

Krzysztof CZYŻ
Antoni RYCYK
Marek STRZELEC
Antoni SARZYŃSKI
Jan MARCZAK

BEZPOŚREDNIE LASEROWE WYTWARZANIE STRUKTUR PERIODYCZNYCH METODĄ LITOGRAFII INTERFERENCYJNEJ

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono metodę bezpośredniej, laserowej litografii interferencyjnej do modyfikacji przypowierzchniowej warstwy materiałów. Zmiana topografii oraz mikrostruktury powierzchni prowadzi do wielu korzystnych zmian właściwości materiału, poczynając od zmian typowo mechanicznych, takich jak zmiana współczynnika tarcia, po zmiany właściwości optycznych, magnetycznych i innych.*

W artykule opisano dwukanałowy impulsowy układ laserowy na kryształach Nd:YAG z Q-modulacją, generujący impulsy o czasie trwania 8-10 ns oraz energii 1,5 J w każdym kanale. Laser służył do naświetlania struktur interferencyjnych na powierzchni różnych materiałów. Ramiona dwukanałowego układu laserowego stanowiły jednocześnie interferometr Macha-Zehndera.

Zaprezentowano również wybrane struktury periodyczne jedno- oraz dwuwymiarowe, wytworzone w warunkach impulsowego naświetlania powierzchni metali, półprzewodników, polimerów oraz tzw. warstw diamentopodobnych. We wnioskach przedyskutowano potencjalne obszary zastosowania technologii bezpośredniej, laserowej litografii interferencyjnej.

Słowa kluczowe: *bezpośrednia litografia interferencyjna, bezpośrednie strukturywanie powierzchni, inżynieria powierzchni, materiały biozgodne, struktury periodyczne*

**mgr inż. Krzysztof CZYŻ, mgr inż. Antoni RYCYK, dr inż. Marek STRZELEC
dr inż. Antoni SARZYŃSKI, dr hab. inż. Jan MARCZAK, prof. WAT**
e-mail: [kczyz; arycyk1; mstrzelec; asarzyński; jmarczak]@wat.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 266, 2014

1. WSTĘP

Zbudowanie przez Maimana w 1960 roku pierwszego lasera otworzyło świat nauki i techniki na zupełnie nowe technologie. Dotyczy to także procesów obróbki trudnotopliwych materiałów i tworzenie mikrostruktur. Dzięki wysokiej spójności czasowej i przestrzennej promieniowania laserowego możliwe jest bardzo dokładne ogniskowanie i kierunkowanie wiązki lasera. Cecha lasera jaką jest monochromatyczność umożliwia selektywne wzbudzanie konkretnych materiałów. Do 1960 roku modyfikacje topografii i mikrostruktury nie pozwalały tworzyć mikrostruktur o tak wysokim kontraście i małych rozmiarach jak w przypadku tworzenia struktur za pomocą laserów dużej mocy.

W laserowym kształtowaniu powierzchni główną rolę odgrywają trzy metody modyfikacji warstwy wierzchniej materiału. Są to litografia klasyczna, elektronowa oraz bezpośrednia litografia interferencyjna.

W pierwszej wymienionej metodzie, aby utrwalić wzór periodyczny na powierzchni materiału wykorzystuje się maskę fazową lub amplitudową. W celu otrzymania założonej struktury na powierzchni wymagane jest kilka procesów technologicznych: nałożenie warstwy fotoczułej, naświetlanie, wywołanie i trawienie. Dużą zaletą metody jest to, że można tworzyć nie tylko wzory periodyczne.

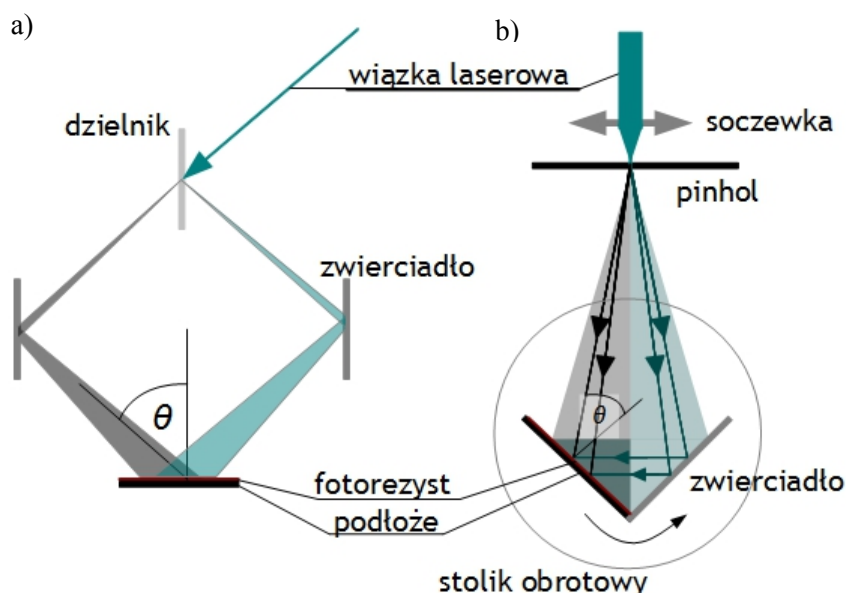
Litografia elektronowa umożliwia tworzenie wzoru bez maski. Wykorzystuje się skolimowaną wiązkę elektronów lub jonów. Jest to metoda oparta na skanowaniu wiązką elektronów po powierzchni co czyni ją dużo wolniejszą niż pozostałe sposoby tworzenia mikrostruktur. Mimo, że metoda ta jest dość powolna, umożliwia tworzenie obiektów o rozmiarach rzędu 10 nm.

Innym sposobem umożliwiającym tworzenie wzorów na powierzchni materiałów jest metoda bezpośredniej laserowej litografii interferencyjnej. W tej metodzie wzór otrzymuje się dzięki nałożeniu wiązek laserowych (dwóch lub więcej) na powierzchni materiału, które oddziałując ze sobą tworzą obraz interferencyjny. W wyniku bezpośredniego wykorzystania dużej energii laserowej, pole interferencyjne może spowodować w maksimach interferencyjnych ablację materiału. W wyniku usuwania materiału, na powierzchni powstaje negatyw obrazu interferencyjnego. Jest to metoda szybka i tania. Wszelkie elementy mechaniczne takie jak maski fazowe i amplitudowe zostają zastąpione przez zjawisko fizyczne (interferencję). Ilość procesów technologicznych prowadzących do otrzymania wzoru periodycznego w tej metodzie jest ograniczona do minimum. Zmiana właściwości naświetlanego obrazu jest prosta do zrealizowania. Metoda umożliwia tworzenie wzorów periodycznych jedno- dwu- a dla odpowiednich materiałów także trójwymiarowych. Bardziej skomplikowane struktury wymagają połączenia litografii klasycznej z interferencyjną.

2. TYPY INTERFEROMETRÓW

Istnieje wiele różnych konfiguracji układów do naświetlania wzorów interferencyjnych wykorzystujących interferujące wiązki lasera dużej mocy. W ogólności układy te dzielą się na interferometry dzielące amplitudę i dzielące front falowy.

Interferometry dzielące amplitudę działają na zasadzie równego podziału wiązki laserowej na dwie (lub więcej). Wiązki propagują się niezależnie do momentu osiągnięcia powierzchni materiału fotoczułego. W płaszczyźnie naświetlanego materiału wiązki ponownie schodzą się tworząc warunki do stworzenia interferencji. Taki układ cechuje się prostotą oraz (dzięki łatwym zmianom kąta padania wiązek na naświetlany materiał) możliwością łatwych zmian topografii i mikrostruktury powierzchni oraz okresu wzoru periodycznego. Dzięki rozseparowaniu wiązek laserowych na kilka torów optycznych każdą z nich można oddzielnie wzmacniać co daje większe możliwości tworzenia mikrostruktur. Długość dróg optycznych w poszczególnych ramionach interferometru należy oddzielnie justować pamiętając o warunku, że różnica dróg optycznych między wiązkami propagującymi się w ramionach musi być mniejsza niż droga koherencji lasera [1]. Ze względu na zalety układu użyto właśnie tego rodzaju interferometr.



Rys. 1. Podstawowe rodzaje interferometrów:
a) dzielący wiązkę; b) dzielący front falowy (Lloyda)

Układy dzielące front falowy działają na zasadzie rozdzielania frontu falowego na dwa lub więcej niezależnie propagujące się fronty falowe. Fale tworzące fronty schodzą się w jednym miejscu. Każda para wiązek interferuje ze sobą. W ten sposób tworzy się wypadkowe pole interferencyjne. Jednym z interferometrów tego typu jest układ Lloyd'a. W układzie tym warstwa światłoczuła i zwierciadło umieszczone są na stoliku obrotowym pod kątem 90° . Układ przedstawiono na rysunku 1b. Wiązka wyjściowa jest ogniskowana, a następnie na otworze filtrowana przestrzennie trafiając następnie na zwierciadło i płytkę fotoczułą. Część wiązki odbita od zwierciadła pada na płytkę fotoczułą, zachodzi interferencja a wzór periodyczny zostaje utrwalony na powierzchni materiału. Dzięki obrotowi płaszczyzny zawierającej zwierciadło i fotorezyst możliwe jest naświetlanie różnych odległości między prążkami. Zasadniczą

zaletą tego układu jest jego stabilność i prostota zmiany okresu struktury. Wadą jest to, że właściwie nie można na nim tworzyć bardziej skomplikowanych wzorów niż podstawowe siatki dyfrakcyjne. Omówione rodzaje interferometrów zostały przedstawione na rysunku 1 [2, 3].

3. WARSTWY I PODŁOŻA UŻYTE DO NAŚWIETLENIA

W trakcie badań użyto wielu różnych rodzajów materiałów. Jednym z nich był diament węglopodobny (DLC). Jest to materiał cechujący się szczególnymi właściwościami. Najważniejsze cechy powłok diamentopodobnych to wysoka twardość, wysoka odporność na czynniki chemiczne, niski współczynnik tarcia i duża gładkość. Materiały te cechują się ponadto dużą gęstością i wysoką odpornością na zmęczenie, pękanie, ścieranie i korozję. Są wysoce rezystywne i trwałe. Warstwy DLC mogą być z powodzeniem stosowane jako materiały tribologiczne gdyż dobrze wiążą się z podłożem. Materiały te wykorzystywane są głównie w przemyśle zajmującym się obróbką materiałów, przemyśle motoryzacyjnym, medycznym. Materiały te znajdują także zastosowania bioinżynieryjne [4]. Użyte w opisywanych poniżej eksperymentach warstwy DLC mają grubość od 100 nm do 500 nm.

Głównym zastosowaniem przygotowanych struktur interferencyjnych będzie bioinżynieria tkankowa oraz tribologia. Jednymi z najważniejszych podłoży stosowanych jako podkłady pod warstwę światłoczułą są polimery. Mają one bardzo wiele ważnych właściwości takich jak duża biogodność, odporność na czynniki chemiczne. Wykazują dużą odporność na działanie środowiska biologicznie czynnego, nie są biodegradowalne co czyni je atrakcyjnymi podłożami pod zastosowania bioinżynieryjne. Są najbardziej podatne na strukturowanie pod wpływem pola interferencyjnego dla promieniowania UV. Dzięki zaawansowanym technologiom można otrzymać polimer, który będzie odpowiadał wymaganym warunkom fizyko-biochemicznym. W przeprowadzanych doświadczeniach użyto polimerów polistyrenowych. Polimery polistyrenowe są termoplastyczne, bezbarwne, twarde i kruche.

Inne zastosowania struktur to zmiana właściwości fizycznych i mechanicznych badanych materiałów. W tym przypadku badane były metale takie jak złoto, chrom, miedź, aluminium, krzem.

4. LASEROWA LITOGRAFIA INTERFERENCYJNA

Znając podstawy fizyczne zjawiska interferencji można przewidzieć drogą symulacji numerycznej jak będzie wyglądał i jakie będzie miał właściwości naświetlony wzór periodyczny utrwalony za pomocą bezpośredniej litografii interferencyjnej. Największy kontrast utrwalonego wzoru można otrzymać stosując wiązki o polaryzacji liniowej w tej samej płaszczyźnie o polaryzacji typu *s*. Matematycznie pojedynczą wiązkę laserową można zapisać za pomocą równania:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[-i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)] \quad (1)$$

gdzie:

- E_0 – amplituda natężenia pola elektrycznego wiązki,
- \vec{k} – wektor falowy,
- ω – częstość kołowa fali,
- λ – długość fali.

Wyrażenie na obraz interferencyjny wielu wiązek laserowych uzyskuje się stosując zasadę superpozycji każdego indywidualnego pola E_j pochodzącego od każdej wiązki:

$$\vec{E} = \sum_{j=1}^n \vec{E}_j = \sum_{j=1}^n \vec{E}_{0j} \exp[-i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)] \quad (2)$$

Dla przypadku najprostszego i najpowszechniejszego, czyli interferencji dwóch wiązek laserowych zakłada się, że: wiązki mają natężenia odpowiednio I_1 i I_2 , propagują się w jednej płaszczyźnie i padają pod takim samym kątem θ do normalnej z pominięciem fazy, która nie ma wpływu na period struktury. Otrzymuje się uwzględniając powyższe założenia za pomocą powyższego wzoru zależność na natężenie wypadkowego pola interferencyjnego [1]:

$$I(x) = I_0 \left(1 + \frac{\sqrt{I_1 I_2} (\widehat{e}_1 \widehat{e}_2)}{I_0} \cos(2k_0 x \sin \theta) \right) \quad (3)$$

gdzie:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{2} (I_1^2 + I_2^2)}$$

$\widehat{e}_1, \widehat{e}_2$ – wektory polaryzacji.

lub jeśli nie bierzemy pod uwagę polaryzacji poszczególnych wiązek:

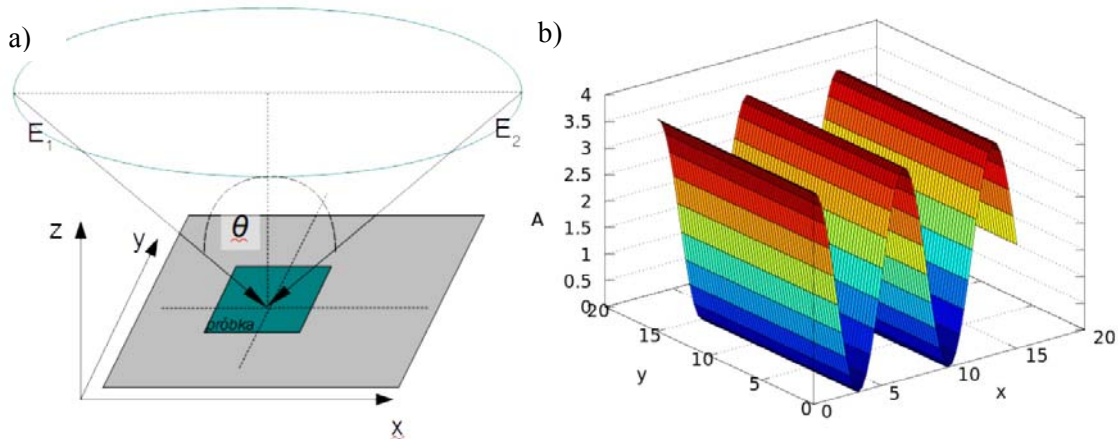
$$I(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2kx \sin \theta) \quad (4)$$

Ze wzoru (4) wynika, że jeśli wiązki różnią się znacznie intensywnością natężenie wypadkowe może być niewystarczające by naświetlić wzór interferencyjny o pożądanym kontraście. Każdy materiał charakteryzuje się tzw. progiem ablacji, tj. wartością progową fluencji [J/cm^2] [5]. Dlatego ważne jest by wiązki miały możliwie równe natężenia. Wtedy stosunek kontrastu otrzymanego wzoru do najmniejszej energii wywołującej interferencję impulsu laserowego będzie największy. W układzie eksperymentalnym zaprezentowanym poniżej wartości natężenia wiązek można regulować osobno co pozwala na bardzo dokładne zestrojenie ich natężenia w ramionach interferometru.

Odległość między prążkami wzoru interferencyjnego można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

$$\Lambda = \lambda/2\sin\theta, \quad (5)$$

Z zależności (5) znając kąt padania wiązek do normalnej można przewidzieć jaki okres będzie miała struktura periodyczna. W praktyce, aby uzyskać jak największe pole powierzchni i jak najmniejszą odległość pomiędzy prążkami interferencyjnymi, stosowane są kąty do 60° . Odległość prążków maleje również wraz z długością fali promieniowania. Niestety wzrost absorpcji w powietrzu w zakresie ultrafioletu < 300 nm ogranicza stosowanie krótszych długości fal [6]. Schematycznie ułożenie wiązek i rozkład wypadkowego pola w trzech wymiarach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Interferencja dwuwiaźkowa:

a) geometria interferencji dwuwiaźkowej; b) wynik interferencji (po prawej), parametry wiązek: $I_1 = I_2 = 1$, $\theta_1 = \theta_2 = 0,08$

Dla układu, w którym znajduje się więcej niż dwie wiązki każda para interferuje ze sobą tworząc w ten sposób wypadkowe pole interferencyjne [1]. W układzie wykorzystującym trzy i cztery wiązki otrzymuje się układy 3D. Układ czterowiązkowy można zastąpić przez obrót o 90° wzoru liniowego z rysunku 2. Wypadkowy rozkład natężenia po operacji obrócenia o 90° :

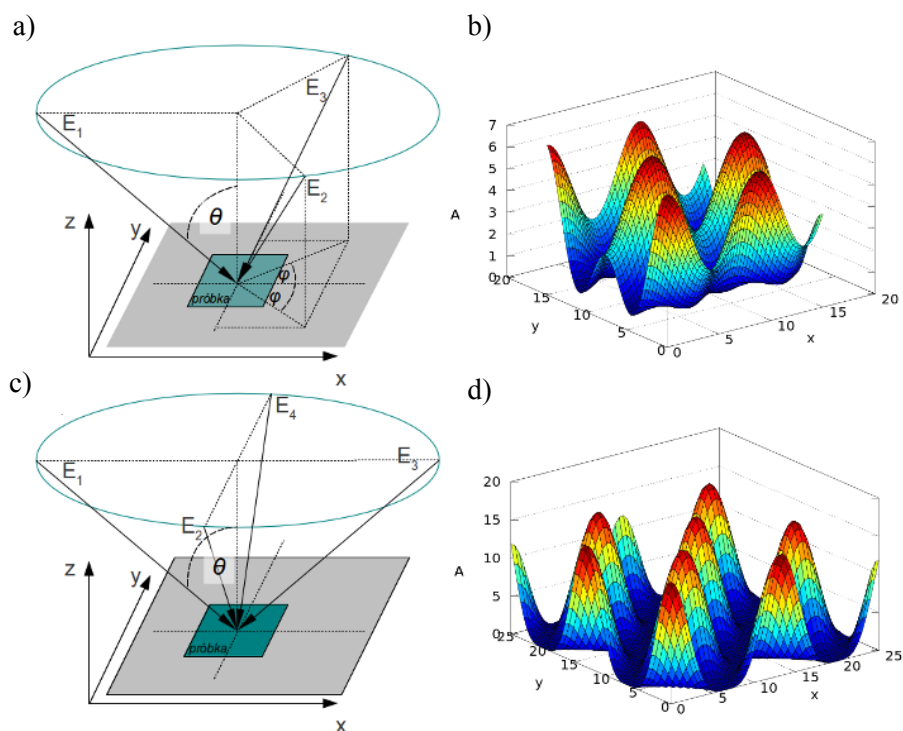
$$I(x, y) = 2I_0[2 + \cos(2kx \sin \theta) + \cos(2ky \sin \theta)] \quad (6)$$

Utworzenie układu wielowiązkowego zwykle wiąże się z dużym nakładem czasu i wprowadzeniem do układu nowych podzespołów a taka prosta modyfikacja w postaci obrotu próbki jest szybką i efektywną metodą na utworzenie wzorów bardziej skomplikowanych niż jednowymiarowe struktury.

Układ trójwiązkowy można zastąpić obracając układ z rysunku 2 o 60° dwukrotnie. W ten sposób otrzymamy symetryczny rozkład pola jak dla układu trzywiązkowego [6]. Przyjmując, że wiązki nakładane są symetrycznie jak na rysunku 3a, ko-

rzystając ze wzoru (2) i przyjmując, że wiązki mają identyczne natężenia, otrzymuje się wzór na natężenie pola w zależności od pozycji na próbce dla trzech wiązek [7]:

$$I(x, y) = I_0[3 + 2 \cos(kx \sin \varphi \sin \theta + ky \sin \theta(1 + \cos \varphi)) + 2 \cos(-kx \sin \varphi \sin \theta + ky \sin \theta(1 + \cos \varphi)) + 2 \cos(2kx \sin \varphi \sin \theta)]. \quad (7)$$



Rys. 3. Efekty interferencji trójwiązkowej i czterowiązkowej:

a), b): Parametry wiązek: $I_1 = I_2 = I_3 = 1$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 150^\circ$, $\varphi_3 = 240^\circ$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 4,5^\circ$, c), d): Parametry wiązek: $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 1$, $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $\varphi_3 = 180^\circ$, $\varphi_4 = 270^\circ$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 4,5^\circ$

Korzystając ze wzoru (2) można także wyznaczyć natężenie pola dla czterech interferujących wiązek. W takim przypadku dla wiązek o identycznych amplitudach propagujących się symetrycznie jak przedstawiono na rysunku 7 pod niewielkim kątem θ do osi z wypadkowe natężenie wynosi [7]:

$$I(x, y) = 2I_0[2 + \cos(2ky\theta) + \cos(2kx\theta) + 4 \cos(kx\theta) \cos(ky\theta)] \quad (8)$$

Symulacja wyników obliczeń przeprowadzonych dla trzech i czterech interferujących wiązek przedstawiono na rysunku 3. Jak widać dzięki zastosowaniu naświetlania wieloma wiązkami można otrzymać złożone struktury wielowymiarowe w tym struktury

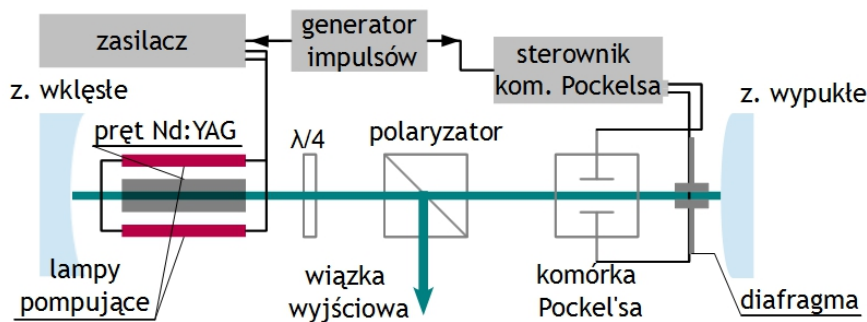
trójwymiarowe (stosując odpowiednie ustawienie wiązek i przezierny fotorezyst). Tylko w konfiguracjach wielowiązkowych można tworzyć skomplikowane struktury trójwymiarowe.

Obraz interferencyjny zależy nie tylko od rozkładu natężenia interferujących wiązek ale także od stanu polaryzacji każdej z nich. Zwykle zakłada się i tworzy w układzie służącym do utrwalania wzorów interferencyjnych polaryzację liniową typu s co znacznie ułatwia obliczenia i symulację otrzymywanych wyników. W tym też wypadku dla dwóch wiązek interferujących jak na rysunku 2 dla każdego kąta θ otrzymuje się maksymalny rozkład natężenia (zależny jedynie od natężenia wiązek). Jeśli wiązki propagują się pod różnymi kątami do osi x (nie tworzą wspólnej płaszczyzny) wtedy konieczne jest uwzględnienie w jaki sposób polaryzacja obniży jakość wzoru interferencyjnego.

5. DWUKANAŁOWY SYSTEM LASEROWY Nd:YAG

Laserny układ eksperymentalny składa się zasadniczo z dwóch podzespołów tj.: generatora oraz dwukanałowego wzmacniacza, którego każda gałąź zawiera po dwa stopnie wzmacniające.

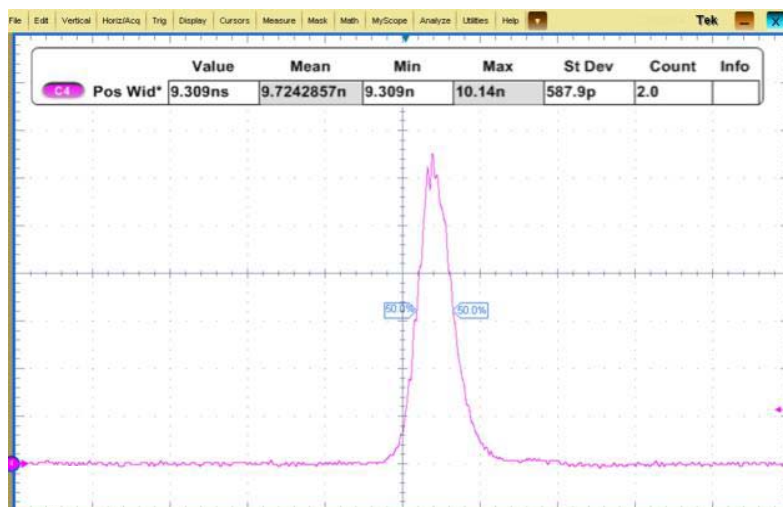
Ośrodkiem aktywnym w generatorze oraz we wzmacniaczu jest kryształ Nd:YAG w kształcie prętów o średnicach odpowiednio od 6 przez 8 do 12 mm. Pręty Nd:YAG są pompowane przez liniowe lampy błyskowe. Schemat układu generatora przedstawiono na rysunku 4.



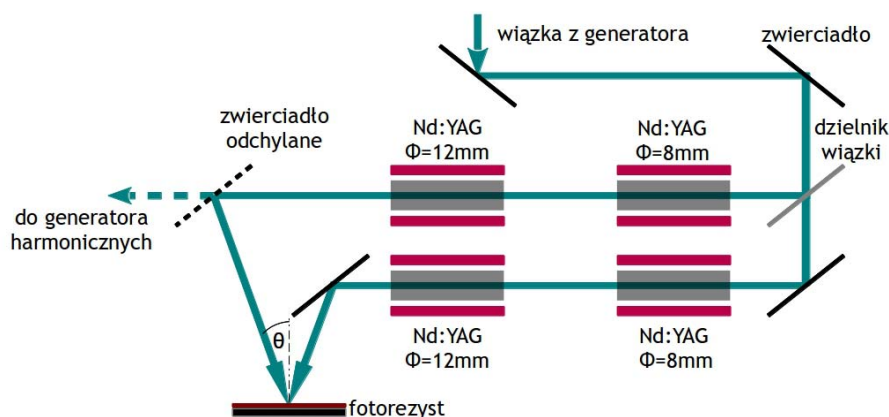
Rys. 4. Schemat lasera Nd:YAG

Impuls promieniowania spójnego o czasie trwania około 10 ns i energii 50 mJ, jest emitowany przez generator, pracujący w warunkach modulacji dobroci rezonatora, a jego przestrzenny rozkład gęstości energii, zbliżony do kształtu TEM_{00} został uformowany przez konfokalny rezonator niestabilny typu $p - branch$. Oscylogram z przebiegiem impulsu laserowego przedstawiono na rysunku 5.

Impuls laserowy po wyjściu z generatora trafiał na dzielnic wiązki, a po podziale do dwóch torów wzmacniających z prętami laserowymi. Dzięki przejściu przez głowice wzmacniające, maksymalna energia na wyjściu każdego z kanałów wynosiła do 1,5 J. Schemat układu przedstawiono na rysunku 6. Głowice wzmacniające wchodziły w skład ramion interferometru Macha – Zehndera.

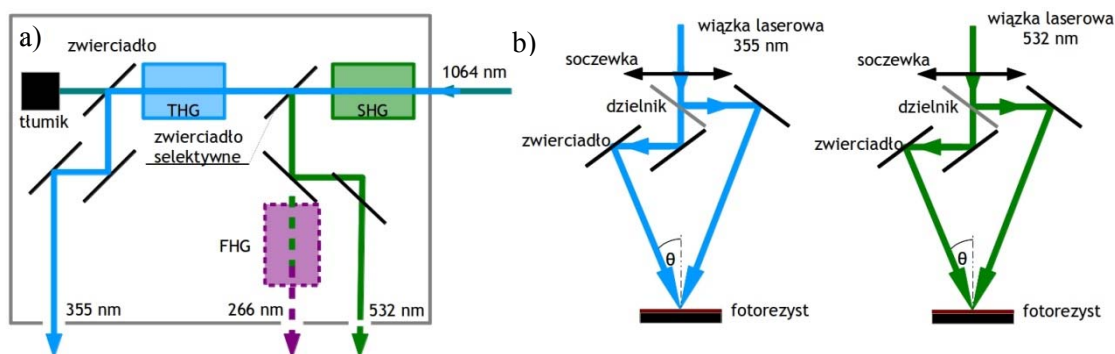


Rys. 5. Oscylogram impulsu laserowego



Rys. 6. Schemat dwukanałowego systemu wzmacniającego w układzie interferometru Macha-Zehndera

Dzięki zastosowaniu takiej konfiguracji, łatwo można było zmieniać kąt między wiązkami oraz pole powierzchni naświetlanego materiału. Duży przekrój poprzeczny głowice wzmacniających umożliwił w jednym impulsie naświetlanie struktur periodycznych na dużych powierzchniach $\sim 1 \text{ cm}^2$. Można było także zastosować naświetlanie kilkoma impulsami jednocześnie (między kolejnymi impulsami występuje korelacja, impulsy są zgodne w fazie co powoduje, że struktura naświetlana jest w tych samych miejscach z każdym kolejnym padającym impulsem) by zwiększyć kontrast otrzymanego obrazu periodycznego. Można było także stosować naświetlanie kilkoma impulsami obok siebie by zwiększyć pole powierzchni struktury periodycznej. Każda głowica wzmacniająca podłączona była do oddzielnego źródła zasilania. Dzięki płynnej regulacji poziomu pompowania prętów laserowych można dokładnie dostroić się do równego poziomu energii w obu interferujących wiązkach laserowych. W klasycznej wersji interferometru Macha – Zehndera nie są stosowane głowice wzmacniające w oddzielnych jego ramionach [8].



Rys. 7. Przetwarzanie na wyższe harmoniczne:

a) schemat urządzenia do generacji harmonicznych; b) układy dwóch wiązek do tworzenia wzorów interferencyjnych za pomocą drugiej i trzeciej harmonicznej

W układzie zastosowano także generatory wyższych harmonicznych lasera Nd:YAG (rys. 7a). Wykorzystując zjawisko nieliniowości w kryształach KD*P, układ powodował konwersję promieniowania z częstotliwość podstawowej na kolejne, wyższe częstotliwości. Aktualnie eksperymenty prowadzone są z wykorzystaniem drugiej (532 nm) i trzeciej (355 nm) harmonicznej lasera Nd:YAG. Planowane jest uzupełnienie układu o kryształ do generacji czwartej harmonicznej (266 nm).

Na rysunku 7b przedstawiono konfigurację nakładania i interferencji wiązek generujących drugą i trzecią harmoniczną. Dzięki użyciu krótszych długości fali otrzymuje się mniejsze odległości między prążkami. Ponadto polimery oraz warstwy DLC mają większy współczynnik absorpcji w nadfiolecie co jest kolejnym atutem przemaszającym za użyciem układu do generacji harmonicznych [9].

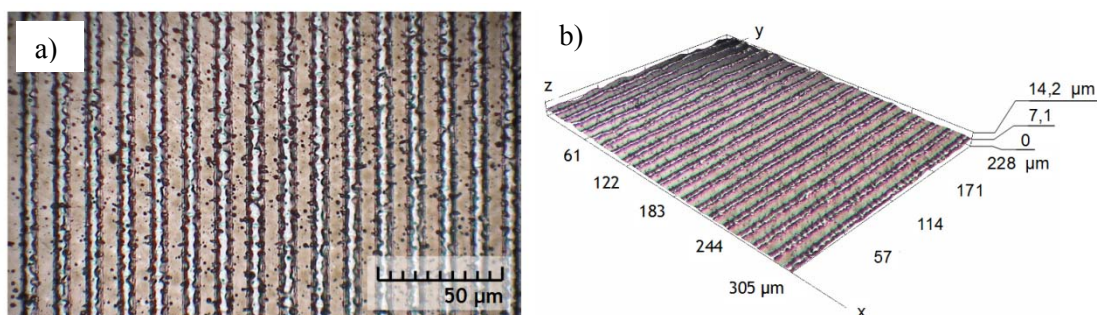
Do analizy otrzymanych obrazów użyto optycznego mikroskopu firmy HIROX o maksymalnym powiększeniu do 2500 razy.

6. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

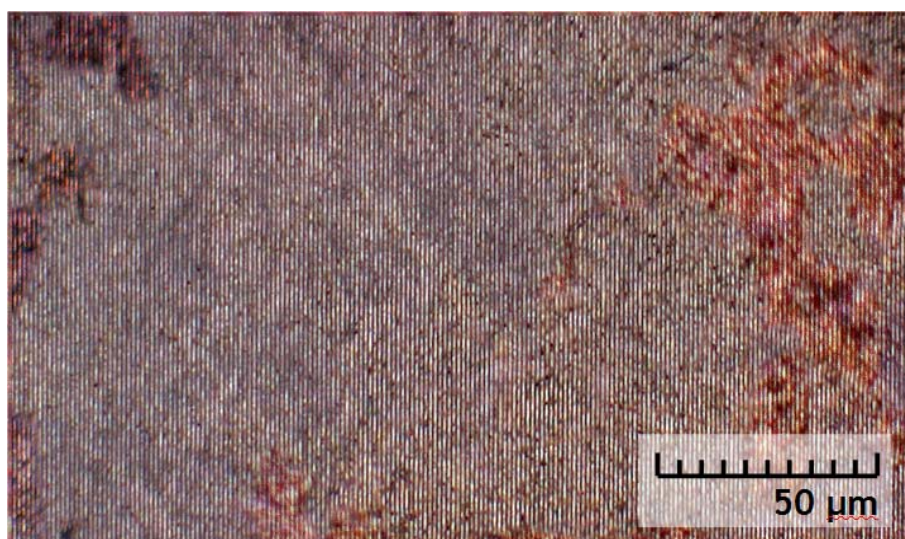
Za pomocą układu laserowego przedstawionego w poprzednim rozdziale wytworzono struktury periodyczne na różnych materiałach. Część z nich przedstawiono poniżej. Wszystkie użyte warstwy światłoczułe to fotorezysty pozytywne.

Na rysunku 8 widać wynik naświetlenia powierzchni polimeru pokrytej warstwą węgla diamentopodobnego. Obok przedstawiono obraz struktury w 3D. Jak widać struktura cechuje się dużym kontrastem. Niewielkie czarne punkty świadczą o ponownym osadzeniu się odparowanych cząstek na powierzchni materiału. Odpowiedź materiału na zadany rozkład pola interferencyjnego jest jednakowa. Świadczy to o tym, że wiązki laserowe były lokalnie, wzajemnie jednorodne. W tym wypadku naświetlano materiał długością fali 1064 nm. Periodek struktury wynosi $13,1 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Dzięki zastosowaniu przetwornika częstotliwości na drugą harmoniczną lasera Nd:YAG wytworzono strukturę periodyczną przedstawioną na rysunku 9. Próby utworzenia wysokojakościowego wzoru bez konwersji promieniowania kończyły się utwaleniem obrazu niższej jakości. Materiał dla długości fali generacji lasera Nd:YAG (1064 nm) jest w dużej mierze przezierny. Dzięki zastosowaniu długości fali 532 nm uzyskano lepszą odpowiedź ośrodka absorbującego i wytworzono strukturę periodyczną o dużej powierzchni. Na obrazie widać, że struktura cechuje się dużym uporządkowaniem i wysokim współczynnikiem kontrastu. Jak widać za pomocą bezpośredniej litografii interferencyjnej można naświetlać duże obszary. Dzięki metodzie skanowania można tworzyć struktury periodyczne na obszarach rzędu cm^2 .

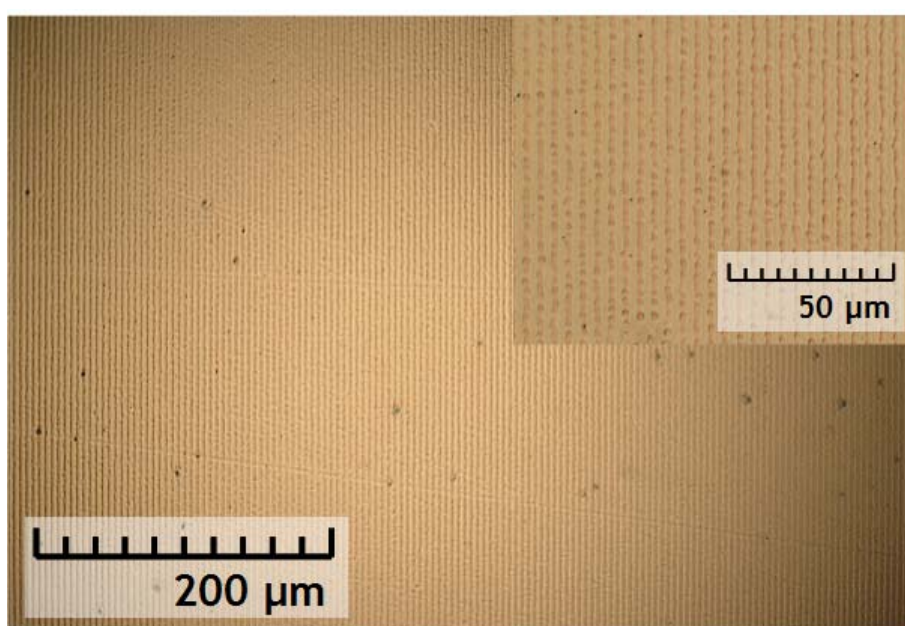


Rys. 8. Siatka dyfrakcyjna utworzona na warstwie DLC na powierzchni polimeru:
a) widok z góry; b) widok przestrzenny

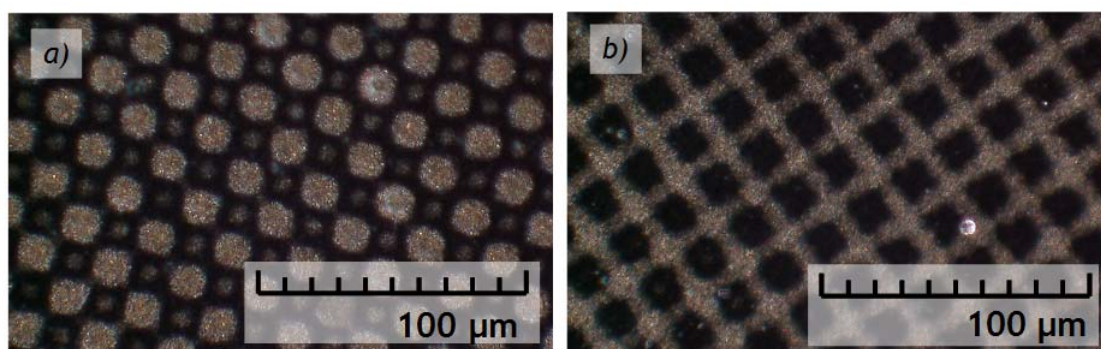


Rys. 9. Struktura periodyczna utrwalona na powierzchni diamentu węglopodobnego na podłożu polimerowym

Na rysunku 10 przedstawiono wynik wytworzenia struktury periodycznej na powierzchni złota. Jak widać stworzono strukturę bardzo dobrej jakości. Ponadto, naświetlone obszary znajdują się na wyjątkowo dużej powierzchni. Pozwala to na efektywniejsze wykorzystanie struktury i mniej procesów technologicznych prowadzących do pokrycia wzorem periodycznym dużych powierzchni. W lewym górnym rogu pokazano powiększony fragment obrazu. Widać, że struktura jest jednorodna. Jednak najlepsza nawet struktura periodyczna posiada pewne niejednorodności (tutaj pojawia się np. tzw. *bridging effect* [10] czyli niechciane połączenie maksimów wzoru periodycznego). Period struktury wynosi ok $4,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$.



Rys. 10. Struktura periodyczna na powierzchni próbki złota



Rys. 11. Struktury wielowymiarowe:

a) wynik naświetlenia pięcioma wiązkami; b) wynik naświetlenia czterema wiązkami

Na rysunku 11 przedstawiono przykłady struktur wielowymiarowych. Obrazy cechują się dużą jednorodnością. Struktura z rysunku a) została utrwalona za pomocą interferencji pięciu niezależnych wiązek. Periodek struktury wynosi $19 \pm 1 \mu\text{m}$. Układ z rysunku b) natomiast naświetlono posługując się układem czterowiązkowym. Odległość między maksimami otrzymanej struktury wynosi w tym przypadku ok $20 \pm 1 \mu\text{m}$.

Za pomocą opisanego systemu laserowego wytworzono struktury 1D i 2D służące jako rusztowania do wzrostu komórek biologicznych. Wstępne wyniki pokazują, że zmiana takich biogodnych materiałów poprawia i wzmacnia oddziaływanie komórek z powierzchnią, a w konsekwencji ich wzrost, przyczepność i kierunek orientacji [11].

7. PODSUMOWANIE

Zaprezentowano system laserowy służący do bezpośredniego wytwarzania wzorów interferencyjnych metodą litograficzną. Wytworzono i zbadano struktury periodyczne o dużym kontraście charakteryzujące się dużym stopniem periodyczności i dużą powierzchnią naświetlonego wzoru. Planuje się tworzenie struktur wielowymiarowych oraz wykorzystanie wyższych harmonicznych lasera Nd:YAG.

Podziękowania

Praca finansowana jest w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki, nr 2326/B/T02/2011/40 „Laserowe interferencyjne kształtowanie warstw powierzchniowych metali”.

Artykuł został przedstawiony na konferencji POOMT 2014 w Baranowie Sandomierskim w dniach 28-30 maja 2014 r., dofinansowanej przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. Guy M. Burrow, Thomas K. Gaylord, Multi-Beam Interference Advances and Applications: Nano-Electronics, Photonic Crystals, Metamaterials, Subwavelength Structures, Optical Trapping, and Biomedical Structures, Micromachines, 2, pp. 221-257, 2011.
2. Joong-Mok Park, Wai Leung, Kristen Constant, Sumit Chaudhary, Tae-Geun Kim and Kai-Ming Ho, Laser Interference Lithography for Fabricating Nanowires and Nanoribbons, Nanowires – Implementations and Applications, 2011.
3. Johannes de Boor, Nadine Geyer, Ulrich Gösele, Volker Schmidt, Three-beam interference lithography: upgrading a Lloyd's interferometer for single-exposure hexagonal patterning, Optics Letters, vol. 34, no. 12, 2009.
4. J. Robertson, Diamond-like amorphous carbon, Materials Science and Engineering, R 37, pp. 129-281, 2002.
5. Luigi Pollara Verdoni, Submicron patterning using laser interference lithography, MSc Thesis, New Jersey Institute of Technology, 2006.

6. Krzysztof Czyż, Jan Marczak, Bezpośrednia litografia interferencyjna, Materiały z konferencji wiWAT2013, (3 grudnia 2013), 2013.
7. Douglas S. Hobbs, Bruce D. MacLeod, Adam F. Kelsey, Mark A. Leclerc, Ernie Sabatino III, Daniel P. Resler, Automated Interference Lithography Systems for Generation of Sub-Micron Feature Size Patterns, Proc. SPIE 3879, Micromachine Technology for Diffractive and Holographic Optics, 124, doi:10.1117/12.360517, 1999.
8. Hasan Korre, On the development of low-cost lithographic interferometer, MSc Thesis, MIT, Department of Electrical Engineering and Computer Science, 2010.
9. Andrea's F. Lasagni, Denise Langheinrich, Sebastian Eckhardt, Direct fabrication of periodic patterns on polymers using laser interference, Plastics Research On-line, 6 July 2012, doi: 10.2417/spepro.004281, 2012.
10. Henk van Wolferen, Leon Abelmann, Laser Interference Litography, Litography: Principles, Processes and materials, pp. 133-148, 2011.
11. Jan Marczak, Antoni Rycyk, Antoni Sarzyński, Marek Strzelec, Krzysztof Czyż, Laser interference patterning of DLC layers for directed migration and growth of smooth muscle cell depositions, EMRS Fall Meeting, Warszawa 2013.

Rękopis dostarczono dnia 16.04.2014 r.

CREATING OF PERIODIC STRUCTURES WITH DIRECT LASER INTERFERENCE LITOGRAPHY

Krzysztof CZYŻ,
Antoni RYCYK, Marek STRZELEC,
Antoni SARZYŃSKI, Jan MARCZAK

ABSTRACT *In this article a direct laser interference lithography method is described. This method is one of the best solutions for top surface of material modifications – changes of topography and microstructure. These changes lead to many beneficial modifications of material properties from mechanical ones like change of friction coefficient to change of optical or magnetic properties etc.*

In the article we introduce laser system based on Nd:YAG crystal with Q-modulation, generating pulses of 8-10 ns duration with maximal energy 1,5 J in each channel. The laser was used to produce interference structures on surfaces of photo-active materials. Two channels of interferometer laser system make simultaneously Mach-Zehnder interferometer.

We introduce periodical structures (1D and 2D) created on surfaces of polymers, metals, and DLC type surfaces. In the conclusion, possible practical applications of manufactured structures are shown.

Keywords: *direct interference lithography, direct surface structuring, surface engineering, biosuitable materials, periodic structures*

Mgr inż. Krzysztof CZYŻ – student studiów III stopnia w Wojskowej Akademii Technicznej na kierunku Inżynieria Materiałowa na wydziale Nowych Technologii i Chemii, pracownik Instytutu Optoelektroniki na stanowisku st. inżynier. Ukończył Wydział Fizyki na Politechnice Warszawskiej na specjalności Fotonika. Obecnie wraz z Zespołem dra hab. inż. Jana Marcza pracuje nad badaniami nad nowymi strukturami periodycznymi do zastosowań bioinżynieryjnych, tribologicznych i innych.



Mgr inż. Antoni RYCYK jest absolwentem wydziału Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej o specjalności Elektronika Kwantowa i Fizyka Ciała Stałego. Obecnie st. specjalista n-t w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się zagadnieniami kształtowania parametrów czasowo - przestrzennych impulsów promieniowania laserowego dużej mocy, wybranymi aspektami oddziaływania promieniowania spójnego z materią oraz konstrukcjami urządzeń laserowych do celów specjalnych. Współautor około 40 artykułów i komunikatów opublikowanych w naukowych czasopismach polskich i zagranicznych, a ponadto współtwórca czterech świadectw autorskich o dokonaniu wynalazku oraz dwóch świadectw o dokonaniu wzoru użytkowego.

Dr inż. Marek STRZELEC jest z wykształcenia elektronikiem ze specjalizacją elektronika kwantowa. Największe doświadczenie posiada w zakresie diagnostyki i analizy efektów oddziaływania promieniowania laserowego z materiałami. Reprezentuje Polskę w Europejskiej Sieci Zastosowań Laserów EULASNET. Wśród osiągnięć aplikacyjnych wymienić należy udział w opracowaniach, wdrożeniach i projektach dotyczących zastosowania techniki laserowej w konserwacji dzieł sztuki i w inżynierii materiałowej, włącznie z koordynacją prac na szczeblu międzynarodowym.



Dr inż. Antoni SARZYŃSKI ukończył studia na kierunku fizyki technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w roku 1973. W roku 1992 obronił doktorat na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Jest autorem lub współautorem kilkunastu publikacji naukowych z dziedziny fizyki plazmy i laserowej syntezy termojądrowej, układów laserowych dużej mocy, fizyki wybuchu, interferometrii laserowej, spektrometrii oraz oddziaływania promieniowania laserowego z materią. Obecnie zajmuje się laserową obróbką materiałów.

Dr hab. inż. Jan MARCZAK, prof. WAT – ukończył studia na kierunku fizyki technicznej Wojskowej Akademii Technicznej roku 1973. Stopień doktora habilitowanego otrzymał w dziedzinie inżynierii powierzchni. Specjalizuje się w technice laserowej i jej zastosowaniach w mikrotechnologii oraz ochronie i konserwacji dziedzictwa kultury. Kieruje Laboratorium Zastosowań Laserów w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się oddziaływaniem silnego promieniowania laserowego z materiałami w zastosowaniach inżynierii materiałowej oraz technologią utwardzania powierzchni materiałów (metale, ceramiki) metodą fali uderzeniowej wytwarzanej przez impuls laserowy.



