

## Zastosowanie nanosekundowej mikroobróbki laserowej do wykonywania metalowych elementów urządzeń MEMS

**Streszczenie.** W niniejszym artykule omówiono zastosowanie mikroobróbki laserowej impulsami nanosekundowymi do wykonywania metalowych elementów urządzeń MEMS (microelectromechanical systems). Omówiono ogólnie nanosekundową mikroobróbkę laserową materiałów metalowych oraz przedstawiono przykłady elementów urządzeń MEMS wykonanych tą techniką. Przedstawiono także problem degradacji obrabianego materiału podczas nanosekundowej mikroobróbki laserowej. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie do mikroobróbki laserowych impulsów femtosekundowych.

**Abstract.** In this article we present the possible application of nanosecond laser micromachining in fabrication of metal MEMS element. We describe the process of laser micromachining of materials and present few examples of metal MEMS elements. We also focus on the problem of thermal degeneration of material during process of nanosecond laser micromachining. This problem is to be avoided when femtosecond laser pulses are used in MEMS laser manufacturing. (**Application of nanosecond laser micromachining in fabrication of metal MEMS elements**).

**Słowa kluczowe:** mikroobróbka laserowa, mikrosystemy, obróbka precyzyjna, ablacja laserowa, MEMS

**Keywords:** laser micromachining, microsystems, precise machining, laser ablation, MEMS

### Wprowadzenie

Obecnie najczęściej wykorzystywanym materiałem do wykonywania elementów urządzeń MEMS (microelectromechanical systems) techniką mikroobróbki klasycznej jest krzem [1]. Spowodowane jest to doskonałymi właściwościami mechanicznymi krzemu, dzięki którym jego mikroobróbka jest procesem stosunkowo prostym [2]. Jednak niektóre elementy urządzeń MEMS nie mogą być wykonane z krzemu. Dotyczy to głównie elementów, które muszą charakteryzować się elastycznością (np. elementy akcelerometrów) i trwałością (np. mikrozębatki) lub muszą być przewodnikami elektrycznymi (np. mikroelektrody) [3]. Do takich aplikacji elementy urządzeń MEMS można wykonać z cienkiej folii metalowej (o grubości np. kilkudziesięciu mikrometrów). Jedną z technik, która pozwala na wykonywanie elementów urządzeń MEMS z cienkiej folii metalowych oraz innych materiałów, które nie poddają się klasycznym procesom mikroobróbki, jest mikroobróbka laserowa.

### Mikroobróbka laserowa

Termin mikroobróbka laserowa odnosi się zazwyczaj do techniki wykorzystującej wiązkę laserową do usuwania niewielkich ilości lub cienkich warstw obrabianego materiału w tzw. procesie ablacji laserowej. Mimo iż możliwe jest wywołanie procesu ablacji laserowej za pomocą lasera o ciągłym trybie pracy, to zwykle termin ten odnosi się do efektu wywołanego za pomocą laserów pracujących impulsowo (o czasie trwania impulsów z zakresu nanosekund i femtosekund).

Do podstawowych procesów mikroobróbki laserowej zalicza się cięcie, drążenie otworów oraz strukturyzację powierzchni [4]. Podczas mikroobróbki impulsy laserowe ogniskowane są na powierzchni materiału (np. metalu). W zależności od właściwości fizyko- optycznych materiału i długości fali promieniowania laserowego część promieniowania laserowego ulegnie odbiciu, natomiast pozostała część zostanie zaabsorbowana przez materiał. W przypadku materiałów nieprzezroczystych absorpcja promieniowania zachodzi jedynie w cienkiej warstwie tuż pod powierzchnią materiału (dla stali głębokość ta wynosi kilka nanometrów). Zaabsorbowana energia zostaje przetransportowana w głąb materiału w procesie przewodnictwa cieplnego. Materiał znajdujący się w tzw. strefie wpływu ciepła (SWC) ulega częściowemu stopieniu a

następnie odparowaniu. Jednak zazwyczaj wiąże się to z degradacją obrabianego materiału w wyniku jego uszkodzenia wokół miejsca mikroobróbki. Przejawia się to takimi efektami termicznymi jak np. deformacja, spiekanie lub przebarwienie krawędzi materiału. Przy wystarczająco wysokiej gęstości energii wiązki laserowej i krótkim czasie trwania impulsów laserowych (nanosekundy) może dojść do zjawiska gwałtownego „wyrzucenia” fazy ciekłej z miejsca mikroobróbki. Takie zjawisko jest pożądane, ponieważ umożliwia usunięcie fragmentów materiału w sposób, który zmniejsza termiczną degradację materiału [5]. Zarówno odparowywanie stopionego materiału, jak i wyrzucanie fazy ciekłej zaliczane są do procesu ablacji laserowej. Poprzez selektywne usuwanie niewielkich fragmentów materiału w procesie ablacji laserowej, możliwe jest wykonywanie niewielkich elementów urządzeń MEMS o skomplikowanych kształtach. Do zalet nanosekundowej mikroobróbki laserowej elementów urządzeń MEMS należy zaliczyć [3]:

- Możliwość mikroobróbki szerokiej gamy materiałów: metali, polimerów, ceramiki, szkła, izolatorów, przewodników,
- Mały stopień skomplikowania i dużą szybkość procesu,
- Dużą elastyczność przy projektowaniu geometrii elementów (zastosowanie sterowania CNC np. w formie galwanometrycznego skanera wiązki laserowej),
- Stosunkowo niewielka cena samego urządzenia do laserowej mikroobróbki, jak i urządzeń pomocniczych (w porównaniu z np. urządzeniem do formowania elementów za pomocą wiązki elektronów),
- Możliwość włączenia mikroobróbki laserowej w bardziej złożony proces produkcyjny urządzeń MEMS.

Do wad techniki laserowej trzeba zaliczyć:

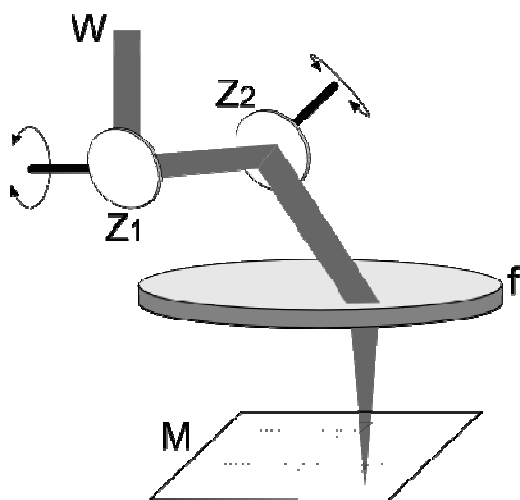
- Stosunkowo niewielką dokładność (na poziomie kilkunastu mikrometrów),
- Możliwość termicznego uszkodzenia obrabianego materiału w obszarze SWC.

Mikroobróbkę laserową najczęściej realizuje się poprzez bezpośrednie oświetlenie obrabianego materiału zogniskowaną wiązką laserową (tzw. metoda „Direct Writing”) [6]. Rzadziej stosuje się metodę projekcji wiązki laserowej przez maskę (metoda stosowana głównie w urządzeniach pracujących z laserami ekscymerowymi)

oraz metodę interferencji wiązki laserowej na powierzchni obrabianego materiału [7].

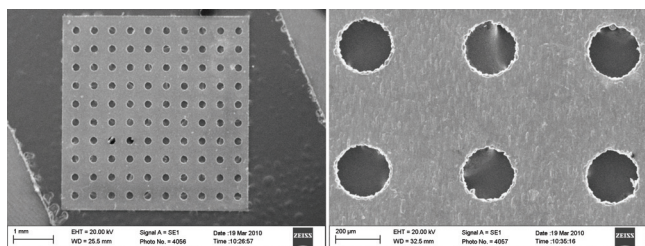
### Przykład zastosowania mikroobróbki laserowej do wykonywania elementów urządzeń MEMS

Do wykonania elementów urządzeń MEMS zastosowano urządzenie do nanosekundowej mikroobróbki laserowej wykorzystujące metodę bezpośredniego naświetlania obrabianego materiału. Źródłem światła laserowego był laser nadfioletowy Avia 355-7000 firmy Coherent (długość fali  $\lambda=355\text{nm}$ , moc średnia  $P=7\text{W}$ , częstotliwość repetycji impulsów laserowych  $f=60\text{kHz}$ , czas trwania impulsu  $\tau=35\text{ns}$ ). Oprócz lasera innymi ważnymi elementami urządzenia do laserowej mikroobróbki były dwa zwierciadła skanera galwanometrycznego telecentryczna soczewka ogniskująca. Schemat urządzenia przedstawiony jest na rys. 1. Średnica ogniska laserowego na powierzchni obrabianego materiału wynosiła około  $10\ \mu\text{m}$ . Elementy urządzeń MEMS wykonano z folii aluminiowej o grubości  $50\ \mu\text{m}$  i stalowej o grubości  $100\ \mu\text{m}$ .



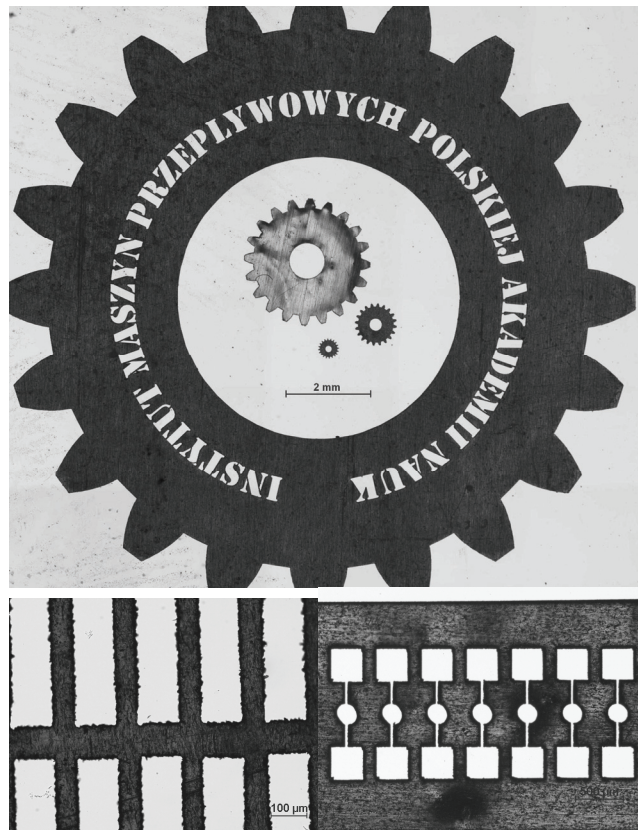
Rys. 1. Schemat urządzenia do laserowej mikroobróbki metodą bezpośredniego naświetlania wiązką laserową. W – wiązka laserowa,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – ruchome zwierciadła skanera galwanometrycznego, f – telecentryczna soczewka ogniskująca, M – obrabiany materiał

Poniżej przedstawiono kilka przykładów elementów urządzeń MEMS wykonanych z folii aluminiowej (o grubości  $50\ \mu\text{m}$ ) za pomocą urządzenia do laserowej mikroobróbki. Rys. 2 przedstawia zdjęcia szablonu z siatką otworów, wykonane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). Szablony takie używane są jako mikrosita w urządzeniach MEMS typu „lab-on-chip”. Otwory szablonu (mające  $200\ \mu\text{m}$  średnicy) wykonane zostały metodą laserowego drążenia trepanacyjnego.



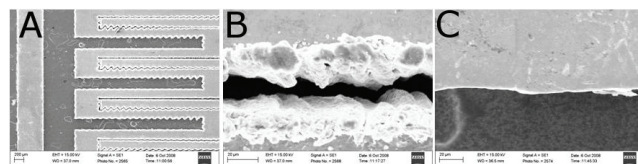
Rys. 2. Zdjęcia SEM szablonu z folii aluminiowej o grubości  $50\ \mu\text{m}$  z siatką otworów o średnicy  $200\ \mu\text{m}$ . Otwory wykonano metodą laserowego drążenia trepanacyjnego

Na rys. 3 przedstawiono przykładowe zdjęcia mikroskopowe innych elementów wykonanych z folii aluminiowej. Takie elementy lub im podobne stosowane są jako części mechaniczne w różnych urządzeniach MEMS (np. jako mikrozębátki lub szablony z mikrokanalami). Należy zauważyć, że czas wykonywania każdego z tych elementów był bardzo krótki (poniżej 1 s). Wykonanie podobnych elementów za pomocą wiązki elektronów trwa znacznie dłużej.



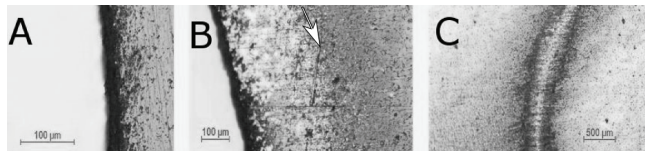
Rys. 3. Przykładowe zdjęcia mikroskopowe elementów urządzeń MEMS wykonanych z folii aluminiowej o grubości  $50\ \mu\text{m}$

Rys. 4A przedstawia fragment mikroelektrody grzebieniowej wykonanej z folii stalowej o grubości  $100\ \mu\text{m}$ . Taka mikroelektroda może być wykorzystana np. jako element mikropompy EHD (elektrohydrodynamicznej) wymuszającej przepływ cieczy w urządzeniu typu „lab-on-chip”. Szerokość pojedynczego grzebienia mikroelektrody wynosi około  $200\ \mu\text{m}$ . Na powiększeniu krawędzi grzebienia (rys. 4B) zauważyć można, że podczas ablacji laserowej nastąpiło wyrzucenie fazy ciekłej, która następnie skondensowała na powierzchni obrabianego materiału. Pozostałości zastygniętej fazy ciekłej udało się jednak usunąć w procesie polerowania elektrochemicznego (rys. 4C).



Rys. 4. A – fragment mikroelektrody grzebieniowej wykonanej z folii stalowej o grubości  $100\ \mu\text{m}$ . B – powiększenie krawędzi cięcia laserowego z widocznymi pozostałościami zastygniętej fazy ciekłej. C – krawędź cięcia laserowego po procesie polerowania elektrochemicznego.

Poza osadzaniem się fazy ciekłej podczas nanosekundowej mikroobróbki laserowej zachodzą także inne niepożądane efekty termiczne degradujące materiał. Jak już wspomniano, najczęściej występującymi efektami są: deformacje, spiekanie i przebarwienie obrabianego materiału (rys. 5B) a także zaspawanie krawędzi cięcia laserowego (rys. 5C). Zjawiska te są szczególnie często obserwowane w przypadku mikroobróbki folii stalowej.



Rys. 5. A – krawędź cięcia laserowego folii stalowej o grubości 100 µm. B – degeneracja obrabianego materiału wokół miejsca mikroobróbki. Na zdjęciu widoczny jest obszar SWC, w którym obrabiany materiał uległ degradacji pod wpływem zbyt dużej gęstości mocy wiązki laserowej (granicę obszaru SWC zaznaczono strzałką). C – zespawane krawędzie cięcia laserowego.

Zazwyczaj dąży się do tego, aby zminimalizować ilość niepożądanych efektów termicznych degradujących materiał, które towarzyszą procesowi nanosekundowej mikroobróbki laserowej. W przypadku mikroobróbki metali minimalizację efektów termicznych (takich jak wyciek fazy ciekłej, spiekanie, deformacje materiału i inne) osiągnąć można poprzez skrócenie czasu trwania impulsu laserowego z przedziału nanosekund do femtosekund. Proces ablacji laserowej wywołany impulsami ultrakrótkimi (z przedziału femtosekund) przebiega inaczej niż opisany powyżej proces ablacji impulsami nanosekundowymi. W przypadku impulsów ultrakrótkich proces absorpcji promieniowania laserowego przez materiał ma charakter quasi-adiabatyczny. Oznacza to, że zaabsorbowana energia nie jest transportowana w głąb materiału podczas trwania impulsu laserowego (jak ma to miejsce w przypadku impulsów nanosekundowych), lecz pozostaje w cienkiej warstwie podpowierzchniowej materiału. Jeśli zaabsorbowana energia jest wystarczająco wysoka (wyższa niż ciepło odparowania) następuje zjawisko ablacji laserowej materiału z warstwy podpowierzchniowej. W przeciwieństwie do ablacji wywołanej impulsami nanosekundowymi w tym przypadku nie obserwuje się przejścia materiału w fazę ciekłą, lecz jego gwałtowną sublimację. W ten sposób, eliminując transport ciepła w głąb materiału unika się degradacji termicznej obrabianego materiału [5].

Dzięki zastosowaniu impulsów femtosekundowych do mikroobróbki materiałów jakość wykonywanych elementów jest dużo lepsza niż w przypadku mikroobróbki impulsami lasera nanosekundowego. Dlatego w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN, we współpracy z Instytutem Chemii Fizycznej PAN, rozpoczęto prace nad projektem, którego efektem ma być powstanie urządzenia laserowego do mikroobróbki materiałów impulsami ultrakrótkimi (projekt badawczy pt. „Urządzenie Laserowe do Femtosekundowej Mikroobróbki Materiałów”). Przewiduje się, że jednym z zastosowań tego urządzenia będzie wykonywanie elementów urządzeń MEMS.

## Podsumowanie

Nanosekundowa mikroobróbka laserowa umożliwia wykonywanie metalowych elementów urządzeń MEMS (takich jak np. zaprezentowane mikrozębatki i mikroelektrody). W porównaniu z technikami mikroobróbki klasycznej mikroobróbka laserowa jest stosunkowo tania i jednocześnie mało skomplikowana. Jednak podczas mikroobróbki nanosekundowej może dojść do uszkodzenia obrabianego materiału w wyniku działania niepożądanych efektów termicznych. Niektóre z tych efektów można usunąć, np. w procesie polerowania elektrochemicznego. Jednak całkowitego lub istotnego wyeliminowania niepożądanych efektów termicznych należy oczekiwać po zastosowaniu impulsów femtosekundowych do laserowego wykonywania mikroelementów do urządzeń MEMS.

## LITERATURA

- [1] Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N., „MEMS mechanical sensors”, Artech House, Inc., Norwood, pp. 11, 2004.
- [2] J. G. Korvink, O. Paul, „MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications”, William Andrew, Inc, Norwich, pp. 805, 2006.
- [3] Webb C., Jones J., „Handbook of laser technology and applications: applications”, Institute of Physics Publishing, Londyn, pp. 1684, 2004.
- [4] Pawlak R., Kostrubiec F., Walczak M., Tomczyk M., „Modelowanie i realizacja laserowych procesów mikrotechnologicznych dla wybranych zastosowań w elektrotechnice i elektronice”, Referaty Sympozjum Techniki Laserowej, vol. 8, pp. 167-178, 2006.
- [5] McGeough J. A., „Micromachining of engineering materials”, Marcel Dekker, Inc., Nowy Jork, pp.203-219, 2002.
- [6] Piqué A., Chrisey D. B., „Direct-write technologies for rapid prototyping applications: sensors”, Academic Press, San Diego, pp. 385, 2002.
- [7] Dahotre N. B., Harimkar S. P., „Laser fabrication and machining of materials”, Springer Science, Nowy Jork, pp. 265, 2008.

## Autorzy:

mgr inż. Mateusz Tański, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: [tanski@imp.gda.pl](mailto:tanski@imp.gda.pl);

mgr inż. Robert Barbucha, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: [brobert@imp.gda.pl](mailto:brobert@imp.gda.pl);

mgr inż. Michał Janke, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: [mjanke@imp.gda.pl](mailto:mjanke@imp.gda.pl);

mgr inż. Katarzyna Garasz, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: [kgarasz@imp.gda.pl](mailto:kgarasz@imp.gda.pl);

dr Marek Kocik, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: [kocik@imp.gda.pl](mailto:kocik@imp.gda.pl);

prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, 1) Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, 2) Akademia Morska, Katedra Elektroniki Morskiej, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: [imiz@imp.gda.pl](mailto:imiz@imp.gda.pl);