

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	8
Wstęp.....	10
1. Oddziaływanie promieniowania laserowego z materiałami w mikroskali..	15
1.1. Absorbpcja i rozpraszanie promieniowania laserowego w materiale.....	16
1.1.1 Absorbpcja promieniowania laserowego przez dielektryki	16
1.1.2 Oddziaływanie promieniowania laserowego z metalami	18
1.2. Procesy termiczne	20
1.2.1 Nagrzewanie impulsowe.....	23
1.2.2 Nagrzewanie wiązką ruchomą.....	26
1.2.3 Transport masy w obszarze przetopionym	28
1.2.4 Geometria obszaru przetopionego	32
1.2.5 Struktura obszaru przetopionego	35
1.3. Ablacja	37
1.4. Laserowe systemy mikrotechnologiczne.....	42
Literatura	46
2. Laserowy zapis bezpośredni	48
2.1. Laserowo wywoływany transfer materiału	49
2.2. Laserowe odwzorowanie kształtów (<i>laser patterning</i>).....	50
2.2.1 Laserowe odwzorowanie kształtów w warstwach metalicznych.....	51
2.2.2 Laserowe odwzorowanie kształtów w transparentnych warstwach przewodzących	66
2.2.3 Laserowe odwzorowanie kształtów w warstwach obwodów drukowanych	77
Literatura	79
3. Laserowe mikrotechnologie w skali 3D.....	83
3.1. Skuteczność i jakość ablacyjnej mikroobróbki materiałów półprzewodnikowych.....	85
3.1.1 Skuteczność i jakość mikroobróbki krzemu	85
3.1.2 Skuteczność i jakość mikroobróbki GaAs	89
3.1.3 Mikroobróbka krzemu impulsami piko- i femtosekundowymi w zakresie UV	91
3.1.4 Skuteczność i jakość mikroobróbki ceramiki	95

3.2. Usuwanie produktów erozji – w trakcie i po zakończeniu procesu mikroobróbki	98
3.3. Mikrostruktury 3D z materiałów półprzewodnikowych i ceramicznych.....	102
Literatura	107
4. Laserowe Mikrotechnologie 2D.....	109
4.1. Dzielenie materiałów w mikroskali	109
4.1.1 Cięcie materiałów półprzewodnikowych	110
4.1.2 Dzielenie struktur poprzez naprężenia termiczne	111
4.1.3 Ablacyjne dzielenie struktur	114
4.1.4 Metody hybrydowe.....	117
4.1.5 Złożone przypadki cięcia laserowego.....	119
4.1.6 Wycinanie elementów z materiałów półprzewodnikowych ...	119
4.1.7 Cięcie materiałów ceramicznych	123
4.1.8 Cięcie metali w mikroskali	129
4.1.9 Zastosowania laserowego cięcia w mikroskali.....	130
4.2. Laserowe drążenie mikrootworów.....	136
4.2.1 Jakość drążonych otworów.....	139
Literatura	145
5. Modyfikacja właściwości i tworzenie materiałów w mikroskali	150
5.1. Modyfikacja warstwy wierzchniej materiału.....	150
5.1.1 Fotolitografia laserowa i modyfikacja właściwości materiałów półprzewodnikowych.....	150
5.1.2 Modyfikacja warstwy wierzchniej metali przez przetopienie	154
5.1.3 Amorfizacja i dewitryfikacja	157
5.1.4 Stopowanie warstwy wierzchniej metali	164
5.1.5 Wybrane zastosowania warstw stopowanych.....	170
5.2. Wytwarzanie zmodyfikowanych materiałów w skali 2D oraz 3D	171
5.2.1 Stopowanie 3D w mikroskali.....	172
5.2.2 Laserowa stereolitografia i laserowe selektywne spiekanie ...	178
5.2.3 Laserowe osadzanie warstw	179
Literatura	182
6. Laserowe technologie łączenia w elektronice i elektrotechnice	186
6.1. Charakterystyka procesów łączenia materiałów w elektronice i elektrotechnice.....	186

6.2. Lutowanie laserowe	188
6.3. Mikrospawanie laserowe	192
6.3.1 Charakterystyka laserowych połączeń spawanych	192
6.3.2 Wybrane problemy laserowego spawania połączeń elektrycznych.....	194
6.3.3 Kontrola i jakość procesu mikrospawania laserowego.....	198
Literatura	202
Summary	206

WSTĘP

Promieniowanie laserowe, jako skoncentrowany strumień energii przekazywanej w postaci spójnej w czasie i przestrzeni fali elektromagnetycznej, już od chwili wynalezienia lasera wzbudziło zainteresowanie specjalistów z wielu dziedzin, także z obszaru technologii urządzeń elektronicznych. Od uruchomienia w roku 1960 przez Teodora Maimanna pierwszego lasera rubinowego minęło prawie sześćdziesiąt lat. W tym okresie opracowano wiele nowych rodzajów laserów. Znaczna część z nich osiągnęła dojrzałość techniczną i została skomercjalizowana. Należy podkreślić dzisiejsze ogromne znaczenie laserów w wielu obszarach aktywności człowieka, zarówno na poziomie badań naukowych, jak i praktycznych zastosowań. Laser stał się nowym narzędziem badawczym dla fizyków, źródłem nowych odkryć w dziedzinie optyki, bez których nie powstałoby wiele odkryć naukowych wyróżnionych nagrodą Nobla. W medycynie wykorzystano nowo poznane zjawiska, które zachodzą podczas oddziaływania z tkankami koherentnego promieniowania laserowego o długości fali od 130 nm do 10600 nm. Właściwości promieniowania laserowego wykorzystano w systemach telekomunikacji, metrologii, zapisu i odczytu informacji, holografii, nawigacji. Na zastosowaniach laserów w tych dziedzinach koncentruje się tematyka wielu konferencji naukowych, opublikowano dziesiątki książek i kilkadziesiąt tysięcy artykułów o tej tematyce. Pierwsze zastosowania technologiczne wiązki laserowej dotyczyły najnowocześniejszych i dynamicznie rozwijających się dziedzin, które stanowiły siłę napędową rozwoju każdej nowej technologii, jak produkcja sprzętu elektronicznego, technologie lotnicze, militarne i kosmiczne, motoryzacja. Z tamtego pierwszego okresu rozwoju techniki laserowej i technologii wykorzystujących lasery pochodzą opracowania w j. angielskim – J.F. Ready, *Effect of high-power laser radiation*, 1971; rosyjskim – Anisimow S.I., Imas J.A., Romanow G.S., Chodykow J.W., *Diejstwie izluczenija bolszoj moszcznosti na mietalły*, 1970; a także wydane w kraju – Nowicki M., *Lasery w technologii elektronowej i obróbce materiałów*, 1978.

Rozwój zastosowań laserów w inżynierii materiałowej w Polsce zaowocował później m.in. wydaniem monografii: Z. Szymański – *Badania spektroskopowe i modelowanie numeryczne plazmy podtrzymywanej laserem* (1993); J. Kusiński – *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej* (2000), B. Antoszewski – *Własności laserowo i plazmowo modyfikowanych ślizgowych węzłów tarcia na przykładzie uszczelnień czołowych* (2000); B. Major – *Ablacja i osadzanie laserem impulsowym* (2002). W 2002 r. autor opublikował monografię: *Laserowa modyfikacja właściwości materiałów przewodzących*, podsumowując badania w tej dziedzinie.

W ostatnich latach ukazały się monografie habilitacyjne: M. Kulka – *Gradientowe warstwy borkowe wytwarzane za pomocą boronawęglania i laserowej modyfikacji powierzchni* (2010); J. Radziejewska – *Laserowa modyfikacja warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem* (2013); A. Grabowski – *Oddziaływanie wiązki laserowej z kompozytami silumin – cząstki SiC* (2014); J. Hoffman

– *Badania eksperymentalne ablacji grafitu wywołanej nanosekundowym impulsem lasera* (2016); D. Przystacki – *Laserowe wspomaganie skrawania materiałów trudno obrabialnych* (2017). Opublikowano także podręczniki o zastosowaniach laserów: R. Józwicki, *Technika laserowa i jej zastosowania* (2009) i A. Klimpel – *Technologie laserowe* (2012). Wymienione prace dotyczyły zasadniczo zastosowań laserów w inżynierii materiałowej w skali makro.

Niniejsza monografia natomiast poświęcona jest w całości materiałowym technologiom laserowym realizowanym w mikroskali na potrzeby elektroniki i pokrewnych obszarów nauki i techniki, takich jak elektrotechnika, mechatronika i technika mikrosystemów. W ten sposób zdefiniowano procesy, w których zmiana materiału wywołana oddziaływaniem wiązki laserowej zachodzi w obszarze o wymiarze mikrometrowym (ogólnie mniejszym od 1 mm), przynajmniej w jednym z kierunków. Tak określona skala związana jest z również m.in. z precyzją, jaką można osiągnąć ogniskując wiązkę laserową, przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z progu dyfrakcji. Lasery wypełniają w wymienionych nowoczesnych dziedzinach techniki złożone zadania technologiczne, w wielu przypadkach niemożliwe do zrealizowania przy zastosowaniu innych narzędzi. Z oczywistych powodów w monografii nie są rozważane zastosowania laserów w telekomunikacji, metrologii, medycynie, spektroskopii i technikach biomedycznych, chociaż efekty opisanych mikrotechnologii znajdują także zastosowanie, np. w badaniach biomedycznych i metrologii.

Atrakcyjność wiązki laserowej jako narzędzia technologicznego w procesach obróbki materiałów oraz inżynierii materiałowej wynika, najogólniej mówiąc, z ogromnej koncentracji mocy (energii) i możliwości oddziaływania na materiał w bardzo krótkim czasie. Obie te cechy wyróżniają technologie laserowe spośród innych metod inżynierii materiałowej. Dodatkowym atutem w zastosowaniu wiązki laserowej w procesach technologicznych jest zdalny, bezdotkowy charakter oddziaływania wynikający z istoty generacji laserowej. Energia promieniowania laserowego może oddziaływać na materiał w sposób ciągły bądź w formie impulsów o czasie trwania od 10^{-15} s do 10^{-2} s. Gęstość mocy na powierzchni poddanej ekspozycji, dzięki ogniskowaniu monochromatycznej, spójnej wiązki laserowej, osiąga wartość 10^{12} W/m², a nawet 10^{18} W/m². Można wyróżnić procesy wykorzystujące w sposób szczególny albo wielkie moce i energie wiązki laserowej, albo ekstremalnie krótkie czasy oddziaływania, albo synergiczne występowanie w procesie obu tych właściwości. **Wiele współczesnych procesów mikroobróbki laserowej polega na oryginalnym nowatorskim zastosowaniu pewnych zjawisk pochodnych wobec podstawowych zjawisk towarzyszących oddziaływaniu wiązki laserowej z materiałami.** Najnowsze osiągnięcia technologii laserowych, wykraczających zasadniczo poza zakres problemów opisywanych w niniejszej książce, to wytwarzanie materiałów i struktur, których co najmniej jeden wymiar jest poniżej umownej granicy nanotechnologii (100 nm). Takie technologie laserowe wymagają zastosowania impulsów laserowych o ekstremalnie krótkim czasie trwania (femtosekundowych) oraz często wykorzystania zjawisk zapewniających ogniskowanie poniżej progu dyfrakcji (absorpcja dwufotonowa, optyka bliskiego pola, samoogniskowanie

wiązki w pewnych ośrodkach). Tylko niektóre przykłady prezentowanych mikrotechnologii laserowych zrealizowane były przy wykorzystaniu ultrakrótkich impulsów femtosekundowych. Z powyższych faktów wynika ogromna liczba nowych prac naukowych o zastosowaniach laserów. Dynamiczny rozwój badań w dziedzinie laserowej obróbki materiałów ilustruje ciągły wzrost liczby artykułów naukowych o tej tematyce opublikowanych w renomowanych czasopismach o światowym zasięgu (na podstawie bazy Scopus) wynoszący średniorocznie: 511 w latach 2000-2003, 789 w latach 2004-2007, 875 w latach 2008-2011 oraz 1650 w latach 2012-2018.

Celem niniejszej książki było przedstawienie laserowych mikrotechnologii materiałowych z punktu widzenia szczególnej, decydującej roli, jaką odgrywa w nich zastosowanie wiązki laserowej. Termin „zastosowania” obejmuje zarówno przykłady mikrotechnologii laserowych, które osiągnęły dojrzałość aplikacyjną, jak i inne ważne przykłady wykorzystania wiązki laserowej, które mogą stać się podstawą praktycznych zastosowań w najbliższej przyszłości.

Podtytuł książki: *Wybrane zastosowania w elektronice i elektrotechnice* wyraża świadomą rezygnację autora z szerszego omawiania wszystkich znanych i opisanych w literaturze przypadków zastosowań mikrotechnologii laserowych, co wymagałoby bardzo obszernego opracowania. Do scharakteryzowania w poszczególnych rozdziałach różnych laserowych procesów mikrotechnologicznych i ich efektów zdeterminowanych zastosowaniem wiązki laserowej posłużyły przede wszystkim wyniki własnych badań autora, uzupełnione przez przykłady z literatury światowej. Zamieszczone w pracy zastosowania mikrotechnologii laserowych w elektronice i elektrotechnice to wyniki prac autora przeprowadzonych w Politechnice Łódzkiej, Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i Polskiej Akademii Nauk w Kielcach, Fraunhofer Institute für Laser Technik, Aachen (Niemcy).

Właściwości elementów, które wytworzono lub zmodyfikowano w wyniku zastosowania mikrotechnologii laserowych, ogólnie zależą od dwu grup czynników: 1^o – precyzji wykonania odnośnie kształtu i wymiarów; 2^o – zmian składu i struktury materiału w wyniku obróbki laserowej. Przedstawione w niniejszym opracowaniu przypadki zastosowania laserowych mikrotechnologii materiałowych uzupełniono o wyniki badań funkcjonalnych wytworzonych bądź modyfikowanych elementów, w celu ukazania korzystnego lub decydującego wpływu na ich właściwości wynikającego z przyjętej technologii.

W książce więcej uwagi poświęcono technologiom laserowego zapisu bezpośredniego (*laser direct writing*), technologiom laserowego kształtowania mikroelementów 3D i 2D oraz modyfikacji i syntezy materiałów, mniej – bardziej znanym i od dawna stosowanym technologiom laserowego dzielenia materiałów (cięcie, wytwarzanie otworów).

Lasery, a właściwie systemy wykorzystujące lasery w zastosowaniach mikrotechnologicznych, przedstawiono w rozdz. 2 jedynie w zarysie, akcentując charakterystyczne i ważne dla mikrotechnologii kształtowanie wiązki za pomocą optyki dyfrakcyjnej lub przestrzennych modulatorów światła.

Zawarty w monografii opis zjawisk towarzyszących oddziaływaniu wiązki laserowej z materiałami, stanowiących podstawę procesów technologicznych w mikroskali, został przedstawiony w rozdz. 1 w skondensowanej formie, ułatwiającej czytelnikowi własną ocenę możliwości mikrotechnologii laserowych. Zakres monografii nie pozwala na bardziej obszerną analizę tych problemów, rozważanych w wielu opracowaniach w literaturze światowej.

W rozdziałach 2 do 6 przedstawiono rodzaje laserowych mikrotechnologii laserowych nawiązując do zastosowań w elektronice i elektrotechnice. W rozdziale 2 i rozdziale 3 zaprezentowano mikrotechnologie wykorzystujące w głównej mierze ablacyjne oddziaływanie wiązki laserowej: mikrotechnologie laserowego zapisu bezpośredniego (rozdz. 2) oraz mikrotechnologie wytwarzania struktur 3D (rozdz. 3). Rozdział 4 poświęcono mikrotechnologiom w skali 2D, których istotą jest albo ablacyjne, albo termiczne oddziaływanie wiązki laserowej. Mikrotechnologie opisane w rozdz. 5 – Modyfikacja i synteza materiałów oraz w rozdz. 6 – Laserowe technologie łączenia wykorzystują w większym stopniu termiczne skutki oddziaływania wiązki laserowej w mikroskali.

Postęp w ciągu ostatnich 30 lat w technologicznych zastosowaniach laserów w elektronice i elektrotechnice stymulowany był trzema zasadniczymi przyczynami:

- coraz lepszym rozpoznaniem zjawisk towarzyszących oddziaływaniu promieniowania laserowego z materiałami, także w mikroskali; możliwe stało się bardziej zaawansowane modelowanie komputerowe procesów wspomagające ich realizację.
- konstruowaniem coraz doskonalszych systemów laserowych, wykorzystujących nowe źródła promieniowania laserowego generujących wiązkę o bardzo dobrej jakości i ekstremalnie krótkich czasach trwania impulsów (nano-, piko- i femtosekundy) oraz wyposażonych w układy kształtowania i transmisji wiązki oraz systemy sterowania; w wielu przypadkach realizacja operacji technologicznych, które znane były wcześniej jedynie jako możliwe do wykonania przy wykorzystaniu wiązki laserowej, stała się łatwa i zastosowano je na skalę przemysłową.
- nowymi potrzebami w zakresie technologii materiałowych w związku z nieustannym rozwojem elektroniki (mikroelektronika o coraz wyższej skali integracji, optoelektronika, fotonika, fotowoltaika). Rozwój tych nowych obszarów zastosowań poprzedzono przedstawieniem problemów, które zdeterminowały poszukiwanie ich rozwiązania poprzez wykorzystanie technologii laserowych.

Mikrotechnologiczne zastosowania laserów trudno opisać jako jednorodny zbiór procesów, wykorzystujących określone sposoby oddziaływania wiązki laserowej, opierających się na zespole charakterystycznych zjawisk fizycznych. Podobnie, jak trudno opisać wspinanie się na szczyty gór – można raczej wskazać, jak zdobyć konkretny wierzchołek, mając w pamięci doświadczenia poprzednich prób wspinaczki. Dynamiczny rozwój systemów laserowych oraz powstawanie nieznanych dotąd obszarów ich zastosowań może sprawić, że wiele opisanych w niniejszej monografii mikrotechnologii będzie nowatorskie jedynie przez kilkanaście czy kilkadziesiąt miesięcy. Prognozowanie postępu w tej dziedzinie

jest nieefektywne. Autor wyraża jednakże przekonanie, że upowszechnienie opracowania, w którym rozwój laserowych mikrotechnologii materiałowych i ich zastosowań w elektronice, elektrotechnice, technice mikrosystemów i dziedzinach pokrewnych przedstawiono wg stanu na koniec 2018 roku, jest celowe i pomoże usystematyzować czytelnikowi istniejącą wiedzę. Sprawiłoby satysfakcję autorowi, gdyby lektura tej monografii stała się dla czytelników inspiracją do poszukiwania własnych nowych rozwiązań.