

**Katarzyna Garasz, Robert Barbucha, Marek Kocik, Mateusz Tański**  
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

**Jerzy Mizeraczyk**  
Akademia Morska w Gdyni

## **PROTOTYPOWE URZĄDZENIE LASEROWE DO FEMTOSEKUNDOWEJ MIKROOBRÓBKI MATERIAŁÓW**

*W artykule przedstawiono prototypowe urządzenie do laserowej mikroobróbki materiałów. Urządzenie to wykorzystuje femtosekundowy laser światłowodowy oparty na kryształach Yb:KYW. Wykorzystanie ultrakrótkich impulsów laserowych w mikroobróbce materiałów oferuje dużą przewagę nad mikroobróbką długoimpulsową ze względu na zminimalizowanie szkodliwego wpływu oddziaływań cieplnych. Pozwala to na bardzo precyzyjne i czyste cięcia oraz wysoki stopień gładkości krawędzi obrabianych materiałów.*

### **WPROWADZENIE**

Prezentowane w artykule prototypowe urządzenie laserowe zaprojektowano z myślą o pełnym wykorzystaniu zalet femtosekundowych impulsów laserowych do mikroobróbki materiałów. Docelowo urządzenie to może zostać wdrożone w przemyśle elektronicznym i precyzyjnym, fotowoltaicznym, a także w innych dziedzinach z obszaru wysoko zaawansowanych technologii.

Laserowa mikroobróbka materiałów za pomocą impulsów femtosekundowych wykorzystuje zjawisko ablacji laserowej, tzn. całkowitego odparowania materiału z obrabianej powierzchni w wyniku oddziaływania impulsu laserowego z materiałem. Jest to bezkontaktowy sposób obróbki materiału, który nie wymaga żadnych dodatkowych narzędzi skrawających. Usuwanie fragmentów materiału zachodzi dokładnie w miejscu padania wiązki laserowej na materiał [3].

Podczas trwania procesu mikroobróbki laserowej ciepło przekazywane do materiału przez impuls laserowy powoduje powstawanie tzw. strefy oddziaływania cieplnego, która znacząco obniża jakość elementów poddanych obróbce. W zależności od materiału i konkretnego zastosowania zjawisko to może spowodować odbarwienie materiału, lokalne stopienia, odkształcenia wewnątrz i na powierzchni materiału, mikropęknięcia i wiele innych niepożądanych efektów. Badania pokazały, że skracanie czasu trwania impulsu laserowego istotnie ogranicza strefę oddziaływań cieplnych, co przekłada się na jakość obrabianych struktur [2].

Obecnie do mikroobróbki często stosowane są lasery nanosekundowe (czas trwania impulsu rzędu  $10^{-9}$  s). Innowacyjność urządzenia femtosekundowego pole-

ga na zastosowaniu ultrakrótkich impulsów laserowych o czasie trwania rzędu  $10^{-15}$  s przy zachowaniu dużej mocy lasera. Koncentracja energii w pojedynczym impulsie jest wtedy na tyle duża, że odrywanie się cząsteczek materiału zachodzi praktycznie z pominięciem szkodliwych efektów, związanych z przekazywaniem ciepła. Dzięki temu obszar mikroobróbki charakteryzuje się dużą gładkością krawędzi i możliwe jest wykonywanie bardzo precyzyjnego cięcia, drażenia czy graferowania materiału.

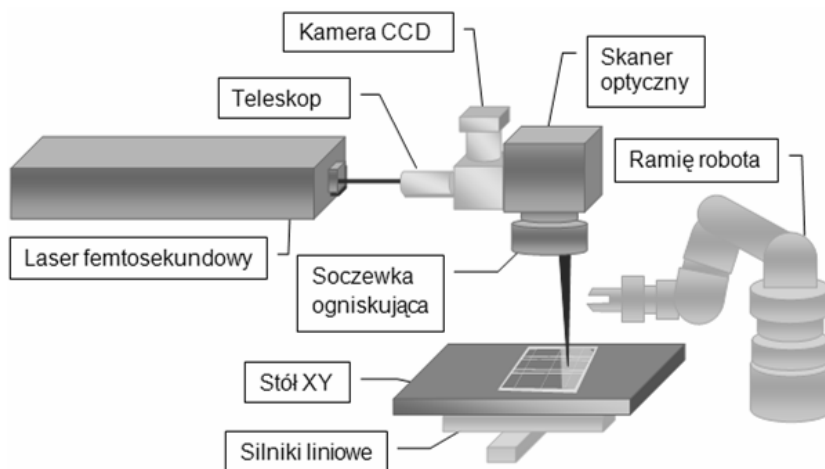
## 1. FEMTOSEKUNDOWE URZĄDZENIE LASEROWE DO MIKROOBRÓBKI MATERIAŁÓW (FULMM)

Koncepcja budowy urządzenia FULMM przewiduje dokładną i efektywną mikroobróbkę materiałów z zastosowaniem lasera femtosekundowego. Przeznaczeniem urządzenia jest zautomatyzowana linia produkcyjna, w której cały proces mikroobróbki będzie mógł odbywać się przy minimalnym udziale człowieka. W tym celu zaimplementowano m.in. zautomatyzowane ramię robota z pneumatycznym systemem chwytającym. Zastosowanie ramienia robota pozwoli także na pominięcie czynnika ludzkiego przy mikroobróbce materiałów kruchych lub wrażliwych na naprężenia. Urządzenie będzie zatem umożliwiało zarówno mikroobróbkę materiałów powszechnie stosowanych w przemyśle, takich jak metale, ceramika, polimery, szkło, jak i bardziej specjalistycznych, np. diamentu, teflonu, ogniw fotowoltaicznych. W powyższych materiałach możliwe będzie wykonywanie pełnego zakresu procesów mikroobróbki, tj. strukturyzacji materiału, drażenia otworów przelotowych i nieprzelotowych, nacięć, rowków czy zagłębień. Laser znajdujący się w urządzeniu pozwoli na dopasowanie parametrów wiązki promieniowania w zależności od wybranej metody mikroobróbki oraz rodzaju materiału.

Schemat ideowy urządzenia FULMM przedstawiono na rysunku 1. Najważniejszymi elementami są tutaj: laser femtosekundowy, skaner optyczny z soczewką ogniskującą oraz stół XY oparty na silnikach liniowych, umożliwiający przemieszczanie próbki w dwóch osiach poziomych. Elementami dodatkowymi są urządzenia monitorujące i wspomagające proces mikroobróbki, jak kamera CCD oraz ramię robota.

Wiązka generowana przez laser femtosekundowy, omówiony szczegółowo w kolejnym rozdziale, przechodzi przez optyczny układ kolimujący i kierowana jest na wejście skanera optycznego. W urządzeniu FULMM zastosowano skaner wyposażony w dwa galwanometryczne zwierciadła, umożliwiające przemieszczanie wiązki laserowej według zadanego schematu w płaszczyźnie XY. Prędkość przemieszczania wiązki wynosi 3 m/s. Na wyjściu skanera zastosowano specjalistyczną optykę ogniskującą w postaci soczewki telecentrycznej o ogniskowej 100 mm. Dzięki temu, niezależnie od kąta padania wiązki na soczewkę, jest ona zawsze ogniskowana prostopadle do powierzchni materiału i zapewnia jednorodne warunki oddziaływania promieniowania z materiałem w całym obszarze roboczym

skanera. Dodatkowym układem monitorującym prawidłowe działanie układu jest kamera CCD, umożliwiająca obserwację ogniska laserowego w czasie rzeczywistym. Jest ona połączona ze skanerem optycznym poprzez specjalny układ adaptacyjny.



**Rys. 1.** Schemat ideowy urządzenia FULMM

**Fig. 1.** Schematic of the micromachining system

Ważnym argumentem przemawiającym za zastosowaniem skanera optycznego w urządzeniu FULMM jest wydajność mikroobróbki. Wewnętrzne zwierciadła skanera są lekkie i mogą zmieniać położenie z maksymalną prędkością 100 rad/s. Prędkość działania urządzenia będzie zatem dużo większa niż w urządzeniach, gdzie przemieszczana jest cała głowica laserowa. Stosowanie skanerów optycznych ma jednak podstawową wadę – mały obszar roboczy obejmujący przeważnie obszar zdefiniowany przez rozmiary zastosowanej optyki ogniskującej. Wprowadza to konieczność zastosowania dodatkowo modułu, zapewniającego przemieszczanie materiału poddawanego mikroobróbce w osiach X i Y (stołu XY). Napędem stołu XY jest układ złożony z dwóch skrzyżowanych silników liniowych, o precyzji przesuwu rzędu 2  $\mu\text{m}$ . W zależności od potrzeb możliwe jest zastosowanie obu (skanera oraz stołu) układów pozycjonowania jednocześnie lub tylko jednego z nich, przy czym zwiększenie obszaru mikroobróbki nie powoduje pogorszenia precyzji procesu.

Elementem wspomagającym proces jest, wspomniany już uprzednio, moduł ramienia robota z pięcioma stopniami swobody, wyposażony w końcówki pneumatyczne do precyzyjnego uchwycenia obrabianego materiału. W przypadku materiałów, których rozmiar nie przekracza rozmiaru obszaru roboczego skanera optycznego, można je również umieścić za pomocą robota bezpośrednio w obszarze naświetlania, tj. bez konieczności użycia stołu XY.

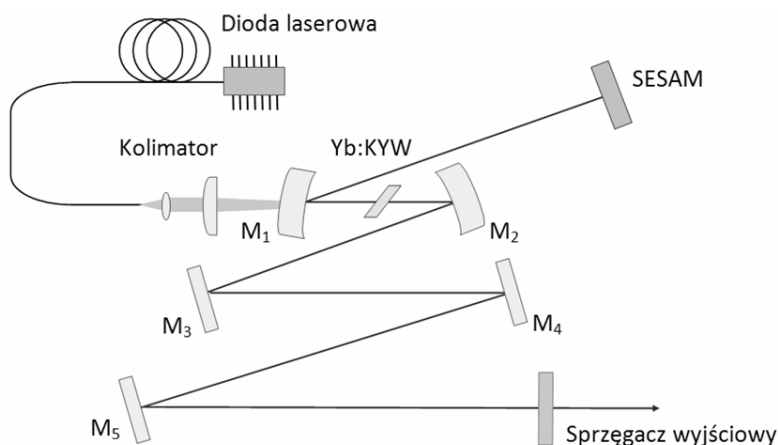
## 2. PROTOTYPOWY LASER FEMTOSEKUNDOWY

Na potrzeby urządzenia FULMM zaprojektowano i wykonano laser generujący impulsy femtosekundowe, o parametrach mających spełniać wymagania precyzyjnej mikroobróbki materiałów.

Do najbardziej rozpowszechnionych obecnie technologii wytwarzania laserów femtosekundowych należą lasery tytanowo-szafirowe oraz lasery oparte na światłowodach domieszkowane jonami metali ziem rzadkich. W tych drugich wykorzystuje się włókno światłowodowe, pompowane optycznie, najczęściej przez diodę laserową. Światłowód jest zmodyfikowany poprzez domieszkowanie erbem, neodymem, iterbem lub innymi pierwiastkami ziem rzadkich, zapewniającymi inwersję poziomów w procesie pompowania. Włókno posiada dodatkową warstwę okrywającą, składa się zatem z rdzenia, płaszcza wewnętrznego (szkło) i płaszcza zewnętrznego (polimer) [1].

Aby uzyskać impulsy o czasie trwania rzędu femtosekund, w laserach światłowodowych stosuje się synchronizację modów. Wyróżnia się tutaj techniki aktywne oraz pasywne. W technice aktywnej wykorzystuje się modulator akustooptyczny, który moduluje amplitudę z częstotliwością równą różnicy częstotliwości między modami generowanymi we wnętrzu rezonatora. W metodach pasywnych zastosowanie znajdują m.in.: metoda samoogniskowania Kerra, metoda nasycających się absorbentów, metoda nieliniowych zwierciadeł w pętli światłowodowej czy też metoda rotacji polaryzacji [8].

Źródłem impulsów femtosekundowych w laserze w urządzeniu FULMM jest oscylator oparty na kryształach wolframanu itrowo-potasowego domieszkowanego jonami iterbu Yb:KYW. Jego budowę przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Oscylator femtosekundowy jako źródło impulsów femtosekundowych

**Fig. 2.** Femtosecond oscillator

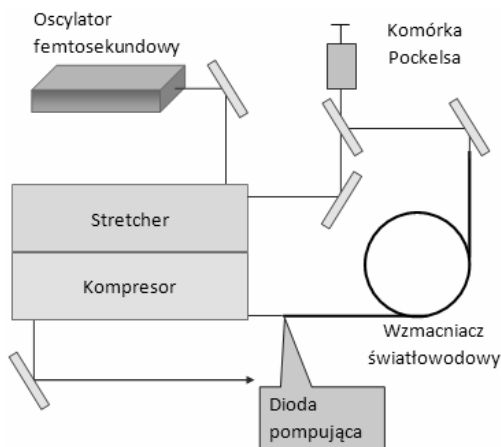
Oscylator zbudowano, wykorzystując rezonator laserowy w konfiguracji „z”, z kryształem Yb:KYW. Zwierciadła M1 – M5 (o ujemnej dyspersji) zastosowano w celu kompensacji dodatniej dyspersji grupowej kryształu wewnątrz rezonatora.

W oscylatorze wybrano pasywną metodę synchronizacji modów, działającą na półprzewodnikowym zwierciadle Bragga z nasycalną absorpcją (typu SESAM). Nasycający się absorbent powoduje modulacje strat w rezonatorze, co prowadzi do synchronizacji modów i generowania coraz krótszych impulsów laserowych. Modulacja częstotliwości oraz amplitudy generowanych impulsów wynika z nieliniowej zależności współczynnika absorpcji od natężenia padającego promieniowania. Kryształ laserowy pompowany jest jednomodową diodą laserową o długości fali 980 nm. Laser przechodzi samoczynnie w tryb synchronizacji modów, kiedy prąd diody przekroczy 600 mA. Wiązka wychodząca z oscylatora jest następnie wzmacniana.

Wzmacnianie impulsów w laserach generujących ultrakrótkie impulsy realizuje się zazwyczaj w technice CPA (*Chirped Pulse Amplification*). Technika ta polega na rozciągnięciu impulsu w czasie w układzie dyspersyjnym, jego wzmocnieniu, a następnie kompresji do pierwotnego czasu trwania w układzie o odwrotnej dyspersji. Konieczność zastosowania takiej techniki wzmacniania wynika z faktu, że duże moce szczytowe impulsów są w stanie spowodować znaczne uszkodzenia w medium wzmacniającym wskutek procesów nieliniowych. Rozciągnięcie impulsu uzyskano poprzez zastosowanie układu siatek dyfrakcyjnych i teleskopu (stretchera). Taka kombinacja elementów liniowych nie modyfikuje widma pierwotnego impulsu [3].

Wzmocnienie impulsów w laserach światłowodowych realizuje się zazwyczaj w dwóch stopniach, co zapewnia większą efektywność pompowania optycznego włókna. W obecnej, prototypowej wersji lasera wzmacnianie jest realizowane jednostopniowo. Trwają jednak prace nad zwiększeniem mocy średniej lasera poprzez dodanie drugiego stopnia mocy.

Schemat obecnego układu wzmacniacza przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu wzmacniacza lasera femtosekundowego

Fig. 3. Schematic of the amplifier

Jak wynika z przedstawionego schematu, impulsy wychodzące z oscylatora trafiają bezpośrednio do stretchera, gdzie zostają rozciągnięte w czasie do ok. 100 ps. Stretcher działa w tzw. układzie Martineza, co powoduje powstanie dodatkowej dyspersji, która kompensowana jest dyspersją ujemną na etapie ponownej kompresji impulsów [6]. Sprawność stretchera wynosi 60%, moc wyjściowa – 60 mW.

Impulsy wychodzące z układu stretchera kierowane są na modulator elektrooptyczny (komórkę Pockelsa), redukujący częstotliwość repetycji z pierwotnej 94,5 MHz do 500 kHz. Następnie moc wiązki jest wzmacniana. Rolę ośrodka wzmacniającego pełnią fotoniczne włókna światłowodowe o rdzeniu domieszkowanym iterbem. Wiązka sprzęgana jest do rdzenia dwupłaszczyznowego aktywnego włókna światłowodowego o długości 1,5 m i średnicy rdzenia 40  $\mu\text{m}$ . Włókno jest zwinięte w celu polepszenia jednomodowości. Laserem pompującym jest dioda pracująca na długości fali 976 nm. Wiązka z pompy doprowadzona jest światłowodem i wpuszczona do włókna aktywnego od jego strony wyjściowej, o wysokim stopniu sprzężenia. Moc osiągnięta na wyjściu wzmacniacza wynosi 5 W (dla wiązki fundamentalnej o długości fali 1030 nm), co odpowiada wartości prądu diody pompującej 4,2 A.

Po procesie wzmocnienia impulsy przechodzą przez, wspomniany już, układ kompresora, składającego się z dwóch transmisyjnych siatek dielektrycznych. W rezultacie laser generuje ciąg impulsów femtosekundowych o czasie trwania 900 fs. Na wyjściu z lasera zainstalowano dodatkowe układy pozwalające uzyskać II (515 nm) i III (343 nm) harmoniczną wiązki fundamentalnej, o mocy odpowiednio 1,8 W i 1 W.

Podczas mikroobróbki impulsy laserowe ogniskowane są na powierzchni materiału i, w zależności od długości fali promieniowania laserowego oraz indywidualnych właściwości materiału, część promieniowania laserowego ulegnie odbiciu, natomiast pozostała część zostanie zaabsorbowana przez materiał. Możliwość wyboru długości fali dostosowanej do rodzaju obrabianego materiału i metody mikroobróbki ma zatem bardzo duże znaczenie dla skuteczności procesu.

Gęstość energii wiązki laserowej zawarta w krótkim impulsie laserowym (w omawianym urządzeniu laserowym jest to 10  $\mu\text{J}$  dla wiązki fundamentalnej) jest wystarczająca, aby doprowadzić do odparowania cząstek z powierzchni materiału w postaci plazmy. Jest to zjawisko pożądane, ponieważ umożliwia usunięcie fragmentów materiału w sposób, który zmniejsza termiczną degradację materiału. Możliwe jest zatem wykonywanie niewielkich elementów o skomplikowanych kształtach.

Oscylator generujący impulsy femtosekundowe zbudowano na kryształach Yb:KYW, wzmacniacz impulsów femtosekundowych zaś – na fotonicznych włóknach światłowodowych o rdzeniu domieszkowanym iterbem. Wybór technologii laserów światłowodowych spośród innych technologii laserów femtosekundowych nie tylko daje możliwość uzyskania dużej mocy, ale także wpływa na niskie koszty eksploatacji urządzenia (duża sprawność kwantowa ośrodka czynnego, niezawodność i długi czas życia diod laserowych używanych do pompowania).

## PODSUMOWANIE

Uzyskane wartości parametrów wiązki laserowej w prototypowym urządzeniu FULMM pozwalają stwierdzić, że laser ten spełnia standardy precyzyjnej mikroobróbki materiałów. W połączeniu z precyzyjnym układem pozycjonowania oraz wysokiej jakości optyką zastosowaną w urządzeniu FULMM, jakość mikroobróbki jest znacznie lepsza niż w wypadku np. laserów nanosekundowych.

Jednym z potencjalnych zastosowań mikroobróbki z wykorzystaniem laserów femtosekundowych są mikroukłady elektromechaniczne (MEMS). Układy te znajdują zastosowanie np. jako mikroczujniki, aktuatory, mikrodysze, mostki do pomiaru przepływów czy też precyzyjne narzędzia chirurgiczne [5]. Innym zastosowaniem urządzenia FULMM może być mikroobróbka ogniw fotowoltaicznych, m.in. szlifowanie brzegów, znakowanie paneli krzemowych, obróbka cienkich warstw (*thin film patterning*) lub też wytwarzanie materiałów do ogniw paliwowych czy nanostrukturyzacja warstw krzemowych [4, 5].

Lasery femtosekundowe w urządzeniach do mikroobróbki doskonale nadają się do wykorzystania specjalistycznego. Przykładem może być ich szerokie zastosowanie w obróbce elementów optycznych (kryształy fotoniczne, światłowody, mikrosoczewki), wytwarzaniu elementów optyki zintegrowanej, filtrów, siatek dyfrakcyjnych oraz mikrokanalów optycznych [7].

Jak wynika z wyżej wymienionych licznych zalet mikroobróbki femtosekundowej, prezentowane w powyższym artykule prototypowe urządzenie FULMM z powodzeniem znajdzie zastosowanie w wielu dziedzinach techniki, takich jak elektronika, elektrotechnika, mechanika czy nanotechnologia.

## LITERATURA

1. Abramczyk H., *Wstęp do spektroskopii laserowej*, PWN, Warszawa 2000.
2. Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., Alvensleben F. i in., *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*, Applied Physics A, No. 63, Springer-Verlag, 1996.
3. Diels J.C., Rudolph W., *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, Elsevier Inc., Oxford 2006.
4. Fedorenko L., Medvidb A., Yusupov M., Yukhimchuck V. i in., *Nanostructures on SiC surface created by laser microablation*, Applied Surface Science, No. 254, Elsevier Inc., 2008.
5. Mahalik N.P., *Micromachining and Nanotechnology*, Springer Science, New York 2006.
6. Martinez O.E., *3000 Times Grating Compressor with Positive Group Velocity Dispersion: Application to Fiber Compensation in 1.3-1.6  $\mu\text{m}$  Region*, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, No. 23.
7. Ready J.F., *Industrial Applications of Lasers*, Academic Press, San Diego 1997.
8. Ziętek B., *Lasery*, Uniwersytet im. M. Kopernika w Toruniu, Toruń 2009.



## **A PROTOTYPE FEMTOSECOND LASER SYSTEM FOR PRECISE MICROMACHINING**

### *Summary*

*This paper presents a prototype device for laser micromachining of materials. The device uses a femtosecond fiber laser based on the Yb: KYW crystal. The use of ultrashort laser pulses in the micromachining of materials offers a great advantage over a long-pulse. Ultra-short laser pulses have a unique capacity to interact with different materials without transferring heat to the area surrounding the target. This allows very precise and pure laser-processing, clean cuts and sharp edges.*