and irradiance is less than the corresponding MPE values calculated for such cases on the basis of the **PN-EN 60825-1** Standard.

Example 1.

The nominal ocular hazard distance is the distance in which irradiation intensity and irradiance are lower than the corresponding MPE values. Irradiation intensity in E w [Wm^{-2}], in the distance in [m] from the laser source (no attenuation in the atmosphere), is expressed as follows:

Laser.indb 231 2015-03-04 13:31:03

$$E = \frac{4P_0}{\pi(a + r\phi)^2}$$

gdzie: P_0– całkowita moc promieniowania (strumień promieniowania) lasera o pracy ciągłej lub moc średnia promieniowania lasera emitującego powtarzalne impulsy w [W]; a – średnica początkowa wiązki laserowej w [m]; φ- kąt rozbieżności początkowej wiązki laserowej w [rad].

Jeśli E zastąpimy przez E_{MDE}, odległość staje się automatycznie nominalną odległością zagrożenia wzroku (NOdZW) i powyższą zależność możemy przekształcić do postaci:

$$r = NOdZW = \frac{\sqrt{4P_0 / \pi \cdot E_{MDE}} - a}{\phi}$$

Dla P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, a = 0,003 m oraz φ = 1 mrad, otrzymamy: = 1125,38 m.

Na Rys.3.6.4 zilustrowano nominalną odległością zagrożenia wzroku (NOdZW) w najprostszym przypadku.

$$E = \frac{4P_0}{\pi(a + r\phi)^2}$$

where: P_0– total radiation power (radiation flux), of a continuous wave laser or average radiation power of a laser emitting repetitive pulses in [W]; a – initial diameter of the laser beam in [m]; φ – divergence angle of the initial laser beam in [rad].

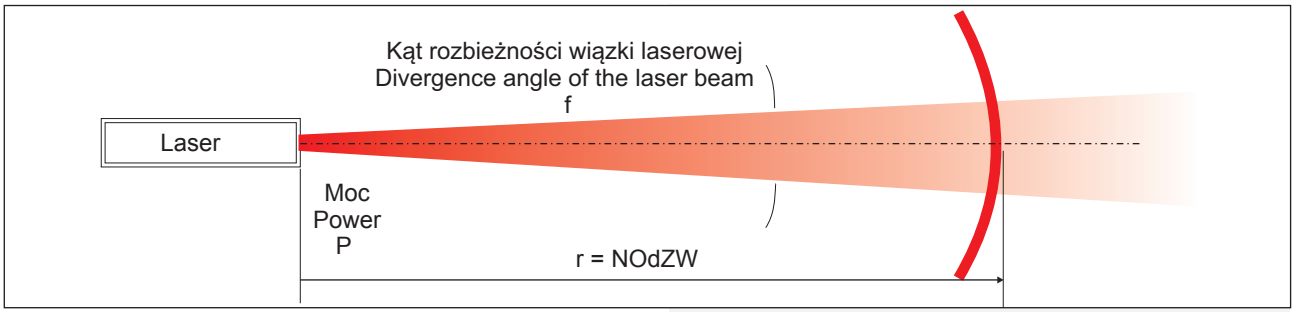
If E we substitute with E_{MDE}, the distance automatically becomes the nominal ocular hazard distance (NOHD) and the above relation may be converted to the form:

$$r = NOdZW = \frac{\sqrt{4P_0 / \pi \cdot E_{MDE}} - a}{\phi}$$

For P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, a = 0,003 m and φ = 1 mrad, we obtain: = 1125,38 m.

Fig.3.6.4. illustrates the nominal ocular hazard distance (NOHD) in the simplest case.

Laser.indb 232 2015-03-04 13:31:03



Rys.3.6.4. *Obliczenia NOdZW dla wiązki rozbieżnej przy założeniu stałego kąta rozbieżności (pole dalekie), φ – jest pełnym kątem rozbieżności wiązki laserowej.*

Fig.3.6.4. *NODH calculations for divergent beam, assuming constant divergence angle (far field), φ – is the full divergence angle of the laser beam.*

Przykład 2.

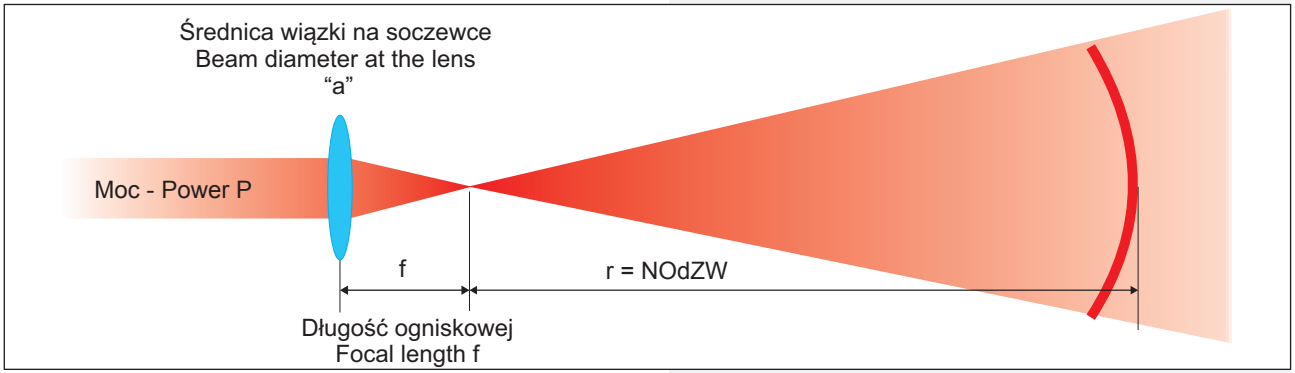
Dla skolimowanej wiązki laserowej, która po wyjściu z lasera zostaje zogniskowana za pomocą soczewki o długości ogniskowej „*f*" (rys.3.6.5), obliczenia NOdZW przeprowadza się według zależności:

$$r = \frac{f}{a} \cdot \sqrt{\frac{4P_0}{\pi \cdot E_{MDE}}}$$

Example 2.

For collimated laser beam, which after exiting from the laser is focused by a lens of focal length „*f*" (fig.3.6.5), NOHD calculation is performed according to the formula:

$$r = \frac{f}{a} \cdot \sqrt{\frac{4P_0}{\pi \cdot E_{MDE}}}$$



Rys.3.6.5. *Obliczenia NOdZW dla skolimowanej wiązki laserowej, która jest zogniskowana za pomocą soczewki o długości ogniskowej „f".*

Fig.3.6.5. *Calculation of NOHD for collimated laser beam which is focused by a lens of focal length „f".*

Laser.indb 233 2015-03-04 13:31:03

Przyjmując dane wejściowe jak poprzednio: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, a = 0,003 m oraz f = 0,05 m, otrzymamy: r = 18,81 m

Przykład 3.

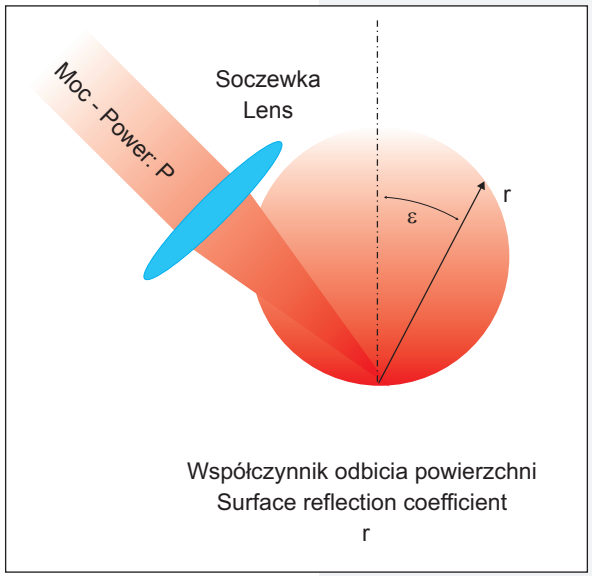
Dla wiązki laserowej dyfuzyjnie odbitej od powierzchni rozpraszającej (patrz Rys.3.6.6), której współczynnik odbicia wynosi ρ, obliczenia NOdZW przeprowadza się według zależności:

$$r = \sqrt{\rho \cdot \frac{\cos\varepsilon}{\pi} \cdot \frac{P_0}{E_{MDE}}}$$

Przyjmując dane wejściowe jak poprzednio: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, ρ = 0,9 oraz kąt rozproszenia ε = 0 (cos θ = 1, najgorszy przypadek), otrzymamy: r = 0,535 m.

Przykład 4.

Dla wiązki laserowej wychodzącej bezpośrednio ze światłowodu, której połówkowy kąt rozbieżności wynosi: β = 15° (patrz Rys.3.6.7), obliczenia NOdZW przeprowadza się według zależności:



Rys.3.6.6. *Obliczenia NOdZW dla dyfuzyjnego odbicia od powierzchni rozpraszającej, - współczynnik odbicia.*

Assuming the input data as previously: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, a = 0,003 m and f = 0,05 m, we obtain: r = 18,81 m.

Example 3.

For a laser beam diffusely reflected from a scattering surface (see Fig.3.6.6) with the reflectance ρ, the NOHD calculation is carried out based on the equation:

$$r = \sqrt{\rho \cdot \frac{\cos\varepsilon}{\pi} \cdot \frac{P_0}{E_{MDE}}}$$

Assuming the input data as previously: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50W/m^2, ρ = 0,9 and scattering angle ε = 0 (cos θ = 1, worst case), we obtain: r = 0,535 m.

Example 4.

For a laser beam directly outgoing from an optical fibre, with the half angle divergence of: β = 15° (see Fig.3.6.7), NOHD is calculated based on the equation:

Fig.3.6.6. *NOHD calculation for diffuse reflection from a scattering surface, - reflection coeeficient.*

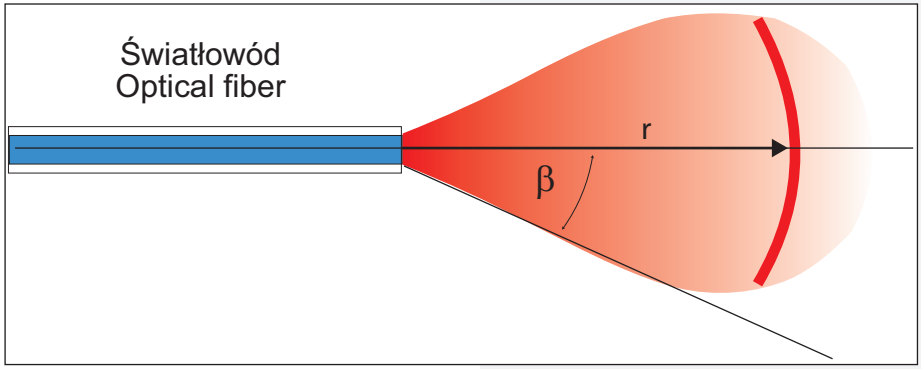
Laser.indb 234 2015-03-04 13:31:03

$$r = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot (\tan \beta)^2} \cdot \frac{P_0}{E_{MDE}}}$$

Przyjmując dane wejściowe jak poprzednio: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, połówkowy kąt rozbieżności wiązki laserowej po wyjściu ze światłowodu β = 15°, otrzymamy: r = 4,21 m.

$$r = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot (\tan \beta)^2} \cdot \frac{P_0}{E_{MDE}}}$$

Assuming the input data as previously: P_0 = 50 W, E_{MDE} = 50 W/m^2, half angle divergence of a laser beam after leaving the optical fibre β = 15°, we obtain: r = 4,21 m.



Rys.3.6.7. *Obliczenia NOdZW dla światłowodu. Połówkowy kąt rozbieżności wiązki laserowej po wyjściu ze światłowodu wynosi β*

Fig.3.6.7. *NOHD calculation for an optical fibre. The half angle divergence of a laser beam after leaving the optical fibre is β.*

Na podstawie przedstawionych przykładów obliczeń wartości NOdZW widać, że nominalna odległość zagrożenia wzroku silnie zależy od geometrii wiązki laserowej.

The presented examples of NOHD calculation show that the nominal ocular hazard distance depends strongly on the geometry of the laser beam.

3.6.2 INSTRUMENTY OPTYCZNE

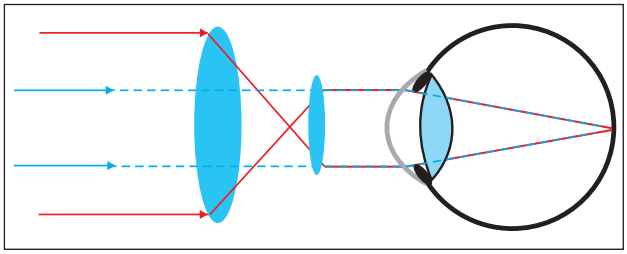
Gdy oko jest wystawione na promieniowanie laserowe poprzez urządzenie optyczne, poziom

3.6.2 OPTICAL INSTRUMENTS

When the eye is exposed to laser radiation through an optical device, the hazard level may

Laser.indb 235 2015-03-04 13:31:03

zagrożenia może wzrosnąć o wiele rzędów wielkości w porównaniu z naświetleniem tą samą wiązką nieuzbrojonego oka. Występują dwie kategorie instrumentów optycznych mogące prowadzić do powstania zagrożenia dwiema drogami: instrumenty optyczne z dużą optyką zbierającą takie jak lornetki lub teleskopy, które zmniejszają średnicę skolimowanej wiązki (wiązki o małej rozbieżności), oraz elementy optyczne, takie jak lupy i szkła powiększające, które pozwalają na oglądanie rozbieżnego źródła (np. z LED i światłowodów) z mniejszej odległości (rys.3.6.8 i 3.6.9).

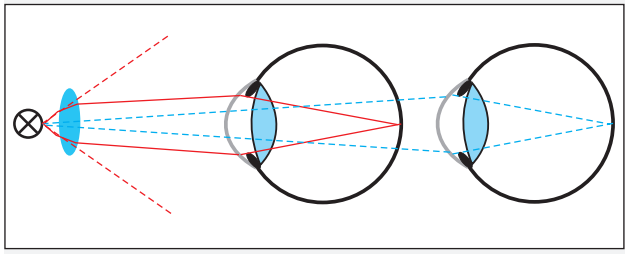


Rys.3.6.8. *Teleskop lub lornetka zwiększa zagrożenie ze strony dobrze skolimowanej wiązki o dużej średnicy, ponieważ więcej energii jest zbierane na wejściu do oka w porównaniu z naświetleniem oka nieuzbrojonego (przerywana niebieska linia). Jeśli średnica wiązki jest mniejsza od źrenicy oka, zagrożenie nie wzrasta.*

Fig.3.6.8. *A telescope or binoculars increases the risk posed by a well collimated beam with a large diameter, since more energy is collected at the inlet to the eye as compared to the irradiation of the naked eye (dotted blue line). If the beam diameter is smaller than the pupil of the eye, there is no risk increase.*

Wzrost zagrożenia spowodowany przez instrumenty optyczne jest uwzględniany w normach bezpieczeństwa.

increase by many orders of magnitude compared to irradiation caused by the same beam of the naked eye. There are two categories of optical instruments that could lead to producing a risk in two ways: optical instruments with large collecting optics such as binoculars or telescopes, which reduce the diameter of the collimated beam (low divergence beam), and optical elements, such as loupes and magnifying glasses that allow to view a divergent source (e.g. from LED and optical fibres) at a smaller distance (fig.3.6.8 and 3.6.9).



Rys.3.6.9. *Lupa lub szkło powiększające może zwiększyć zagrożenie ze strony źródeł o dużej rozbieżności, pozwalając na zobrazowanie źródła z bliższej odległości niż w przypadku nieuzbrojonego oka (linie czerwone), dla którego najmniejsza odległość akomodacji wynosi około 10-15 cm (przerywana linia niebieska). Ze względu na krótszą odległość, więcej energii dociera do oka.*

Fig.3.6.9. *A loupe or a magnifying glass may increase the risk posed by high divergence sources, allowing the imaging of the source at a closer distance than with the naked eye (red lines), for which the shortest accommodation distance is approximately 10-15 cm (dotted blue line). Due to the shorter distance, more energy gets to the eye.*

Increase in the risk due to optical instruments is accounted for in the safety standards.

Laser.indb 236 2015-03-04 13:31:04

3.6.3. PRZEDMIOT NORMY

Przedmiotem przedstawianej Normy jest również:

1. Ochrona osób przed promieniowaniem laserowym w zakresie długości fal od 180 nm do 1 mm, przez wskazanie bezpiecznych poziomów roboczych promieniowania laserowego oraz wprowadzenie systemu klasyfikacji laserów i urządzeń laserowych w zależności od stopnia zagrożenia, jaki one powodują.
2. Określenie wymagań, zarówno dla użytkownika jak i dla producenta, dotyczących ustalenia procedur i dostarczenia informacji w taki sposób, aby zostały przyjęte właściwe środki zabezpieczające.
3. Zapewnienie odpowiedniego systemu ostrzegania ludzi przed zagrożeniami związanymi z promieniowaniem emitowanym z urządzeń laserowych przez zastosowanie oznakowania, etykiet i instrukcji.
4. Zmniejszenie możliwości urazów przez minimalizację niepożądanego promieniowania, wprowadzenie udoskonalonej kontroli zagrożeń promieniowaniem laserowym przez środki ochrony i zapewnienie bezpiecznego użytkowania urządzeń laserowych na podstawie pomiarów kontrolnych przeprowadzanych przez użytkownika.

3.6.3. OBJECT OF THE STANDARD

The object of the Standard presented also includes the following:

1. Protection of people against laser radiation in the wavelength range between 180 nm and 1 mm, by indicating safe working levels of laser radiation and introducing a system of classification of lasers and laser devices by the degree of risk that they may cause.
2. Determination of requirements for both the user and the manufacturer, concerning the elaboration of procedures and the provision of information in such a way enabling proper protection measures to be implemented.
3. Ensuring a proper system warning people against the risks associated with radiation emitted from laser devices by using signage, labels and instructions.
4. Reduction of the possibility of injury by minimising unwanted radiation, introducing enhanced control of laser radiation hazards by means of protection measures and ensuring safe use of laser devices based on control measurements performed by the user.
5. Protection of persons against other hazards resulting from the operation and use of laser devices.

Laser.indb 237 2015-03-04 13:31:04

5. Ochrona osób przed innymi zagrożeniami będącymi wynikiem działania i użytkowania urządzeń laserowych.
6. Opis etykietowania urządzeń laserowych i związanych z tym zagrożeń.

3.7 ZAGROŻENIA WTÓRNE – BEZPOŚREDNIE I POŚREDNIE

W zależności od typu lasera, jego aplikacja w danej technologii może stwarzać wtórne zagrożenia bezpośrednie i pośrednie przedstawione na rys.3.2.4.

3.7.1 ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA ATMOSFERYCZNEGO

Pod tymi zagrożeniami kryją się zagrożenia dwojakiego rodzaju. Do pierwszego zalicza się:

- gazy pochodzące z aparatury laserowej, która pracuje z użyciem przepływającego gazu, lub produkty uboczne reakcji wewnątrz ośrodka laserowego, takie jak bromki, chlorki, fluor i cyjanowodór,
- gazy i pary pochodzące z chłodziw kriogenicznych,
- gazy pod wysokimi ciśnieniami wspomagające działanie urządzenia laserowego, np. argon, azot czy tlen.

6. Description of laser devices labelling and associated risks.

3.7 SECONDARY HAZARDS - DIRECT AND INDIRECT

Depending on the type of laser, its application in a particular technology may pose secondary direct and indirect hazards presented in fig.3.2.4.

3.7.1 ATMOSPHERIC ENVIRONMENT POLLUTION

Those include two types of risks. The first one include:

- gases from laser apparatus, which operates using gas flow, or by-products of the reaction inside the laser medium, such as bromides, chlorides, fluorine and hydrogen cyanide,
- gases and vapours from cryogenic coolants,
- gases under high pressure supporting the operation of the laser device, such as argon, nitrogen and oxygen.

Laser.indb 238 2015-03-04 13:31:04

Do drugiego rodzaju zagrożeń zaliczane są gazy odparowywanego materiału oraz produkty reakcji powstające przy cięciu, drążeniu, spawaniu i czyszczeniu laserowym. Materiały te mogą zawierać tlenek węgla, dwutlenek węgla, ozon, ołów, rtęć, inne metale i materiał biologiczny. W trakcie czyszczenia laserowego, pary odparowanego materiału mogą powodować pirolizę. Odpady z czyszczenia laserowego w wyniku topnienia i odpryskiwanie usuwanej warstwy składają się głównie z materiału usuniętego z podłoża. Dodatkowo mogą tworzyć się niewielkie ilości związków nie będących częścią pierwotnego materiału nawarstwienia, gazów powstałych w trakcie termicznego oddziaływania na substancje organiczne lub ich ewentualnego spalania. Wytworzone przez laser zanieczyszczenia powietrza wydzielają nieprzyjemne zapachy i widoczny dym. Usuwanie niektórych materiałów organicznych uwalnia potencjalnie szkodliwe zarodki bakteryjne, grzybicze i wirusowe. Reakcja organizmu ludzkiego, w odpowiedzi na środki chemiczne zależy od wielu czynników, między innymi od rodzaju środka, jego koncentracji i formy oraz cech indywidualnych organizmu (wiek, płeć, genetyka, zdrowie itp.). Niektóre środki chemiczne mają własności drażniące, inne powodują immunologiczną reakcję u osób alergicznych, jeszcze inne mogą spowodować choroby w wiele lat po ich kumulacji w organizmie. Te potencjalnie niebezpieczne opary powinny zostać usunięte ze strefy wdychania.

The second type of hazards includes gases from evaporated material and products of the reaction formed by laser cutting, drilling, welding and cleaning. These materials may contain carbon monoxide, carbon dioxide, ozone, lead, mercury, other metals and biological material. During laser cleaning vapours of the vaporised material may cause pyrolysis. Laser cleaning debris due to melting and chipping of the removed layer are mainly composed of material removed from the substrate. Additionally, small amounts of compounds may be produced that are not part of the original encrustation material, and gases produced during the thermal interaction with organic substances or their possible combustion. Air pollution generated by the laser produces unpleasant odours and visible smoke. Removal of certain organic materials releases potentially harmful bacterial, fungal and viral germs. The response of the human body to chemicals depends on various factors, including the type of the product, its concentration and form, as well as individual characteristics of the body (age, gender, genetics, health, etc.). Some chemicals have irritant properties, others cause an immune response in allergic persons, and others can cause diseases even many years after their accumulation in the body. These potentially dangerous vapours should

Laser.indb 239 2015-03-04 13:31:04

Inne opary będące rezultatem laserowego usuwania zasiarczeń mogą zawierać znaczny procent cząstek o średnicach mniejszych od 5 μm. Tak małe cząsteczki mogą przenikać w płucach aż do pęcherzyków płucnych i potencjalnie są bardzo niebezpieczne ze względu na rozpuszczanie swoich soli alkalicznych i metalicznych. Takie rozmiary cząsteczek nie są usuwane w procesie oddychania.

3.7.2 ZAGROŻENIA SPOWODOWANE PROMIENIOWANIEM TOWARZYSZĄCYM

W trakcie obróbki materiałów możliwe jest wystąpienie znacznego zagrożenia promieniowaniem nadfioletowym związanym z lampami błyskowymi i rurami wyładowczymi laserów o pracy ciągłej, szczególnie w przypadku stosowania rurek lub zwierciadeł przepuszczających nadfiolet (np. wykonanych z kwarcu). To samo dotyczy promieniowania widzialnego i z zakresu bliskiej podczerwieni, emitowanego z lamp błyskowych i z pomp optycznych, a także wtórne promieniowanie z napromieniowanych obiektów (spawanie, cięcie), które może osiągać potencjalnie groźną luminancję energetyczną.

3.7.3 ZAGROŻENIE HAŁASEM

W zasadzie istnieją trzy źródła hałasu w miejscu obróbki materiałów – czyszczenia laserowe-

be removed from the inhalation zone. Other vapours resulting from the laser removal of sulphation crusts may comprise a significant share of particles of diameter smaller than 5 μm. Particles thus small can penetrate the lungs down to the alveoles and they are potentially very dangerous due to the solubilization of their alkaline and metallic salt compounds. Particles of this size are not removed in the process of respiration.

3.7.2 ACCOMPANYING RADIATION HAZARDS

Materials processing may involve substantial ultraviolet radiation hazard related to flash lamps and discharge tubes of continuous wave lasers, especially when using UV-permeable tubes and mirrors (e.g. made of quartz). The same applies to visible and near infrared radiation emitted from flash lamps and optical pumps as well as secondary radiation from irradiated objects (welding, cutting), which may reach potentially dangerous radiance.

3.7.3 NOISE HAZARD

In principle, there are three sources of noise where materials are being processed

Laser.indb 240 2015-03-04 13:31:04

go: a) – sam system laserowy (np. pompa wodna, wentylatory), b) – urządzenie odsysające opary i c) – sam proces obróbki – czyszczenia laserowego, czyli usuwania niepożądanych warstw wierzchnich. Absorpcja impulsowego promieniowania laserowego w nawarstwieniu, grzanie, a następnie ablacja materiału z obrabianej powierzchni prowadzi do gwałtownej ekspansji i kompresji molekuł powietrza nad powierzchnią obiektu. Cząstki materii usuwane są na tyle gwałtownie, że mogą generować falę uderzeniową, a w konsekwencji głośną falę dźwiękową w powietrzu nad oświetlanym obiektem, która słyszalna jest jak trzaśnięcie z bicza. Fala dźwiękowa praktycznie zanika po usunięciu nawarstwienia.

3.7.4 ZAGROŻENIA ELEKTRYCZNE, POŻAROWE I INNE

Przed pierwotnym zagrożeniem związanym z promieniowaniem laserowym można się łatwo zabezpieczyć poprzez okulary ochronne o odpowiedniej gęstości optycznej.

Główne wtórne zagrożenie towarzyszące stosowaniu laserów jest związane z elektrycznością. W wielu systemach laserowych występują wysokie napięcia zasilające (> 1 kV), a lasery impulsowe są szczególnie niebezpieczne ze względu na energię

during laser cleaning a) - the laser system itself (e.g. water pump, fans), b) - suction device for removing fumes c) - the process of laser cleaning, or removal of undesirable surface layers itself. The absorption of pulse laser radiation in the encrustation, heating and then ablation of material from the processed surface leads to rapid expansion and compression of air molecules over the surface of the object. Particles of matter are removed so violently that they can generate a shock wave and consequently a loud sound wave in the air above the illuminated object, the sound of which is similar to slamming a whip. The sound wave practically vanishes after the encrustation is removed.

3.7.4 ELECTRICAL, FIRE AND OTHER HAZARDS

Protection against laser radiation primary hazards may be easily provided by using goggles with appropriate optical density.

The main secondary hazard related to using lasers is associated with electricity. Many laser systems use high supply voltages (> 1 kV), while pulse lasers are particularly dangerous due to electrical energy stored in the capacitor bank.

Laser.indb 241 2015-03-04 13:31:04

elektryczną zgromadzoną w baterii kondensatorów. Co więcej, takie podzespoły laserów jak: przełączniki dobroci rezonatorów, iskierniki, komory z wyładowaniem jonizacyjnym etc., pracują również przy wysokich napięciach. Zasilacz i stowarzyszone z nim wyposażenie elektryczne lasera może spowodować poważny szok, pożar, a nawet śmierć przez porażenie elektryczne. Do momentu zdjęcia pokryw ochronnych nie stwarza to zazwyczaj żadnego zagrożenia. Gdy pokrywy systemu laserowego są zdjęte, w trakcie obsługi i naprawy powinna być zachowana wyjątkowa ostrożność. W większości laserowych systemów czyszczących, w systemach chłodzenia wykorzystywana jest woda, co może spowodować duże zagrożenie przy jej kontakcie z elementami elektrycznymi systemu. W warunkach normalnych nie powinno to się zdarzyć, należy jednak znów zachować ostrożność w trakcie obsługi i serwisu. Zagrożenia pożarowe mogą być konsekwencją przebić elektrycznych lub wynikać z zapłonu łatwopalnych materiałów wiązką laserową o dużej mocy szczytowej.

W czasie eksploatacji niektórych urządzeń laserowych dużej mocy możliwa jest eksplozja w baterii kondensatorów lub w zespołach pomp optycznych. Możliwe jest również wytworzenie lotnych cząstek materiałów wyrzucanych z powierzchni napromieniowanych materiałów podczas laserowego cięcia,

Moreover, such laser components as resonator Q-switches, spark gaps, ionisation discharge cavities, etc. operate also at high voltages. The power supply and associated laser electrical equipment may cause serious shock, fire or even death due to electric shock. Until the protective covers are removed, it does not rather pose any threat. When the laser system covers are removed during maintenance and repair, extreme caution should be paid. Most laser cleaning systems use water in their cooling systems, which may produce a high risk in case of its contact with electrical components of the system. This should not happen under normal conditions, and yet caution is advised during operation and service. Fire hazards may be a consequence of electric breakdown or ignition of flammable materials by a laser beam with high peak power.

During the operation of certain high-power laser devices there is a risk of an explosion in a capacitor bank or in optical pumping units. It is also possible to produce volatile particles of materials discharged from the surface of irradiated materials during laser cutting, drilling and welding. There is also the risk of possible explosive reactions of active substances of chemical lasers or other gases used in the

Laser.indb 242 2015-03-04 13:31:04

drążenia i spawania. Zagrożenie stanowi również możliwość reakcji wybuchowych substancji czynnych laserów chemicznych lub innych gazów używanych w laboratorium. Ciecze kriogeniczne mogą powodować poparzenia i wymagają szczególnej ostrożności przy obchodzeniu się z nimi.

3.8 KLASY BEZPIECZEŃSTWA LASERÓW

Ze względu na możliwość szerokiego zakresu generacji długości fal (od nadfioletu aż do dalekiej podczerwieni), szeroki zakres emitowanej energii (mocy) w wiązkach laserowych, zagrożenia powstające w wyniku ich używania zmieniają się również w bardzo szerokim zakresie. Nie jest możliwe traktowanie laserów i urządzeń laserowych jako pojedynczej grupy urządzeń, do której można stosować wspólne granice bezpieczeństwa. Stąd systemy laserowe, w tym i systemy do czyszczenia laserowego zaliczone są do określonej klasy laserowej wyrobów, określającej dopuszczalną emisyjność lasera ze względu na możliwość spowodowania urazu. Producent lub dystrybutor systemu laserowego odpowiada za jego właściwą klasyfikację i spełnienie wymagań danej klasy produktów (oznaczenia, wymogi bezpieczeństwa itp.). Poniżej wymieniono klasy produktów, a ich pełny opis znajdziemy w cytowanej już wcześniej Polskiej Normie PN-EN 60825-1 p.t. „Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkownika”.

laboratory. Cryogenic liquids may cause burns and handling them requires special precautions.

3.8 LASER SAFETY CLASSES

Given the possibility of a broad range wavelength generation (from ultraviolet to far infrared), a wide range of emitted energy (power) in laser beams, hazards resulting from their use also vary in a very wide range. It is not possible to treat lasers and laser devices as a single group of devices to which common safety limits can apply. Thus, laser systems, including laser cleaning systems are included in a specific laser class of products defining acceptable emissivity of the laser given the risk of causing an injury. The manufacturer or distributor of the laser system is responsible for its appropriate classification and meeting the requirements of the products of each class (labels, safety requirements, etc.). Particular classes of products are listed below, and their complete description is included in the previously cited Polish Standard PN-EN 60825-1 entitled „Equipment classification, requirements and user guide”.

Laser.indb 243 2015-03-04 13:31:04

3.8.1 KLASY LASERÓW

Klasa 1 – lasery z natury bezpieczne w każdych przewidywalnych warunkach pracy, także w przypadku patrzenia w wiązkę przez przyrządy optyczne.

Klasa 1 M – lasery emitujące promieniowanie w zakresie długości fali od 302,5 nm do 4 000 nm, które są bezpieczne w przewidywalnych warunkach pracy, tak jak klasy 1, ale mogą stanowić zagrożenie, jeśli użytkownik wprowadzi elementy optyczne w tor wiązki (instrumenty projekcyjne, teleskopy, mikroskopy, itp. układy optyczne).

Klasa 2 – lasery niecałkowicie bezpieczne, emitujące promieniowanie widzialne w zakresie długości fali od 400 nm do 700 nm, gdzie ochrona oczu jest w naturalny sposób zapewniana przez reakcje awersyjne, łącznie z odruchem zamknięcia (mrugania) oczu na skutek silnego oświetlenia. Te reakcje zapewniają odpowiednią ochronę także w przypadku patrzenia w wiązkę przez przyrządy optyczne. W tej klasie laserów należy poczynić jednak uwagę, iż poza zakresem długości fali od 400 nm do 700 nm wymagane jest, aby jakiekolwiek dodatkowo emitowane promieniowanie laserów klasy 2 było poniżej GED dla klasy 1. GED jest maksymalnym poziomem dostępnej emisji pro-

3.8.1 LASER CLASSES

Class 1 – lasers inherently safe under all foreseeable operating conditions, including when viewing the beam through optical instruments.

Class 1 M – lasers emitting radiation in the wavelength between 302.5 nm and 4 000 nm which are safe under foreseeable operating conditions, such as class 1, but which may be dangerous if the user inserts optical elements in the beam path (projection instruments , telescopes, microscopes, and similar optical systems).

Class 2 – not fully safe lasers emitting visible radiation in the wavelength range between 400 nm and 700 nm where eye protection is naturally provided by aversive reactions, including eye-closure (blink) reflex due to strong lighting. These reactions provide adequate protection also when viewing the beam through optical instruments. As regards this class of lasers, however, it needs to be said that outside the wavelength range of between 400 nm and 700 nm it is required that any additional radiation emitted by class 2 lasers was below the AEL class 1. AEL is the maximum level of radiation emission permitted accessible within each class.

Laser.indb 244 2015-03-04 13:31:04

mieniowania dozwolonym w obrębie poszczególnej klasy.

Klasa 2M – lasery emitujące promieniowanie widzialne w zakresie długości fali od 400 nm do 700 nm, gdzie ochrona oczu jest w naturalny sposób zapewniana przez reakcje awersyjne, łącznie z odruchem mrugania. Jednak patrzenie w wiązkę promieniowania może stanowić zagrożenie, jeśli użytkownik wprowadzi elementy optyczne w tor wiązki (instrumenty projekcyjne, teleskopy, mikroskopy, itp. układy optyczne). W tej klasie laserów należy poczynić również uwagę, iż poza zakresem długości fali od 400 nm do 700 nm wymagane jest, aby jakiekolwiek dodatkowo emitowane promieniowanie laserów klasy 2M było poniżej GED dla klasy 1M.

Klasa 3R – lasery emitujące promieniowanie w zakresie długości fali od 302,5 nm do 1 mm, niebezpieczne dla oczu, ale ryzyko urazu jest małe do momentu dłuższej ekspozycji przy bezpośrednim patrzeniu w wiązkę. Granica emisji dostępnej nie przekracza pięciokrotnej wartości GED dla klasy 2 w zakresie długości fali od 400 nm do 700 nm i pięciokrotnej wartości GED dla klasy 1 dla pozostałych długości fal.

Klasa 3B – lasery zazwyczaj niebezpieczne i za-

Class 2M – lasers emitting visible radiation in the wavelength range between 400 nm and 700 nm where eye protection is naturally provided by aversive reactions, including blink reflex. However, looking into the beam can pose a risk if the user inserts any optical elements in the beam path (projection instruments, telescopes, microscopes and similar optical systems). As regards this class of lasers, however, it also needs to be said that outside the wavelength range of between 400 nm and 700 nm it is required that any additional radiation emitted by class 2M lasers was below the AEL class 1M.

Class 3R – lasers emitting radiation in the wavelength of between 302.5 nm and 1 mm, dangerous for the eyes, but the risk of injury is low as long as there is no long exposure when viewing in the beam directly. Accessible emission limit does not exceed five times the AEL for class 2 in the wavelength range from 400 nm to 700 nm, and five times the AEL for class 1 for the other wavelengths.

Class 3B – lasers usually dangerous and constituting a risk when directly viewing the beam (i.e. in the NOHD range). It is usually safe to view diffusion-reflected radiation (scattered radiation).

Laser.indb 245 2015-03-04 13:31:04

grażające przy bezpośrednim patrzeniu w wiązkę (tj. w zakresie NOdZW). Patrzenie na odbite dyfuzyjnie promieniowanie (promieniowanie rozpraszane) jest zazwyczaj bezpieczne.

Klasa 4 – lasery bardzo niebezpieczne, mogące wytworzyć zagrożenia także przy odbiciach rozpraszających. Mogą one powodować obrażenia skóry, a ich użycie może wywołać pożar lub emisję szkodliwych oparów. Ich stosowanie wymaga największej – ekstremalnej ostrożności.

Podział laserów na klasy pod względem zagrożeń przedstawiono również na rys.3.8.1. Jak widać, urządzenia laserowe zgrupowano w czterech różnych klasach, dla których określono poszczególne granice emisji dostępnej (GED). Lasery klasy 1 są całkowicie bezpieczne (maksymalny poziom dopuszczalnej ekspozycji nie może być przekroczony w żadnym wypadku), lub są bezpieczne z uwagi na zalety ich konstrukcji. Lasery klasy 2 są to urządzenia małej mocy emitujące promieniowanie widzialne w sposób ciągły lub impulsowy. Moc lub energia wyjściowa tych urządzeń jest ograniczona do GED klasy 1 dla czasów ekspozycji do 0,25 s. Dla lasera o pracy ciągłej stanowi to 1 mW. Lasery te są całkowicie bezpieczne, ale ochrona oczu jest uzyskiwana na ogół przez instynktowne rekcje obronne, w tym odruch mrugania. Lasery klasy 3A to lasery mające

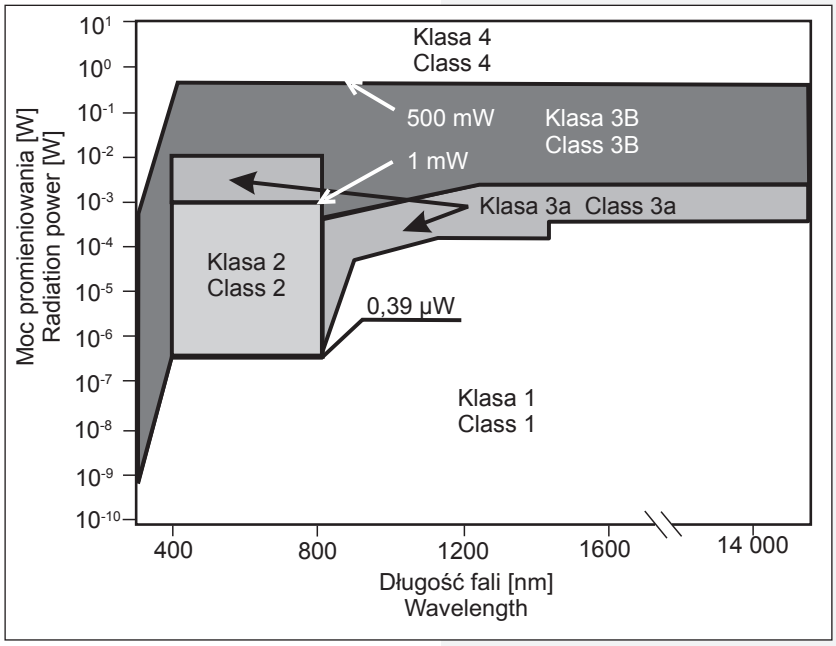
Class 4 – highly dangerous lasers which may result in risks also in case of scattering reflections. They can cause skin injuries, and their use may cause a fire or emission of noxious fumes. Using them requires the highest - extreme caution.

The division of lasers into classes by risks is also shown in fig.3.8.1. As you can see, laser devices are grouped into four different classes, specifying accessible emission limits (AEL) for each of them. Class 1 lasers are completely safe (maximum permissible exposure level may not be exceeded under no circumstances), or they are safe due to the advantages of their design. Class 2 lasers are low-power devices emitting visible radiation in a continuous or pulse mode. Output power or energy of these devices is limited to class 1 AEL for exposure times up to 0.25 sec. For continuous wave laser it amounts to 1 mW. These lasers are completely safe, but eye protection is generally achieved by instinctive defensive reactions, including the blink reflex. Class 3A lasers have output power of up to 5 mW in continuous operation mode, or exceeding the five times limit of class 2 in pulse mode or scanning in the visible radiation range. However, the irradiation intensity at any point of the visible beam may not exceed 25 W/m^2. For

Laser.indb 246 2015-03-04 13:31:04

moc wyjściową do 5 mW przy pracy ciągłej, lub przekraczające pięciokrotną granicę klasy 2 przy pracy impulsowej lub skanowaniu w paśmie widzialnym promieniowania. Jednakże natężenie napromienienia w dowolnym punkcie wiązki widzialnej nie może przekraczać 25 W/m^2. Dla innych zakresów widmowych promieniowanie laserowe nie może być silniejsze niż pięciokrotna wartość GED klasy 1, a wyjściowe natężenie napromienienia lub napromienienie podane w normie nie może zostać przekroczone.

Patrzenie w wiązkę lasera klasy 3A przez przyrządy optyczne (np. lunetę dwuoczną) może być niebezpieczne. Dla laserów emitujących promieniowanie w paśmie widzialnym, ochrona nieuzbrojonego oka jest osiągana przez instynktowne reakcje obronne, w tym odruch mrugania. W przy-



Rys.3.8.1. *Ilustracja podziału laserów na klasy według norm bezpieczeństwa.*

other spectral ranges laser radiation may not be greater than five times the class 1 AEL value, and the output irradiation intensity or irradiance specified in the standard may not be exceeded.

Viewing a class 3A laser beam through optical instruments (e.g. binoculars) may be dangerous. For lasers emitting radiation in the visible range, naked eye protection is achieved by instinctive defensive reactions, including the blink reflex. Class 3B laser radiation power may not exceed 0.5 W, while radiation from pulse lasers must be less than 10^5 J/m^2. Looking directly into the beam in the vicinity of these devices is always dangerous. It is not dangerous to view unfocused pulse radiation following scattered reflection,

Fig. 3.8.1. *Illustration of the division of lasers into classes according to safety standards.*

Laser.indb 247 2015-03-04 13:31:04

padku laserów klasy 3B moc ich promieniowania nie może przekraczać 0,5 W, a promieniowanie z laserów impulsowych musi być mniejsze niż 10^5 J/m^2. Bezpośrednie patrzenie w wiązkę w pobliżu tych urządzeń jest zawsze niebezpieczne. Patrzenie w niezogniskowane promieniowanie impulsowe po odbiciu rozproszonym nie jest niebezpieczne, a pod pewnymi warunkami można patrzeć bezpiecznie w wiązki lasera o pracy ciągłej przez reflektor rozpraszający. Lasery klasy 4 są urządzeniami dużej mocy, o mocach wyjściowych przewyższających GED dozwolone dla laserów klasy 3A.

Klasyfikacja produktów laserowych jest uzależniona od osiąganej emisji lasera. Produkt może być przypisany do klasy 1, jeśli jego moc jest zbyt mała, aby mogła być niebezpieczna lub, jeśli projekt konstrukcyjny produktu uniemożliwia dostęp do promieniowania laserowego w rozsądnych, przewidywalnych warunkach użytkowania. Nawet laser klasy 4 może być umieszczony w środku produktu zaliczanego do klasy 1, jeśli jego konstrukcja spełnia wymagania bezpieczeństwa wymienione w normie. Większość systemów czyszczenia laserowego w konserwacji jest sklasyfikowana w klasie 4, co oznacza wymagania najwyższej ostrożności. Rodzaj promieniowania laserowego używanego w czyszczeniu dzieł sztuki jest niebezpieczny, a warunki pracy zazwyczaj wymagają doprowadzenia wiązki przez rę-

and under certain conditions it is safe to view continuous wave laser beams through a scattering reflector. Class 4 lasers are high-power devices, with a power output exceeding the AEL allowed for class 3A lasers.

The classification of laser products depends on the achieved laser emission. A product can be assigned to class 1 if its power is too small to be dangerous or if the structural design of the product prevents access to laser radiation in reasonable, foreseeable conditions of use. Even a class 4 laser may be positioned inside a product falling into class 1 if its design fulfils all safety requirements specified in the standard. Most of the laser cleaning systems in conservation are classified in class 4, which means that highest caution level is required. The type of laser radiation used in the cleaning of works of art is dangerous, and working conditions typically require the beam to be delivered through a handle with a flexible fibre or an articulated arm. Laser cleaning system can be classified as class 1, if the path of the laser beam is not accessible, i.e. if it is enclosed together with a work of art in a secure housing.

Laser.indb 248 2015-03-04 13:31:04

kojeść z giętkim światłowodem lub ramieniem przegubowym. System czyszczenia laserowego może być zakwalifikowany do klasy 1, jeśli droga wiązki laserowej nie jest dostępna, tzn. jeśli jest ona wraz z dziełem sztuki zamknięta w bezpiecznej obudowie.

3.9 ŚRODKI BEZPIECZEŃSTWA STOSOWANE DO LASERÓW

3.9.1 WYMAGANIA PRAKTYCZNE

Zamknięcie wiązki i obiektu w nieprzezroczystej obudowie jest najbezpieczniejszym sposobem pracy z laserem. Ten poziom bezpieczeństwa jest obowiązujący dla systemów obróbki laserowej pracujących w otoczeniu przemysłowym. W systemach tych stosowane są drzwi z blokadą, sygnalizacja ostrzegawcza dźwiękowa i świetlna, blokowane kluczem zasilacze, awaryjne wyłączniki obwodów. Zabezpiecza to w pełni obsługę i osoby postronne przed niebezpieczeństwami elektrycznymi i optycznymi. Również mikroskopy i wizjery są filtrowane lub blokowane, aby zabezpieczyć się przed wyjściem promieniowania, a miejsca padania wiązki laserowej są otaczane ekranami. W miejscach dostępu do punktów obsługi lub ustalania warunków pracy, obowiązkowo znajdują się znaki ostrzegawcze oraz działające blokady zabezpieczające przed uruchomieniem lasera przy otwartych drzwiach

3.9 SAFETY MEASURES APPLIED TO LASERS

3.9.1 PRACTICAL REQUIREMENTS

Closing the beam and the object in an opaque housing is the safest way to operate the laser. This level of security is mandatory for laser processing systems operating in an industrial environment. These systems use locking door, sound and light warning signal systems, key-locked power supplies, circuit emergency breakers. This fully protects operators and bystanders against electrical and optical hazards. Also, microscopes and viewfinders are filtered or blocked to protect against outgoing radiation, and spots of incident laser beam are surrounded by screens. In areas of access to service points or setting of working conditions warning signs and operational blocks preventing the laser from starting operation with the door open or other inputs are mandatory. Both in the laboratory and where objects are handled, it

Laser.indb 249 2015-03-04 13:31:04

lub innych wejściach. W laboratorium, jak również w miejscu pracy na obiektach, nie jest możliwe niekiedy całkowite „zamknięcie" lasera dużej mocy w obudowie. W takiej sytuacji powinny zostać podjęte następujące środki bezpieczeństwa:

Przykazania
bezpiecznego użytkowania systemów laserowych

1. Zawsze noś okulary ochronne! Dobierz odpowiedni stopień tłumienia dla danej długości fali tak, aby filtr spełniał wymogi bezpieczeństwa.
2. Zapewnij kontrolowany dostęp do strefy użytkowania systemu laserowego.
3. Używaj minimalnego natężenia wiązki laserowej wymaganej w procesie – badaniach.
4. Ogranicz dostęp do lasera osobom niepowołanym – postronnym.
5. Nigdy nie patrz bezpośrednio w wiązkę promieniowania laserowego.
6. W pomieszczeniu, gdzie używany jest laser, zlikwiduj wszelkiego rodzaju niepotrzebne odbicia i obiekty załamujące promieniowanie laserowe.
7. Wyłącz laser, gdy go nie używasz.
8. Przeciwdziałaj kontaktowi z bezpośrednią bądź odbitą wiązką laserową.
9. Rozszerz maksymalnie wiązkę laserową w celu

is sometimes not possible to fully „close" a high power laser in a housing. The following precautions should then be observed:

Commandments
for safe use of laser systems

1. Always wear safety glasses! Adjust the degree of attenuation to a given wavelength so that the filter meets the safety requirements.
2. Provide controlled access to the area where laser system is used.
3. Use the minimum intensity of the laser beam required in the process - research.
4. Limit access to the laser in case of unauthorised persons.
5. Never look directly into the laser beam.
6. In the room where the laser is used, get rid of all kinds of unnecessary reflections and objects refracting laser radiation.
7. Turn off the laser when not in use.
8. Avoid contact with direct or reflected laser beam.
9. If possible, expand the laser beam to its maximum in order to reduce its intensity.

Laser.indb 250 2015-03-04 13:31:04

zmniejszenia jej natężenia, o ile to możliwe.
10. Dokonuj absorpcji odbić wtórnych za pomocą absorberów (filtrów absorpcyjnych).
11. Pracuj przy możliwie najmocniejszym oświetleniu w celu utrzymania zwężonych źrenic, aby zminimalizować ryzyko wypadku.
12. Rozmieść elementy z płaską lub wklęsłą powierzchnią odbijającą tak, aby promieniowanie odbite nie trafiało z powrotem do lasera, bądź trafiało do pułapki pochłaniającej energię promieniowania.
13. Sprawdź dwukrotnie, zanim stwierdzisz, że nie jest generowane promieniowanie laserowe. Dokonaj tego za pomocą detektorów energii bądź wizualizatora promieniowania podczerwonego (IR).
14. Użytkuj laser zgodnie ze wskazaniami zawartymi w instrukcji obsługi każdego lasera.
15. W przypadku kiedy pracujesz nad układem zasilającym, odłącz przewód zasilania lasera.
16. Zachowaj szczególna ostrożność podczas pracy z promieniowaniem o długości fali 1,064 μm (statystycznie najczęstsze przypadki obrażeń). Promieniowanie z tego zakresu nie jest widoczne dla oka, jednakże może spowodować uszkodzenie siatkówki.
17. Przed wejściem do laboratorium umieszczaj właściwe znaki ostrzegawcze zalecane przez

10. Perform a secondary reflection absorption through absorbers (absorption filters).
11. Work with the strongest light possible in order to keep pupils constricted, in order to minimize the risk of accidents.
12. Arrange the elements with flat or concave reflecting surface so that reflected radiation does not go back into the laser, or so that it goes to a trap absorbing the radiation energy.
13. Double-check if laser radiation is not generated. Do this by using energy detectors or infrared (IR) radiation visualizer.
14. Operate the laser following the instructions included in the manual of each laser.
15. When working on the power supply, disconnect the power cord of the laser.
16. Exercise caution when working with radiation with a wavelength of 1.064 μm (statistically the most common cause of injury). Radiation in this range is not visible to the eye, however, it may cause damage to the retina.
17. Before entering the laboratory, place appropriate warning signs recommended by the Polish Standard PN-EN 60825-1.
18. Secure access to the laser and place flashing red lights on the door when it is

Laser.indb 251 2015-03-04 13:31:04

Polską Normę PN-EN 60825-1.

18. Zabezpiecz dostęp do lasera i umieść migające czerwone światła na drzwiach w trakcie jego pracy np. „Praca bardzo dużych systemów laserowych", „Nie wchodzić bez okularów".
19. Przy wejściu do pomieszczeń z laserami zainstaluj blokady bezpieczeństwa w celu uniemożliwienia wejścia osób nieupoważnionych podczas ładowania zasilaczy.
20. Zapewnij ochronę przed przypadkowym kontaktem z naładowanymi kondensatorami w zasilaczach wysokonapięciowych. Elementy te powinny być zainstalowane w pomieszczeniach z drzwiami z blokadą.
21. Napraw elektrycznych powinny podejmować się tylko osoby upoważnione do pracy z urządzeniami wysokiego napięcia, znające potencjalne zagrożenia z tym związane.

working, e.g. "Very large laser systems working," "Do not enter without glasses".

19. At the entrance to rooms with lasers install safety locks to prevent unauthorised persons from entering when power supplies are being charged.
20. Provide protection against accidental contact with charged capacitors in high voltage power supplies. These elements should be installed in rooms with locked door.
21. Electrical repairs should only be performed by persons authorised to work with high-voltage devices who are aware of potential associated hazards.

Laser.indb 252 2015-03-04 13:31:04

Kluczem do udanego programu bezpieczeństwa jest trening i zaznajomienie zatrudnionego personelu z niebezpieczeństwami związanymi z laserami oraz późniejsze środki kontrolne. Wyznaczenie Osoby ds. Bezpieczeństwa Laserowego jest obowiązkiem dla firm i laboratoriów zaangażowanych w produkcję lub wykorzystywanie laserowych systemów klasy III i IV.

Przedstawiona w tym podrozdziale informacja dotyczy również zasad bezpieczeństwa podczas prac konserwatorskich i wszędzie tam, gdzie wykorzystywane są lasery. Nie oznacza to, że należy unikać laserów. Należy jednak zachować ostrożność w stosunku do potencjalnych zagrożeń, które mogą wystąpić podczas używania tych urządzeń oraz przestrzegać procedur postępowania z laserami.

3.9.2 ETYKIETY OSTRZEGAJĄCE

Informacja o klasie urządzenia laserowego i związanych z tym zagrożeniach powinna być umieszczona w instrukcji użytkowania oraz na urządzeniu w postaci etykiet ostrzegających. Klasy 1 i 1M są wyłączone z konieczności dołączania etykiet ostrzegających, ale odpowiednie objaśnienia muszą być umieszczone w informacji dla użytkownika. Napisy na etykietach ostrzegających są podane poniżej. Powinny być pisane czarnymi

The key to a successful safety program is to train and acquaint the employees with laser-related hazards and then implement control measures. Appointing the Laser Safety Officer is mandatory for companies and laboratories involved in production or use of class 3 and 4 laser systems.

Information presented in this section also regards safety measures during conservation works and wherever lasers are used. This does not mean that lasers should be avoided. However, caution should be exercised in relation to potential risks that may occur when using these devices, and laser operation procedures should be observed.

3.9.2 WARNING LABELS

Information about the laser device class and associated risks should be placed in the user manual and on the device in the form of warning labels. In case of 1 and 1M classes it is not mandatory to attach warning labels, but relevant precisions need to be included in the information for the user. References on warning labels are given below. They should be written in black letters on a yellow background with a black frame, with the exception of class 1, which does

Laser.indb 253 2015-03-04 13:31:04

literami na żółtym tle, mieć czarne obramowanie, z wyjątkiem Klasy 1, która nie musi mieć określonej kombinacji kolorów. Etykiety ostrzegające należy umieszczać w miejscach widocznych.

not have a specific colour combination. Warning labels should be placed in visible places.

Klasa 1:

Class 1:

Klasa 1M:

Class 1M:

Oprócz etykiety dla Klasy 1M w formie podanej powyżej, można dodać w nawiasach, po słowie „instrument", typ instrumentu optycznego, który może zwiększyć zagrożenie. W szczególności może to być „(LORNETKI LUB TELESKOPY)" dla urządzeń laserowych ze skolimowaną wiązką o dużej średnicy, sklasyfikowanych jako 1M jako nie spełniających warunku 1, lub „(LUPY)" dla urządzeń laserowych sklasyfikowanych jako 1M ze względu na nie spełnienie warunku 2 (bardzo rozbieżne wiązki).

In addition to the label for 1M class in the form given above, the type of optical instrument, which may increase the risk may be added in brackets after the word „instrument". In particular, it may be „(BINOCULARS OR TELESCOPES)" for laser devices with large diameter collimated beam, classified as 1M not fulfilling the condition 1, or „(EYE-LENSES)" for laser products classified as 1M due to non-fulfilment of the condition 2 (highly divergent beams).

Laser.indb 254 2015-03-04 13:31:04

Klasa 2:

Class 2:

Klasa 2M:

Class 2M:

Zastosowanie ma ta sama notka jak w Klasie 1 M, dotycząca dodatkowej informacji o rodzaju instrumentu optycznego.

The same note as in 1M class applies, relating to additional information on the type of optical instrument.

Klasa 3R, 400 nm do 1400 nm:

Class 3R, 400 nm to 1400 nm:

Klasa 3R, < 400 nm oraz > 1400 nm:

Class 3R, < 400 nm and > 1400 nm:

Laser.indb 255 2015-03-04 13:31:04

Klasa 3B:

Klasa 4:

Dodatkowo do etykiet ostrzegających o klasie urządzenia, dla wszystkich klas z wyjątkiem Klasy 1, etykieta objaśniająca powinna zawierać informację o mocy wyjściowej lub energii wyjściowej urządzenia laserowego, informację, czy promieniowanie ma charakter ciągły (cw) czy impulsowy, oraz informację o emitowanej długości fali lub długościach fal. Musi również znajdować się tam oświadczenie o rodzaju normy, zgodnie z którą sklasyfikowano urządzenie oraz datą publikacji normy (odnosi się to również do Klasy 1). Dla Klas 1 i 1M, informacja nie musi być koniecznie podawana na etykiecie ostrzegającej na urządzeniu, ale może być włączona w informację dla użytkownika.

Class 3B:

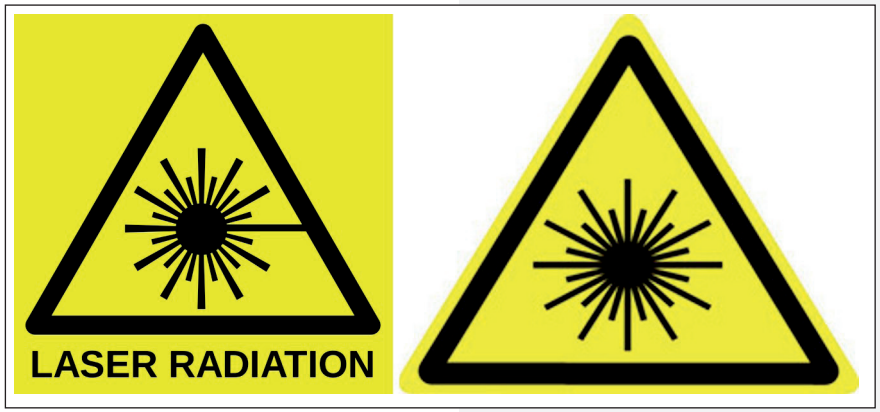
Class 4:

In addition to the warning labels specifying the device class, all classes except class 1 should have an explanatory label containing information about the power output, or the energy output of the laser device, whether radiation is continuous (cw) or pulsed, and the information about the emitted wavelength or wavelengths. It must also include an information regarding the standard type, under which the device was classified and the date of publication of the standard (this also applies to class 1). In case of 1 and 1M classes, the information does not necessarily need to be specified on the warning label on the device, but it may be included in the user information.

Laser.indb 256 2015-03-04 13:31:04

Wymaganą etykietą (z wyjątkiem Klasy 1) jest dobrze znany symbol ostrzeżenia przed laserami „wybuch gwiazdy”:

The required label (with the exception of class 1) is a well-known symbol of laser warnings, i.e. „star burst”:



Rys. 3.9.1. *Ogólne symbole ostrzeżenia przed promieniowaniem laserowym.*

Fig. 3.9.1. *General warning laser symbols.*

Dla Klas 3R, 3B i 4 wymagana jest także etykieta na aperturze wyjściowej z napisem:

3R, 3B and 4 classes also require a label on the output aperture reading:

LASER APERTURE

lub

or

AVOID EXPOSURE – LASER RADIATION IS EMITTED FROM THIS APERTURE

Panele dostępowe lub inne panele obudowy ochronnej, których usunięcie lub przemieszczenie umożliwi dostęp do promieniowania laserowego przekraczającego MDE Klasy 1, również muszą

Access panels or other protective enclosure panels which, when removed or moved open the access to laser radiation exceeding the 1 class MPE, also need to be labelled. They should be

Laser.indb 257 2015-03-04 13:31:04

być oznakowane. Odpowiedni napis to:

reading as follows:

CAUTION – LASER X RADIATION WHEN OPEN

z dalszym ostrzeżeniem zgodnym ze stopniem zagrożenia związanym z klasą bezpieczeństwa, np. „DO NOT STARE INTO THE BEAM" jeśli dotyczy promieniowania Klasy 2. Jeśli panel zabezpieczony jest kluczem bezpieczeństwa z mechanizmem wyłączeniowym, opis powinien być następujący:

with a further warning corresponding to the degree of hazard depending on the safety class, e.g. „DO NOT STARE INTO THE BEAM" if it relates to class 2 radiation. If the panel is secured with a security key with a breaker mechanism, the description should read as follows:

CAUTION – LASER X RADIATION WHEN OPEN AND INTERLOCKS DEFEATED

Na wszystkich powyższych etykietach, w miejscach użycia frazy "laser radiation", jeśli promieniowanie urządzenia mieści się poza zakresem 400 nm i 700 nm, napis powinien być uzupełniony o "invisible laser radiation". Dla urządzeń LED, fraza "laser radiation" zamieniona jest na "LED radiation". Dla ilustracji, kompletna etykieta dla Klasy 3A, specyfikowana zgodnie z IEC 60825-1 (1994) jest następująca:

On all of these labels, where the phrase „laser radiation" is used, if the radiation of the device is outside the range of 400 nm and 700 nm, it should be supplemented with words „invisible laser radiation." For LED devices, the phrase „laser radiation" is replaced with „LED radiation." To illustrate this, the complete label for class 3A specified in accordance with IEC 60825-1 (1994) reads as follows:

LASER RADIATION
DO NOT STARE INTO BEAM OR VIEW
DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS
CLASS 3A LASER PRODUCT

Laser.indb 258 2015-03-04 13:31:04

Poniżej przedstawiamy dalsze etykiety stosowane w laboratoriach i na urządzeniach laserowych.

Further labels used in laboratories and laser devices are presented below.

Rys. 3.9.2. *Etykiety stosowane w laboratoriach i na urządzeniach laserowych.*

Fig. 3.9.2. *Labels utilized in the laboratories and at laser devices.*

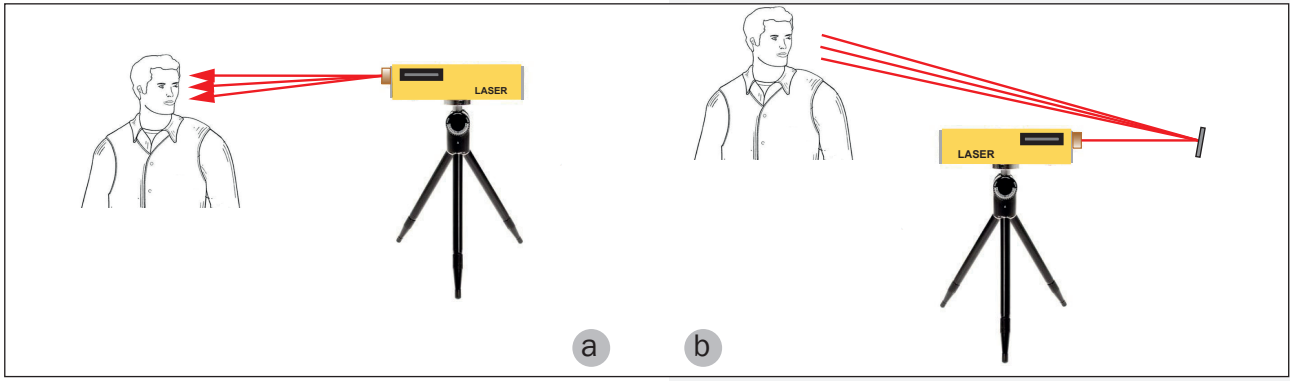
Laser.indb 259 2015-03-04 13:31:04

3.9.3 ILUSTRACJA SYTUACJI NIEBEZPIECZNYCH

Na rys.3.9.3 i 3.9.4 zilustrowano przypadki, jakich należy unikać podczas pracy z laserami w procesie laserowej obróbki materiałów w tym również oczyszczania dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze.

3.9.3 ILLUSTRATION OF DANGEROUS SITUATIONS

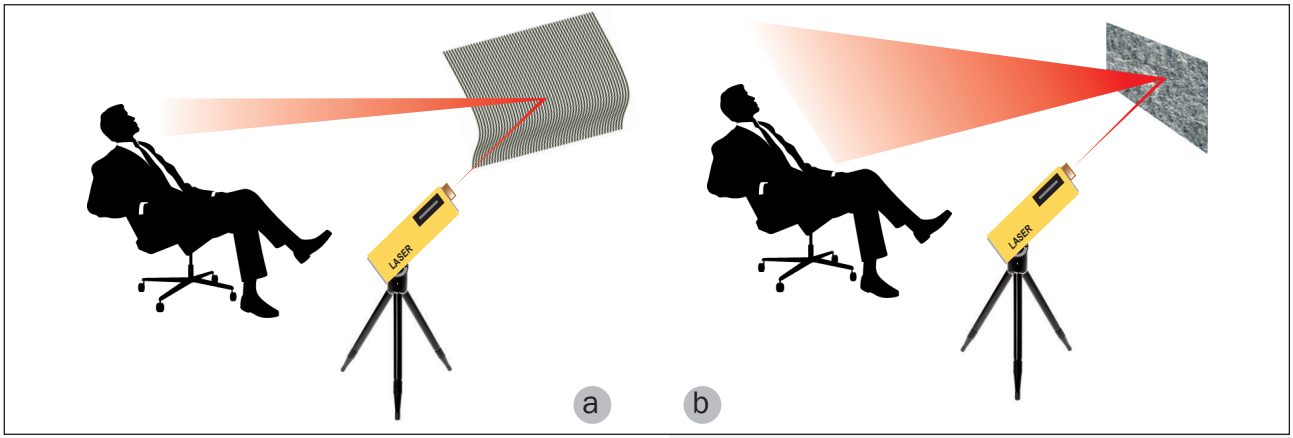
Fig.3.9.3 and 3.9.4 illustrates cases that should be avoided when working with lasers in the process of laser material processing, including cleaning of works of art and historical objects in architecture.



Rys.3.9.3. *Ilustracja sytuacji niebezpiecznych podczas pracy z laserem w działaniu bezpośrednim na oko.*
a) Bezpośrednie patrzenie w wiązkę lasera – najbardziej niebezpieczne
b) Bezpośrednie patrzenie w odbitą wiązkę lasera od płaskiej powierzchni – bardzo niebezpieczne

Fig. 3.9.3. *Illustration of dangerous situations when working with the laser directly affecting the eye.*
a) Directly viewing the laser beam – the most dangerous
b) Directly viewing the laser beam reflected from a flat surface - very dangerous

Laser.indb 260 2015-03-04 13:31:05



Rys.3.9.4. *Ilustracja sytuacji niebezpiecznych podczas pracy z laserem, po odbiciu lub rozproszeniu od innych obiektów.*
a) Bezpośrednie patrzenie w odbitą wiązkę lasera od zakrzywionej powierzchni - niebezpieczne. Bezpieczeństwo zależy od gęstości mocy.
b) Bezpośrednie patrzenie w wiązkę lasera odbitą od powierzchni dyfuzyjnej - mniej niebezpieczne. Bezpieczeństwo zależy od gęstości mocy.

Fig. 3.9.4. *Illustration of dangerous situations when working with the laser after reflection or scattering from other objects.*
a) Directly viewing the laser beam reflected from a curved surface - dangerous. Safety depends on power density.
b) Directly viewing the laser beam reflected from a diffusion surface - less dangerous. Safety depends on the power density.

Reasumując, prawdopodobieństwo wypadku będzie minimalne wtedy, kiedy zostaną spełnione wymogi bezpieczeństwa odnoszące się zarazem do informacji producenta sprzętu, miejsca pracy i wiedzy samego konserwatora. Należy jeszcze raz podkreślić, że z punktu widzenia prawnego norma jest tylko dokumentem zalecanym.

3.9.4 PRZKŁADY ZABEZPIECZEŃ PRZED PROMIENIOWANIEM W PRAKTYCE

Czyszczenie laserowe przebiega przeważnie w studio konserwatorskim, muzeach lub na wol-

To sum up, the probability of an accident will be minimal when the safety requirements relating to the manufacturer of equipment, workplace and knowledge of the conservators themselves are all met. Again, it should be emphasised that from the legal standpoint, the standard is only a recommended document.

3.9.4 EXAMPLES OF PRACTICAL RADIATION PROTECTION MEASURES

Laser cleaning is performed mostly in the conservation studio, in museums or outdoors.

Laser.indb 261 2015-03-04 13:31:05

nym powietrzu. Poniższe zdjęcia ilustrują czyszczenie laserowe obiektów w różnych sytuacjach i miejscach. Odpady powstające w czasie procesu czyszczenia usuwane są przy wykorzystaniu wbudowanego wyciągu z końcówkami umieszczanymi blisko obszaru roboczego. Obszar roboczy jest dobrze oświetlony. Konserwator jest wyposażony w okulary ochronne i maskę przeciwpyłową.

Nie zawsze udaje się zainstalować oznaczenia ostrzegające przed promieniowaniem laserowym np. w muzeach, wtedy zamyka się pomieszczenie dla osób postronnych. Na pokazach oczyszczania laserowego stosuje się ekrany ochronne o odpowiedniej gęstości optycznej, tłumiące promieniowanie laserowe, a przepuszczające promieniowanie widzialne.

The following photos illustrate laser cleaning of objects in various situations and places. The debris produced during the cleaning process are removed using an integrated ventilating fan with its ends placed close to the work area. The working area is well-illuminated. The conservator is equipped with goggles and a dust mask.

It is not always possible to install warning signs against laser radiation e.g. in museums, and then the room is closed to the public. During laser cleaning demonstrations, protective screens are used with appropriate optical density that attenuate laser radiation and transmit visible radiation.

Laser.indb 262 2015-03-04 13:31:05

Rys.3.9.5. *a) – Usuwanie nawarstwień w pomieszczeniu zamkniętym i niedostępnym dla osób postronnych, Dubrownik, Dom Rektorów. Operator ma założone okulary ochronne i maskę przeciwpyłową. Fot. A. Koss. b) – Podobnie jak na rys.3.9.5a operator w okularach i w masce przeciwpyłowej, Kaplica Zygmuntowska na Wawelu. Miejsce oczyszczane jest dobrze oświetlone. Fot. J. Marczak.*

Fig.3.9.5. *a) – Removal of encrustations in an enclosed room inaccessible to the public, Dubrovnik, House of Rectors. The operator is wearing goggles and a dust mask. Photo by A. Koss. b) - As in fig. 3.9.5a), operator is wearing glasses and a dust mask, Sigismund's Chapel, Wawel. The place to be cleaned is well-illuminated. Photo by J. Marczak.*

Laser.indb 263 2015-03-04 13:31:05

Rys.3.9.6. *Pył i odpady powstające podczas czyszczenia laserowego usuwane są przez wbudowany system ekstrakcyjny. Kaplica Zygmuntowska na Wawelu. Fot. J. Marczak.*

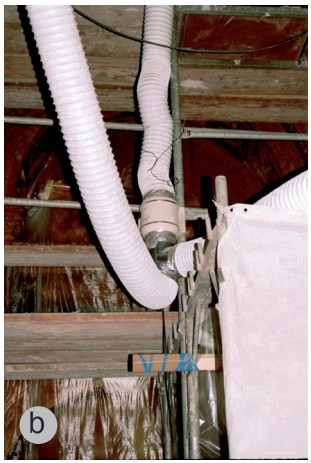


Fig. 3.9.6. *Dust and debris produced during laser cleaning are removed by an integrated extraction system. Sigismund's Chapel, Wawel. Photo by J. Marczak.*

Rys.3.9.7. *Osoby przypatrujące się procesowi laserowego oczyszczania obiektu są bezpieczne obserwując proces zza parawanu o odpowiedniej wartości gęstości optycznej dla promieniowania o długości fali 1064 nm. Operator nosi okulary. Fot. J. Marczak.*

Fig. 3.9.7. *Persons watching the process of laser cleaning of an object are safe observing the process from behind a screen with appropriate optical density value for radiation with a wavelength of 1064 nm. The operator is wearing glasses. Photo by J. Marczak.*

Laser.indb 264 2015-03-04 13:31:05

BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 3 / REFERENCES TO CHAPTER 3

1. Rockwell R J Jr, Laser Incidents, Proceedings International Laser Safety Conference, LIA, Orlando 1997
2. PN-EN 60825-1: 2000 Bezpieczeństwo urządzeń laserowych – Część 1: Klasyfikacja sprzętu, wymagania i przewodnik użytkowania;
3. NORMY EUROPEJSKIE
4. EN 60825-2 (2004) Safety of laser products - Part 2: Safety of optical fibre communication systems
5. EN 207 (2009) Personal eye-protection equipment - Filters and eye-protectors against laser radiation (laser eye-protectors)
6. EN 12254 (2010) Screens for laser working places - Safety requirements and testing;
7. EN ISO 11252 (2013) Laser device - Minimum requirements for documentation;
8. EN ISO 11553-1 (2008) Laser processing machines - Part 1: General safety requirements;
9. EN ISO 11553-2 (2008) Laser processing machines - Part 2: Safety requirements for hand-held laser processing devices;
10. EN ISO 11553-3 (2013) Laser processing machines - Part 3: Noise reduction and noise measurement methods for laser processing machines and hand-held processing devices and associated auxiliary equipment;
11. EN 1093-(1-9) +A1 (2008) Evaluation of the emission of airborne hazardous substances;
12. EN 60204-11 (2000) Part 11: Requirements for HV equipment for voltages above 1 000 V a.c. or 1 500 V d.c. and not exceeding 36 kV;

Laser.indb 265 2015-03-04 13:31:06

PUBLIKACJE AUTORÓW MONOGRAFII / AUTHORS PUBLICATIONS

[1] Samantha Skelton; Tatiana Ausema; Bartosz Dajnowski; Jan Marczak; Antoni Sarzyński; Richard Wolbers, Unmaking your mark: an investigation into the removal of pencil from unprimed cotton canvas, PSG Postprints from 42nd Annual Meeting of the AIC, 2014.

[2] P. Targowski, J. Marczak, E. A. Kwiatkowska, M. Sylwestrzak, A. Sarzyński, Optical coherence tomography for high resolution real-time varnish ablation monitoring, Lasers in the Conservation of Artworks IX. Proceedings of the International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks (Lacona IX), 7-10 September 2011, London, UK, ed. by D. Saunders, M. Strlič, C. Korenberg, N. Luxford and K. Birkhölzer (Archetype Publications Ltd, London, 2013), pp. 26-31;

[3] Halina Garbacz, Elżbieta Fortuna-Zaleśna, Jan Marczak, Marek Strzelec, Andrzej Koss and Anna Zatorska, Evaluation of laser cleaning of old copper roofing and gilding using tunable length laser pulses, Proceedings of the International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks (Lacona IX), 7-10 September 2011, London, UK, ed. by D. Saunders, M. Strlič, C. Korenberg, N. Luxford and K. Birkhölzer (Archetype Publications Ltd, London, 2013).

[4] Marek Strzelec, Jan Marczak, Terje Grøntoft, Anna Kozelska, Karolina Brama, Wojciech Skrzeczanowski, Anna Zatorska, Janusz Mróz, Susana López-Aparicio, Dariusz Zasada and Grażyna Z. Żukowska, Study of the influence of atmospheric pollution on the open-air collection of the Railway Museum in Warsaw, Proceedings of the International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks (Lacona IX), 7-10 September 2011, London, UK, ed. by D. Saunders, M. Strlič, C. Korenberg, N. Luxford and K. Birkhölzer (Archetype Publications Ltd, London, 2013).

[5] W. Skrzeczanowski et.al.: "Use of the LIBS method in oil paintings examination, based on examples of analyses conducted at the Wilanow Palace Museum" Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. 2013, 8790, 879005.

[6] J. Marczak, W. Skrzeczanowski et.al.: "Depth-Resolved Multilayer Pigment Identification In Paintings: Combined Use of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Optical Coherence Tomography (OCT)" Applied Spectroscopy, Vol.67, No 8, 2013, pp 960-972

[7] Anna Zatorska, Barbara Kosmowska-Ceranowicz, Andrzej Koss, Marek Strzelec et al., "Optical characterization of amber specimens from the unique collection of the Museum of the Earth of

Laser.indb 266 2015-03-04 13:31:06

the Polish Academy of Sciences in Warsaw", Proceedings of SPIE Vol. 8790, 879012 (2013).
[8] EVALUATION OF LASER CLEANING PROGRESS AND QUALITY , By: Koss, Andrzej; Marczak, Jan, Edited by: Jasienko, J, Conference: 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2012, ANALYSIS OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS, VOLS 1-3 Pages: 823-831 Published: 2012
[9] C. Spaarschuh, B. Vedvik, M. Strzelec, Ł. Ciupiński, H. Garbacz, E. Fortuna-Zaleśna, A. Koss, A. Krzemińska-Maciejko, J. Marczak, J. Mróz, W. Skrzeczanowski, M. Stachurska, A. Zatorska, New research on laser cleaning artworks made of metal, Meddelelser om Konservering, 1, (2011), 3-12.
[10] E. Fortuna-Zaleśna, J. Marczak, M. Strzelec, A. Krzemińska-Maciejko, M. Stachurska, J. Barańska „Badania metalowych elementów z okładu ikony św. Paraskiewy w stanie przed konserwacją oraz po testach czyszczenia laserowego", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 190-197.
[11] M Strzelec, J. Marczak, W. Skrzeczanowski, A. Rycyk, A. Sarzyński, H. Garbacz, Ł. Ciupiński, E. Fortuna-Zaleśna, T. Onyszczuk, J. Mróz, A. Zatorska, A. Koss, „Kolorymetryczna analiza wyników czyszczenia laserowego metalowych dzieł sztuki", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 206-217.
[12] A. Koss, J. Mróz, E. Fortuna-Zaleśna, „Konserwacja zabytkowych obiektów metalowych w dotychczasowej praktyce", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 152-162.
[13] J. Marczak, K. Jach, R. Świerczyński, „Laserowe czyszczenie metalowych oplotów nici stosowanych w tkaninach zabytkowych", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 198-205.
[14] Ł. Ciupiński, T. Onyszczuk, H. Garbacz, J. Marczak, A. Koss, K. J. Kurzydłowski, „Metody inżynierii materiałowej w diagnostyce czyszczenia laserowego metalowych dzieł sztuki", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 142-151
[15] J. Marczak, „Metody kontroli grubości warstw wierzchnich usuwanych podczas ablacji laserowej", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 176-189.
[16] W. Skrzeczanowski, „Spektroskopia emisyjna ze wzbudzeniem laserowym w badaniach warstw wierzchnich metalowych dzieł sztuki", *Inżynieria Materiałowa,* nr 3 (2011), 228-232..
[17] H. Garbacz, E. Fortuna-Zaleśna, J. Marczak, A. Koss, A. Zatorska, G. Z. Żukowska, T. Onyszczuk, K. J. Kurzydłowski, Effect of laser treatment on the surface of copper alloys, Appl. Surface Sci., 257 (2011) 7369-7374.
[18] A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, Badania naukowe zastosowań laserów w konserwacji dzieł sztu-

Laser.indb 267 2015-03-04 13:31:06

ki – postery, monografia, Oficyna Wydawnicza W-wa, 2010, 189str., ISBN: 978-83-922954-5-7.
[19] H. Garbacz, A. Koss, J. Marczak, J. Mróz, T. Onyszczuk, A. Rycyk, A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski, M. Strzelec, A. Zatorska, Optimized laser cleaning of metal artworks–evaluation of determinants, Physics Procedia, vol.5, p.1, 2010, 457-466.
[20] H. Garbacz, E. Fortuna, Ł. Ciupiński, K. J. Kurzydłowski, A. Koss, J. Mróz, A. Zatorska, K. Chmielewski, J. Marczak, M. Strzelec, A. Rycyk, W. Skrzeczanowski, Bronze putti from Wilanów Palace garden façade – conservation studies and tests of laser cleaning, in Lasers in the conservation of artworks, LACONA 8 Proc., Taylor & Francis Ltd, (2010) 111-118.
[21] Ł. Ciupiński, E. Fortuna-Zaleśna, H. Garbacz, A. Koss, K. J. Kurzydłowski, J. Marczak, J. Mróz, T. Onyszczuk, A. Rycyk, A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski, M. Strzelec, A. Zatorska, G. Z. Żukowska, Comparative Laser Spectroscopy Diagnostics for Ancient Metallic Artefacts Exposed to Environmental Pollution, Sensors, 2010, 10, 4926-4949.
[22] H. Garbacz, E. Fortuna, J. Marczak, M. Strzelec, A. Rycyk, A. Koss, J. Mróz, A. Zatorska, K.J. Kurzydłowski, Laser cleaning of copper roofing sheets subjected to long-lasting environmental corrosion, Applied Physics A: Material Science & Processing, vol. 100, 3, 693-701. (2010).
[23] J. Marczak, R. Ostrowski, A. Rycyk, M. Strzelec, Set of advanced laser cleaning heads and systems, Proc. SPIE 7391, 73910T (2009).
[24] Jan Marczak, Andrzej Koss, Maria Lubryczynska, Joanna Czernichowska, Izabela Uchman-Laskowska, Krzysztof Chmielewski, Magdalena Mazur, Agnieszka Markowska, Marek Strzelec, Wooden art works –Laser cleaning case studies, In: "Wood science for conservation of cultural heritage – Florence 2007", Proc. Int. Conf. COST Action IE0601, Florence, 8-10 November 2007, Firenze University Press 2009, 181-187.
[25] Conservation of wooden art works and laser cleaning , By: Koss, A.; Lubryczynska, M.; Czernichowska, J.; et al., Edited by: Pezzati, L; Salimbeni, R, Conference: O3A - Optics for Arts, Architecture, and Archaeology Conference II Location: Munich, GERMANY Date: JUN 17-18, 2009 , Sponsor(s): SPIE; European Optical Soc; Wissensch Gesell Lasertech e V, O3A: OPTICS FOR ARTS, ARCHITECTURE, AND ARCHAEOLOGY II Book Series: Proceedings of SPIE Volume: 7391 Article Number: 73910S Published: 2009
[26] Absolute LIBS stratigraphy with Optical Coherence Tomography, By: Kwiatkowska, Ewa A.; Marczak,

Laser.indb 268 2015-03-04 13:31:06

Jan; Ostrowski, Roman; et al, Edited by: Pezzati, L; Salimbeni, R, Conference: O3A - Optics for Arts, Architecture, and Archaeology Conference II Location: Munich, GERMANY Date: JUN 17-18, 2009, Sponsor(s): SPIE; European Optical Soc; Wissensch Gesell Lasertech e V, O3A: OPTICS FOR ARTS, ARCHITECTURE, AND ARCHAEOLOGY II Book Series: Proceedings of SPIE Volume: 7391 Article Number: 73910F Published: 2009

[27] LIBS Identification of Pigments from Aula Leopoldina Vault, By: Ostrowski, R.; Skrzeczanowski, W.; Marczak, J.; et al. Edited by: Pezzati, L; Salimbeni, R, Conference: O3A - Optics for Arts, Architecture, and Archaeology Conference II Location: Munich, GERMANY Date: JUN 17-18, 2009, Sponsor(s): SPIE; European Opt Soc; Wissensch Gesell Lasertech e V, O3A: OPTICS FOR ARTS, ARCHITECTURE, AND ARCHAEOLOGY II Book Series: Proceedings of SPIE Volume: 7391 Article Number: 73910Q Published: 2009

[28] Picosecond laser ablation system with process control by Optical Coherence Tomography, By: Targowski, Piotr; Ostrowski, Roman; Marczak, Jan; et al., Edited by: Pezzati, L; Salimbeni, R, Conference: O3A - Optics for Arts, Architecture, and Archaeology Conference II Location: Munich, GERMANY Date: JUN 17-18, 2009, Sponsor(s): SPIE; European Opt Soc; Wissensch Gesell Lasertech e V, O3A: OPTICS FOR ARTS, ARCHITECTURE, AND ARCHAEOLOGY II Book Series: Proceedings of SPIE Volume: 7391 Article Number: 73910G Published: 2009

[29] J. Marczak, P. Targowski, B. Rouba, M. Góra, L. Tymińska-Widmer, A. Kowalczyk, Optical coherence tomography in art diagnostics and restoration, Appl. Phys. A: Materials Science & Processing, Vol. A 92, 1-9 (2008).

[30] J. Marczak, A. Koss, P. Targowski, M. Góra, M. Strzelec, A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski, R. Ostrowski, A. Rycyk, Characterization of Laser Cleaning of Artworks – Review, Sensors, 2008, Vol. 8(10), 6507.

[31] M. Góra, P. Targowski, A. Kowalczyk, J. Marczak, A. Rycyk, (Invited Paper), Fast spectral coherence tomography for monitoring of varnish ablation process; in Lasers in the conservation of artworks, Pablo Moreno, Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd, 2008, pp. 23-27.

[32] A. Koss, D. Dreścik, J. Marczak, R. Ostrowski, A. Rycyk, M. Strzelec, Laser cleaning of set of 18th century ivory statues of Twelve Apostles, in Lasers in the conservation of artworks, Pablo Moreno,

Laser.indb 269 2015-03-04 13:31:06

Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd, 2008, 215-218.

[33] J. Marczak, M. Strzelec, R. Ostrowski, A. Rycyk, A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski et al (29 coauthors), Advanced laser renovation of old paintings, paper, parchment and metal objects, in Lasers in the conservation of artworks, Pablo Moreno, Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd, 2008, 263-270.

[34] K. Chmielewski, A. Koss, M. Mazur, J. Marczak, M. Strzelec, Conservation of medieval polychromed wooden sculpture of Madonna and Child, in Lasers in the conservation of artworks, Pablo Moreno, Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd, 2008, 259-262.

[35] A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, Arch-collegiate church in Tum – laser renovation of priceless architectural decorations, in Lasers in the conservation of artworks, Pablo Moreno, Marta Castillejo, Javier Ruiz, Roxana Radvan, Mohamed Oujja Eds, Taylor & Francis Ltd, 2008, 203-207.

[36] J. Marczak, A. Koss, (Invited Paper), Implementation of Laser Technology in Conservation – Last Decade, 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Vol II pp. 939-948, 2008

[37] R. Ostrowski, J. Marczak, Bezpieczne czyszczenie laserowe obiektów wykonanych z kości, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 234, 2008, 51

[38] R. Ostrowski, J. Marczak, A. Rycyk, Wpływ czasu trwania impulsu lasera Er:YAG na ablację werniksów, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 234, 2008, 69

[39] J. Marczak et al., "Tests of laser cleaning and diagnostics of modern paintings", Proceedings of 7th European Conference "SAUVEUR" Safeguarded Cultural Heritage, pp. 734-737, Milos Drdacky, Michel Chapuis (Eds), ITAM 2007

[40] R. Ostrowski, J. Marczak, M. Strzelec, S. Barcikowski, Nano and microparticles emission during laser cleaning of stone, Proc. SPIE, Laser Technology VIII: Applications of Lasers, Vol. 6598, 2007, 65980V,

[41] J. Marczak, A. Koss, R. Ostrowski, A. Rycyk, M. Strzelec, Batory's Chapel at Wawel Castle, Cracow: laser cleaning and hue measurements of epitaph and stalls, Proc. SPIE, 03A: Optics for Arts, Architecture and Archeology,Vol. 6618, 2007, 66181C-1,

Laser.indb 270 2015-03-04 13:31:06

[42] R. Ostrowski, J. Marczak, M. Strzelec, A. Koss, Laser damage thresholds of bone objects, Proc. SPIE, 03A: Optics for Arts, Architecture and Archeology, Vol. 6618, 2007, 66181D-1,
[43] A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, "Experimental investigations and removal of encrustations from interior stone decorations of King Sigismund's Chapel at Wawel Castle in Cracow, Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 116, Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA VI Proc., pp.125-132, 2007
[44] A. Sarzyński, K. Jach, J. Marczak, „Comparison of wet and dry laser cleaning of artworks", Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 116, pp. 161-168, 2007
[45] A. Sarzyński, W. Skrzeczanowski, J. Marczak, Clorimetry, LIBS and Raman experiments on renaissance green sandstone decorations during laser cleaning of King Sigismund's Chapel in Wawel Castle, Cracow, Poland", ibidem, pp.355-460
[46] R. Ostrowski et al., "Health risks caused by particulate emission during laser cleaning", ibidem, pp. 623-630
[47] J. Marczak, R. Ostrowski, M. Strzelec, S. Barcikowski, A. Ostendorf et.al., "Nanoparticles during laser cleaning of lime stone of the Krakow Wawel Castle", in Laser Cleaning II, World Scientific, D. Kane (Ed), Chapter 9, pp.197-208, 2007
[48] J. Marczak, A. Koss, Zastosowanie technik laserowych w konserwacji dzieł sztuki i budowli zabytkowych w Nowoczesne technologie dla budownictwa pod redakcją Z. Mierczyk, 32 strony, Wydawca WAT, (2007)
[49] J, Marczak, Selected Issues of Physics In Contemporary Developments of Instrumental Research and Methods in Conservation Approach, in The Art of Conservation and Restoration 2007r. (Editors: I. Szmelter and M. Jadzińska), 14 stron, Przedsiębiorstwo Wydawnicze Rzeczypospolita SA.
[50] J. Marczak, A. Sarzyński, *Kopuła Kaplicy Zygmuntowskiej na Wawelu – pomiary i analiza kształtu*, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych - Praca zbiorowa, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, ISBN 83-7125-151-3, str.393-404 (2006)
[51] A. Koss, J. Marczak, Zalety i wady oczyszczania promieniowaniem laserowym dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze – praktyka konserwatorska, str.392-404, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektów zabytkowych – Praca zbiorowa pod redakcją J. Jasieńki, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006r.

Laser.indb 271 2015-03-04 13:31:06

[52] Koss, J. Marczak, Kaplica Batorego na Wawelu – laserowe oczyszczanie epitafium i stalli – pomiary barwy, str. 405-412, Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektów zabytkowych – Praca zbiorowa pod redakcją J. Jasieńki, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006r.
[53] Burakowski T., Marczak J., Napadłek W.: Istota ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów. Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06, s. 125 - 135, 2006.
[54] J. Marczak, M. Strzelec, A. Koss, "Laser cleaning of the interior stone decoration of King Sigismund's Chapel at Wawel Castle in Cracow", Proc. SPIE vol. 5958, p. 595808, 2005,
[55] J. Marczak, K. Jach, A. Sarzyński, "Improvement in encrustation removal from artworks using multipulse Q-switched laser", Proc. SPIE vol.5958, p. 59582G, 2005
[56] M. Strlic, V.S. Selih, J. Kolar, D. Kocar, B. Pihlar, R. Ostrowski, J. Marczak, M. Strzelec, M. Marincek, T. Vuorinen, L.S. Johansson, "Optimisation and on-line acoustic monitoring of laser cleaning of soiled paper", Appl. Phys. A: Materials Science &Processing, vol. A81, pp. 943-951, (2005),
[57] J. Marczak, A. Koss, M. Strzelec, R. Ostrowski, A. Sarzynski, M. Strlic, J. Kolar, C. Fenic, T. Necsoiu, A. Caramizoiu, S. Barcikowski, „Laser cleaning of art works - experiments and numerical model", Romanian Journal of Optoelectronics, vol.13, Issue 2, April-June 2005, pp.1-17,
[58] W. Skrzeczanowski, A. Sarzyński, A. Rycyk, A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, R. Ostrowski, "Preliminary LIBS and colorimetry experiments during laser renovation of king Sigismund's Chapel at Wawel Castle", Romanian Journal of Optoelectronics, ibidem,
[59] M. Strzelec, Z. Patron, "POLLASNET – Polish Laser Network", Romanian Journal of Optoelectronics, ibidem,
[60] S. Barcikowski, J. Marczak, A. Ostendorf, R. Ostrowski, M. Strzelec, J. Walter, "Pollutants emitted during laser cleaning of art works", Romanian Journal of Optoelectronics, vol. 13, Issue 4, October-December 2005, pp. 11-19,
[61] M. Strlic ,J. Kolar, J. Marczak V.-S. Šelih, M. Marincek, M. Strzelec, "Surface modification during Nd:YAG (1064nm) pulsed laser cleaning of organic fibrous materials", paper KJ-22/03 in "Lasers in the Conservation of Artworks", LACONA V Proceedings, Osnabrueck, Germany, Sept. 15-18, 2003, Series : Springer Proceedings in Physics , Vol. 100, Dickmann, Klaus, Fotakis, Costas; Asmus, (Eds.), 2005,
[62] M. Strzelec, J. Marczak, A. Koss, R. Szambelan, "Overpaint removal on a gilded wooden bas-relief

Laser.indb 272 2015-03-04 13:31:06

using a Nd:YAG laser at 1.064 μm", in "Lasers in the Conservation of Artworks", LACONA V Proc., Osnabrueck, Germany, Sept. 15-18, 2003, Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 100, pp. 133-138, 2005;

[63] M. Strzelec J. Marczak, R. Ostrowski, A. Koss, R. Szambelan, "Results of Nd:YAG laser renovation of decorative ivory jug", in "Lasers in the Conservation of Artworks", LACONA V Proc., Osnabrueck, Germany, Sept. 15-18, 2003, Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 100, pp. 163-168, 2005;

[64] J. Marczak, K. Jach, A. Sarzynski, "Numerical modeling of laser cleaning and conservation of artworks", in "Lasers in the Conservation of Artworks", LACONA V Proc., Osnabrueck, Germany, Sept. 15-18, 2003, Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 100, pp. 319-326, 2005;

[65] J. Marczak, K. Jach, R. Ostrowski, A. Sarzynski, "Experimental and theoretical indications on laser cleaning", in "Lasers in the Conservation of Artworks", LACONA V Proc., Osnabrueck, Germany, Sept. 15-18, 2003, Series: Springer Proceedings in Physics, vol. 100, pp. 103-111, 2005;

[66] A. Koss, J. Marczak, „Application of lasers in conservation of monuments and works of art", Scientific Reports IAICR, ISBN 83-922954-0-4, Warsaw 2005, 50 pages.

[67] I. Płuska, J. Marczak, A. Sarzyński, *Kopuła Kaplicy Zygmuntowskiej – Paraboloida, Hiperboloida, czy Elipsoida?*, Biuletyn historii sztuki, Rok LXVII, Nr 1-2, str.163-171, 2005.

[68] A. Koss, J. Łukaszewicz, J. Marczak, I. Płuska, I. Szmelter, W. Zalewski, P. Białko, Współczesne Technologie Konserwatorskie z zachowaniem tradycji w ocenie dzieł sztuki, Wiadomości Konserwatorskie, ISBN83-7125-137-8, str 78-89, 2005.

[69] Monografia: J. Marczak, „Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej", ISBN: 83-88442-94-5, stron 226, Wydawnictwo: BEL Studio Sp. z o. o., Warszawa 2004.

[70] M. Strzelec, J. Marczak, "Rénovation de laser des monuments et des objets d'art", Polish Science and Technology Forum, Paris, 15-16 Sept. 2003, Digest of Papers,

[71] R. Ostrowski, J. Marczak, K. Jach, A. Sarzyński, „Selection of radiation parameters of lasers used for artwork conservation", Proc. SPIE Vol. 5146, p. 99-107, Optical Metrology for Arts and Multimedia; Renzo Salimbeni; Ed. 2003,

[72] P. Pręgowski, J. Marczak, A. Koss, "Thermal effects on artwork surfaces cleaned with laser abla-

Laser.indb 273 2015-03-04 13:31:06

tion method", Proc. SPIE Vol. 5146, p. 226-235, Optical Metrology for Arts and Multimedia; Renzo Salimbeni; Ed. 2003,

[73] J. Marczak, K. Jach, A. Sarzyński, "Numerical modeling of laser-matter interaction", Proc. SPIE Vol. 5146, p. 215-225, Optical Metrology for Arts and Multimedia; Renzo Salimbeni; Ed., 2003,

[74] M. Strzelec, J. Marczak, A. Koss, R. Szambelan, "Preliminary optoacoustic measurements of air pollution generated during laser cleaning of artworks", Proc. SPIE Vol. 5146, p. 210-214, Optical Metrology for Arts and Multimedia; Renzo Salimbeni; Ed., 2003,

[75] A. Koss, J. Marczak, "Technika laserowa w konserwacji dzieł sztuki", Renowacje i Zabytki, nr.2, 2002, str.76,

[76] A. Koss, J. Marczak, "Laser ablation of overlayers in conservation –a numerical model", *Proceedings of 5th EC Conference, Cultural Heritage Research: a pan-European Challenge, Cracow. May 16 - 18, 2002 (*Co-published by Directorate General Research and The Official Publication Office of the European Communities in Luxembourg, Poland, 2003), ISBN 92-894-4412-6, p.249-252.

[77] J. Marczak, M. Strzelec, A. Koss, R. Szambelan, R. Okniński, M. Strlic, J. Kolar, V. Zafiropulos, "E!2542 RENOVA LASER - Laser renovation of monuments and works of art", ibidem,

[78] J. Marczak, „Badania porównawcze usuwania wtórnych nawarstwień z piaskowca za pomocą lasera", Przegląd Mechaniczny Nr 4, str. 9-14 (2002),

[79] A. Koss, J. Marczak, R. Szambelan, „Możliwości wykorzystania laserów w konserwacji dzieł sztuki i zabytków", Cenne – Bezcenne – Utracone, Nr 2 (32), str.21-22, kwiecień (2002),.

[80] J. Marczak, „Wykorzystanie promieniowania laserowego w renowacji dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze", Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, „Lasery i nowe techniki w konserwacji obiektów zabytkowych `2002", Vol. 524/1483/2002, str. 23-46 (2002),

[81] J. Marczak, A Review of Materials Interaction During Laser Cleaning in Art of Works, Forum – Laser in Restaurierung und Denkmlpflege, 18-19. 10. 2002, Dresden, Germany (2002),

[82] J. MARCZAK, „Zagadnienie wykorzystania ablacji laserowej w usuwaniu wtórnych nawarstwień z powierzchni dzieł sztuki i obiektów zabytkowych w architekturze", Ochrona Zabytków, nr.3, 2001,

[83] M. Strzelec, J. Marczak, "Interferometric measurements of acoustic waves generated during laser cleaning of works of art", Proc. SPIE Vol. 4402, p. 235-241, Laser Techniques and Systems in Art

Laser.indb 274 2015-03-04 13:31:06

Conservation; Renzo Salimbeni; Ed., 2001,
[84] J. Marczak, “Usuwanie nawarstwień z zabytków architektonicznych promieniowaniem laserowym”, Przegląd Mechaniczny, nr10, str. 22-26 (2000),
[85] A. Koss, J. Marczak, Czyszczenie laserem wybranych powierzchni kamiennych Grobu Nieznanego Żołnierza w Warszawie, Ochrona Zabytków, Vol.1 (204), LII, str. 39 – 44 (1999),
[86] J. Marczak, Odnawianie dzieł sztuki za pomocą promieniowania laserowego, Przegląd Mechaniczny, Nr 15-16, str. 37 –40 (1997).

Laser.indb 275 2015-03-04 13:31:06

Laser.indb 276 2015-03-04 13:31:06