

# Zastosowanie laserów włóknowych w elektronice i technice mikrosystemów

## Application of fiber lasers in electronics and in microsystems technology

RYSZARD PAWLAK  
MARIUSZ TOMCZYK  
MARIA WALCZAK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.2.8

Przedstawiono wybrane wyniki zastosowania lasera włóknowego w wytwarzaniu elementów mikrosystemów i biernych elementów elektroniki o submilimetrycznych wymiarach z materiałów półprzewodnikowych, ceramicznych i przewodzących. Technologie laserowe w tej skali wykorzystują ablacyjne oddziaływanie wiązki laserowej. Optymalizowanie procesów w dużej mierze było wspierane modelowaniem komputerowym. Wyniki potwierdzają możliwość precyzyjnej mikroobróbki za pomocą lasera generującego impulsy nanosekundowe.

**SŁOWA KLUCZOWE:** impulsy nanosekundowe, lasery włóknowe, ablacja, krzem, ceramika

*Selected results of the use of fiber laser for producing elements of microsystems and passive electronic elements of submillimeter dimensions in semiconductor, ceramic and conductive materials are presented. Laser technology at this scale uses ablative interaction of laser beam. Optimization of processes was significantly supported by computer modelling. The results confirm the possibility of precise micromachining using a laser with nanosecond pulses.*

**KEYWORDS:** nanosecond pulses, fiber laser, ablation, silicon, ceramics

Lasery technologiczne obróbki i modyfikowania właściwości materiałów wykorzystują szczególne cechy wiązki laserowej – bardzo dużą wartość powierzchniową gęstości mocy, szybkie i prawie punktowe oddziaływanie oraz możliwość precyzyjnego sterowania parametrami. Tradycyjnie technologie laserowe są kojarzone głównie z obróbką elementów konstrukcyjnych maszyn w skali makro (z cięciem, spawaniem, modyfikacją właściwości warstwy wierzchniej czy kształtowaniem wspomaganym laserowo). Rozwój systemów laserowych, które generują ciągi impulsów o czasach trwania rzędu nano-, piko- lub femtosekund, rozszerzył ich zastosowanie w dziedzinie budowy maszyn m.in. o mikrostrukturyzację powierzchni w celu polepszenia właściwości tribologicznych [1]. Mikroobróbka laserowa jest jednak domeną tych obszarów wytwarzania, w których elementarnym i realizowanym w sposób ciągły celem jest miniaturyzacja. Takimi obszarami są elektronika i technika mikrosystemów – dziedziny, które zdecydowały o stopniu współczesnego rozwoju cywilizacji technicznej (także dzięki mikrotechnologiom laserowym).

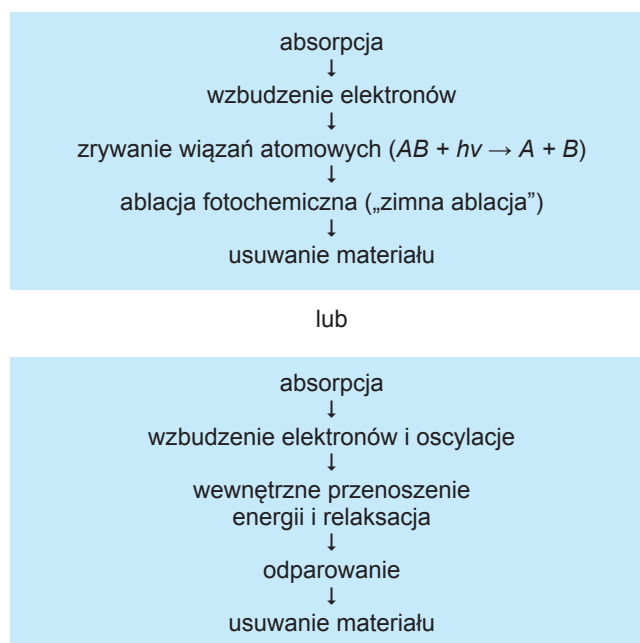
W mikrotechnologjach laserowych wykorzystuje się przede wszystkim ablacyjne oddziaływanie wiązki laserowej. W procesach mikroobróbki ablacyjnej główną rolę odgrywają lasery włóknowe, generujące falę o długości ok. 1064 nm. Opracowano również systemy generujące wiązkę 532 nm, charakteryzujące się większą efektywnością mikroobróbki i mniejszą strefą wpływu ciepła, oraz systemy generujące wiązkę

1500 nm, zapewniające wysoki poziom bezpieczeństwa wzroku [2]. W Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej od kilku lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem lasera włóknowego do mikroobróbki materiałów półprzewodnikowych, ceramicznych i przewodzących, które odgrywają szczególną rolę w branży elektronicznej i technice mikrosystemów. Ogólnym celem tych badań jest uzyskanie odpowiedzi na podstawowe pytania:

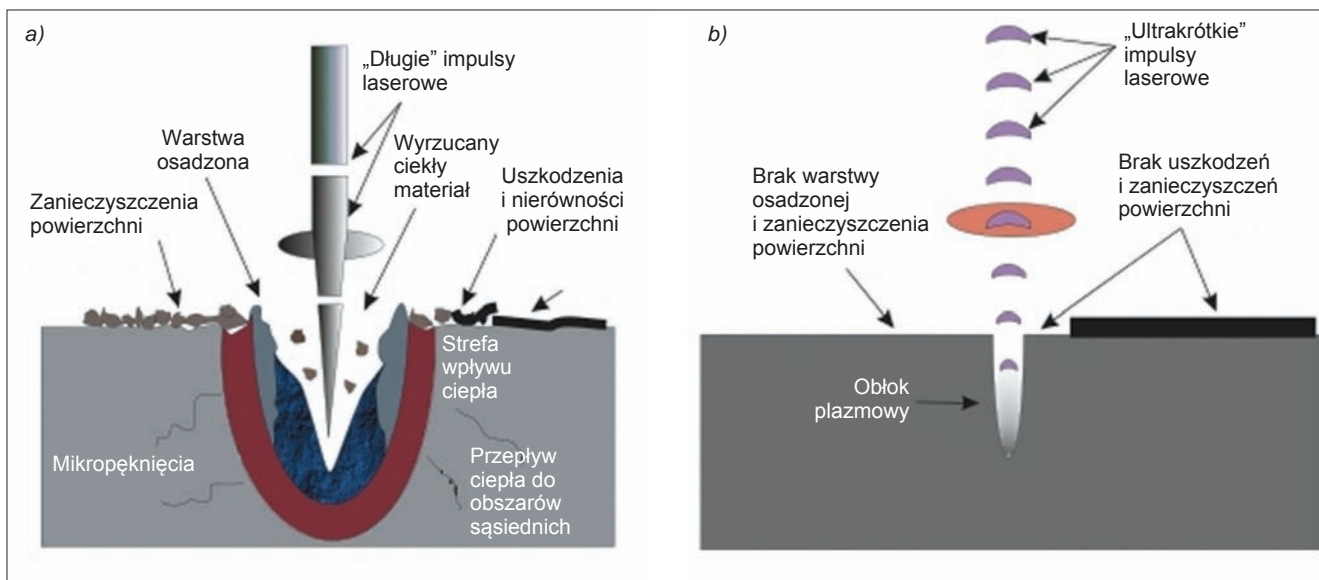
- Jak skutecznym narzędziem w wytwarzaniu elementów mikrosystemów może być laser włóknowy oraz jakie są jego zalety i wady w tego typu zastosowaniach?
- Jaka jest skuteczność procesów wytwarzania z użyciem laserów włóknowych?
- Czy jakość obróbki za pomocą laserów włóknowych jest akceptowalna?
- Czy można efektywnie modelować procesy obróbki laserami włóknowymi w mikroskali – aby ułatwić zrozumienie złożonych zjawisk oraz móc optymalizować tę technologię (pod względem skuteczności i jakości)?

### Ablacja laserowa – podstawy teoretyczne procesu i jego modelowanie

Ablacja jest procesem fragmentacji (usuwania) materiału z powierzchni ciała stałego poprzez przejście do stanu gazowego lub plazmy, z pominięciem stanu ciekłego. Gdy energia wiązki laserowej jest absorbowana w cienkiej warstwie lub małej objętości materiału, ablacja zachodzi według jednego z dwóch ciągów zdarzeń:



\* Dr hab. inż. Ryszard Pawlak prof. PŁ (ryszard.pawlak@p.lodz.pl), dr inż. Mariusz Tomczyk (mariusz.tomczyk@p.lodz.pl), dr inż. Maria Walczak (maria.walczak@p.lodz.pl) – Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, Politechnika Łódzka



Rys. 1. Jakość ablacyjnej obróbki laserowej dla różnych czasów impulsu: a) rzędu mikro- i nanosekund, b) femtosekundowych

Ablacja laserowa zachodzi po przekroczeniu progowej wartości fluencji, która zależy od rodzaju materiału i czasu trwania impulsów laserowych. Fotochemiczne procesy dominują w ablacji materiałów polimerowych, których fluencja progowa (*ablation threshold*) jest stosunkowo mała, podczas gdy w przypadku metali oraz ceramiki – materiałów o znacznie większej fluencji progowej – przeważają procesy fototermiczne.

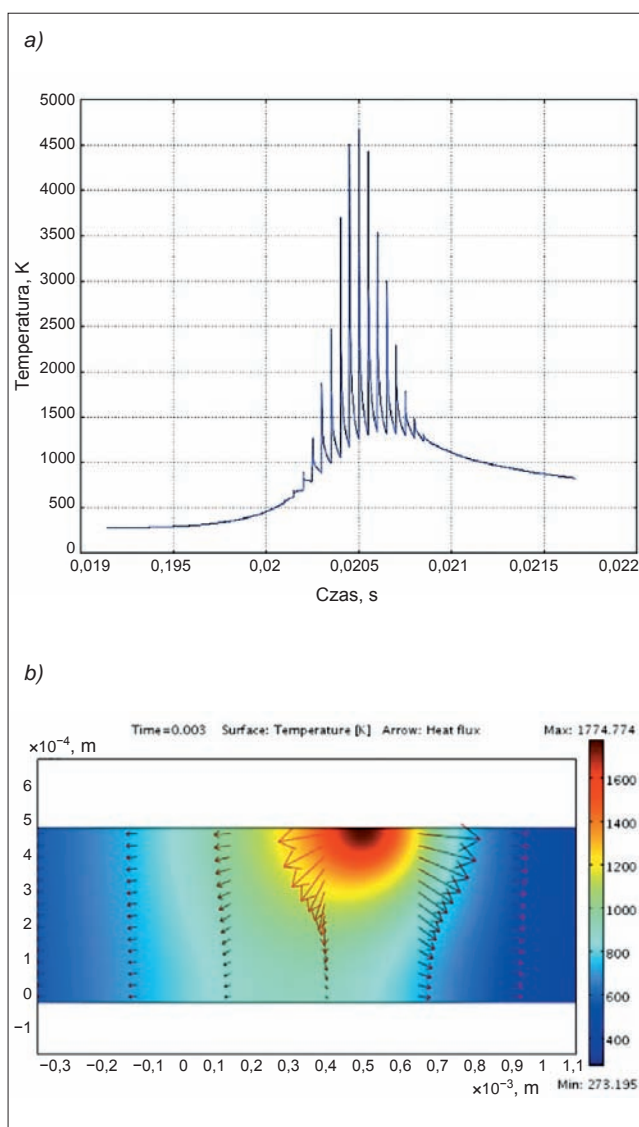
W wielu opracowaniach autorzy wyrażają przekonanie o ścisłym związku pomiędzy jakością obróbki ablacyjnej a czasem trwania impulsów laserowych, co ilustruje rys. 1. Wnioski z niego są jednoznaczne: w celu osiągnięcia dobrej jakości mikroobróbki należy bezwzględnie zastosować impulsy femtosekundowe (rys. 1b). Zastosowanie laserów femtosekundowych nie jest jeszcze powszechne, mimo że ich konstrukcja została znacznie udoskonalona. Te urządzenia wciąż są drogie i mają zbyt złożoną budowę, a zatem niewystarczającą niezawodność. Celowe jest zatem prowadzenie badań z wykorzystaniem znacznie tańszych, niezawodnych laserów włóknowych, generujących impulsy nanosekundowe z zachowaniem bardzo dobrej jakości wiązki.

Przeprowadzone badania obróbki laserem włóknowym impulsami nanosekundowymi wykazały, że ablacja materiału zachodzi zarówno w przypadku ceramiki  $Al_2O_3$ , jak i krzemu. Obserwacje mikroskopowe SEM potwierdziły, że strefa wpływu ciepła praktycznie nie występuje. W strefie obróbki nie pojawiają się pęknięcia i naprężenia cieplne, co powinno mieć korzystny wpływ na jakość i precyzję cięcia lub ablacyjnego usuwania materiału. Na podstawie obserwacji procesu i analizy literatury [3÷5] można stwierdzić, że dominującym mechanizmem w badanej mikroobróbce laserowej jest ablacja laserowa o charakterze fototermicznym. Dzięki temu ślad na powierzchni obrabianej ma średnicę zbliżoną do średnicy wiązki laserowej.

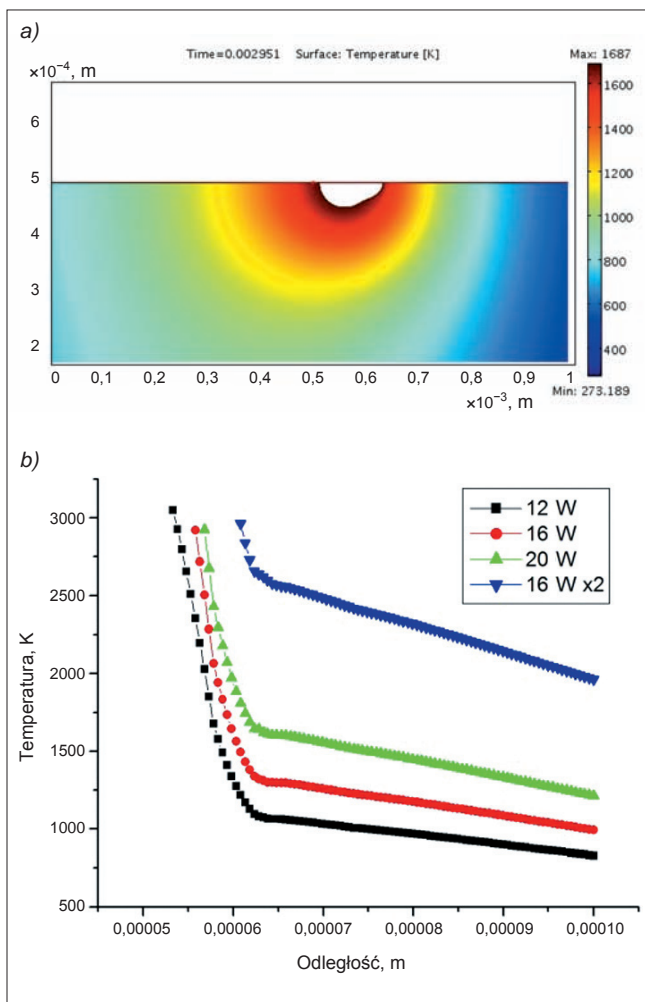
Nanosekundowy czas trwania impulsu umożliwia ablację kongruentną w przypadku materiałów o złożonym składzie. W celu zapewnienia warunków ablacji kongruentnej należy spełnić kryterium objętości określonej wymiarem charakterystycznym (w przybliżeniu równym grubości  $\Delta h$  warstwy ablowanego materiału w trakcie jednego impulsu):

$$l_T \approx 2\sqrt{D_T \cdot \tau_i}$$

gdzie  $\tau_i$  – czas oświetlenia wiązką promieniowania laserowego (czas trwania impulsu),  $D_T$  – dyfuzyjność cieplna materiału.



Rys. 2. Wpływ kolejnych impulsów na nagrzewanie wybranego obszaru materiału Si (czas trwania impulsu 220 ns, częstotliwość powtarzania 35 kHz, średnia moc wiązki 6 W, prędkość skanowania wiązki 200 mm/s): a) rozkład temperatury na powierzchni materiału w danym przedziale czasu, b) rozkład temperatury oraz wektory przepływu ciepła w przekroju poprzecznym



Rys. 3. Wyniki modelowania numerycznego: a) wizualizacja głębokości ablacji określonej na podstawie izotermy parowania, b) głębokość strefy oddziaływania cieplnego

Skład materiału nie zmienia się wtedy pod wpływem kolejnych impulsów, a rozkład przestrzenny cząstek powstałego pióropusza plazmy może być opisany prawem  $\cos^2\varphi$  ( $n > 1$ ), gdzie  $\varphi$  jest kątem między normalną do powierzchni a kierunkiem propagacji składników/związków ablatowanych [6].

Modelowanie termicznej ablacji laserowej wykonano w środowisku obliczeniowym COMSOL 3.5. Jako metodę obliczeń wybrano metodę elementów skończonych oraz klasyczne równania przewodnictwa cieplnego z odpowiednimi warunkami Stefana [7]. Proces topienia i parowania materiału został uwzględniony poprzez zmianę ciepła właściwego materiału w funkcji temperatury [7]. Model obejmował szereg zmiennych parametrów procesu ablacji laserowej, takich jak: prędkość skanowania wiązki (200÷8000 mm/s), czas trwania impulsu laserowego (9÷220 ns), częstotliwość powtarzania impulsów (35÷75 kHz), moc wiązki (0÷20 W). Kształt poszczególnych impulsów odwzorowano wygładzoną funkcją skokową Heaviside'a. W modelu uwzględniono również zmianę parametrów materiałowych w funkcji temperatury oraz zmianę współczynnika absorpcji przy danej długości fali dla różnych materiałów i zmiennej temperatury. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2 i 3.

Wzajemny dobór częstotliwości powtarzania impulsów oraz prędkości skanowania wiązki w danym obszarze powoduje nagrzewanie materiału kilkoma, a nawet kilkudziesięcioma impulsami laserowymi (tzw. *overlapping*). Efekt wieloimpulsowego nagrzewania powierzchni materiału uwidoczniono na rys. 2a. Na podstawie wyników modelowania wyznaczono głębokość ablacji (biały obszar na rys. 3a) oraz głębokość strefy oddziaływania cieplnego (rys. 3b) dla różnych wariantów

procesu ablacji. Wnikanie pola temperaturowego w głąb materiału wskazuje, że maksymalna głębokość strefy przegrzanej nie przekracza kilkudziesięciu mikrometrów.

### Wytwarzanie mikrostruktur krzemowych, ceramicznych i metalicznych

System laserowy [8, 10, 11] wykorzystany do mikroobróbki składał się z jednomodowego lasera włóknowego oraz skanera wiązki. Parametry zastosowanej aparatury zamieszczono w tabl. I.

TABLICA I. Parametry lasera i skanera zastosowanych do mikroobróbki

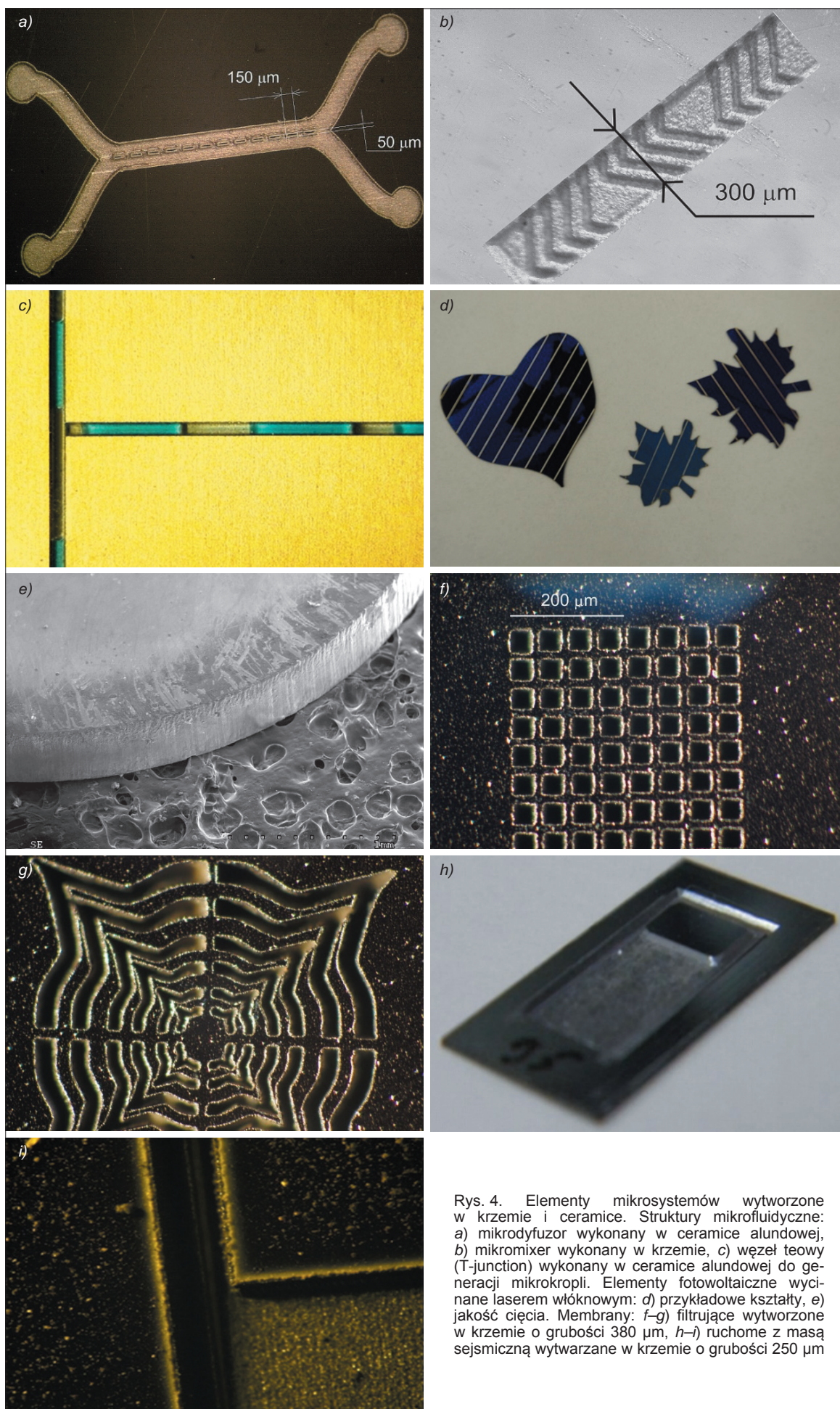
| Laser: redENERGY G3 SM jednomodowy, SPI |                      |
|---|----------------------|
| Długość fali, nm                        | 1062                 |
| Maksymalna moc średnia, W               | 20                   |
| Czas trwania impulsu, ns                | 10÷250               |
| Energia impulsu, mJ                     | ≥ 0,55               |
| Częstotliwość powtarzania impulsów, kHz | 0,001÷1000           |
| Jakość wiązki M <sup>2</sup>            | < 1,3                |
| Skaner: Xtreme (Nutfield Techn. Inc.)   |                      |
| Obiektyw F-theta, ogniskowa, mm         | 100<br>160           |
| Maksymalna prędkość robocza, mm/s       | 6000                 |
| Pole pracy, mm                          | 70 × 70<br>120 × 120 |
| Oprogramowanie                          | SB-1P Waverunner     |

Grupa mikrosystemów obejmuje m.in. mikrofluidykę (technologie mikrocieczowe), mikrochipy, mikroreaktory, sensory, lab-on chip (LOC),  $\mu$ -TAS. Elementy 3D mikrosystemów są wytwarzane z krzemu, ze szkła, z polimerów i ceramiki. W przypadku krzemu podstawowymi technologiami są trawienie mokre i trawienie plazmowe, rozwinięte na potrzeby mikroelektroniki [8]. Trawienie mokre zapewnia wysoką jakość struktur i jest realizowane jako proces wsadowy, jednakże wymaga maskowania (często wielokrotnego), a jego skuteczność zależy od orientacji krystalograficznej krzemu. Wśród różnych innych technik stosowanych w mikroobróbce elementów mikrosystemów rozwinięto także kilka technologii laserowych ubytkowych i przyrostowych, takich jak: bezpośrednia mikroobróbka laserowa BML (struktury 2,5D do 3D), laserowa mikrostereolitografia (LMS) i bezpośrednie laserowe interferencyjne odwzorowywanie (DLIP). Wszystkie wymienione techniki są stosowane do mikroobróbki materiałów ceramicznych, podczas gdy do obróbki krzemu wykorzystuje się tylko BLM. Na rys. 4÷6 przedstawiono wybrane przykłady ablacyjnej mikroobróbki laserowej zrealizowanej przez autorów artykułu.

Na rys. 4 pokazano efekty mikroobróbki elementów krzemowych i ceramicznych laserem włóknowym. Ocenę jakości odwzorowania geometrii zaprojektowanych struktur mikrofluidycznych zawarto w [8, 10].

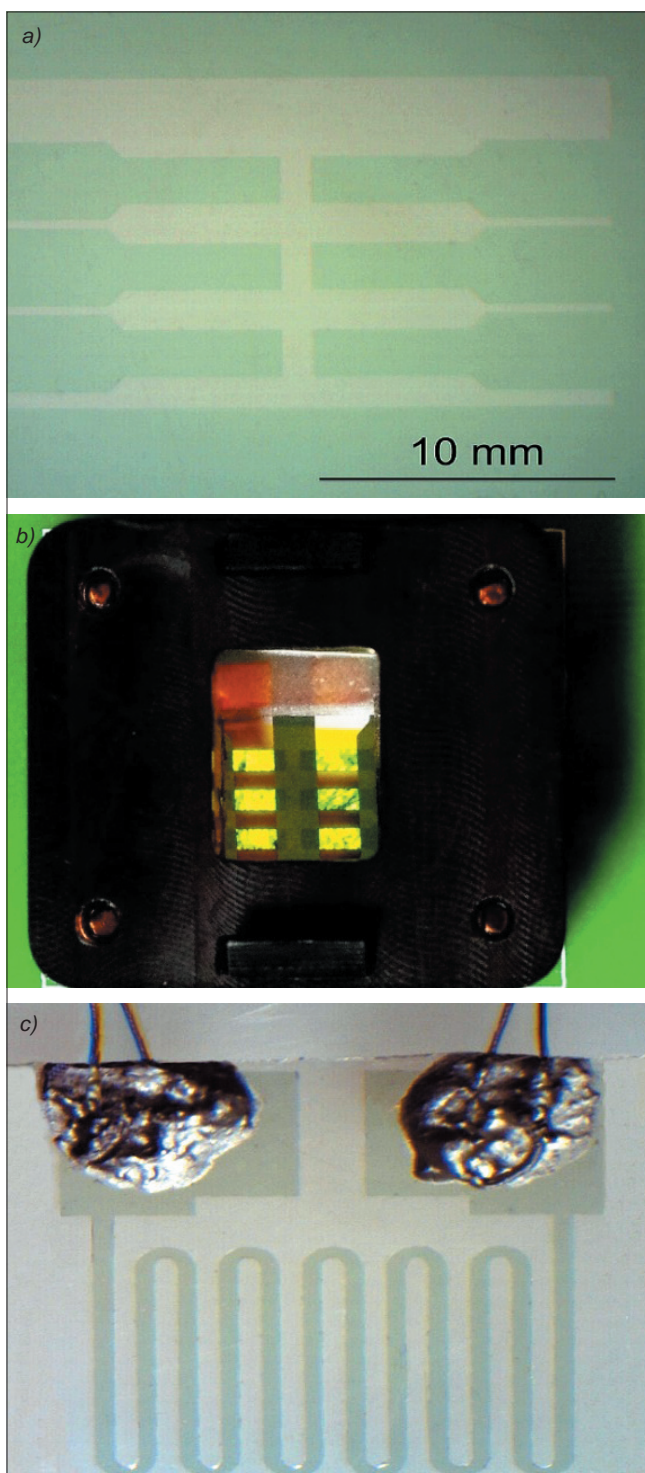
Mikroelementy przewodzące wytwarzano w cienkich warstwach przewodzących o grubości rzędu 100 lub kilkuset nanometrów na podłożach dielektrycznych (z ITO, AgHT, grafenu – rys. 5). Takie elementy przewodzące są stosowane w technice sensorowej czy elektronice elastycznej. Ablacyjne kształtowanie geometrii elementu pozwala na rezygnację z procesów maskowania lub innych złożonych technik. Wykorzystanie laserowej mikroobróbki ablacyjnej do wytwarzania miniaturowych topików bezpiecznikowych wycinanych w folii Ag o grubości 35  $\mu$ m pokazano na rys. 6.





Rys. 4. Elementy mikrosystemów wytworzone w krzemie i ceramice. Struktury mikrofluidyczne: a) mikrodyfuzor wykonany w ceramice alundowej, b) mikromixer wykonany w krzemie, c) węzeł teowy (T-junction) wykonany w ceramice alundowej do generacji mikrokropli. Elementy fotowoltaiczne wycinane laserem włóknowym: d) przykładowe kształty, e) jakość cięcia. Membrany: f-g) filtrujące wytworzone w krzemie o grubości 380 μm, h-i) ruchome z masą sejsmiczną wytwarzane w krzemie o grubości 250 μm

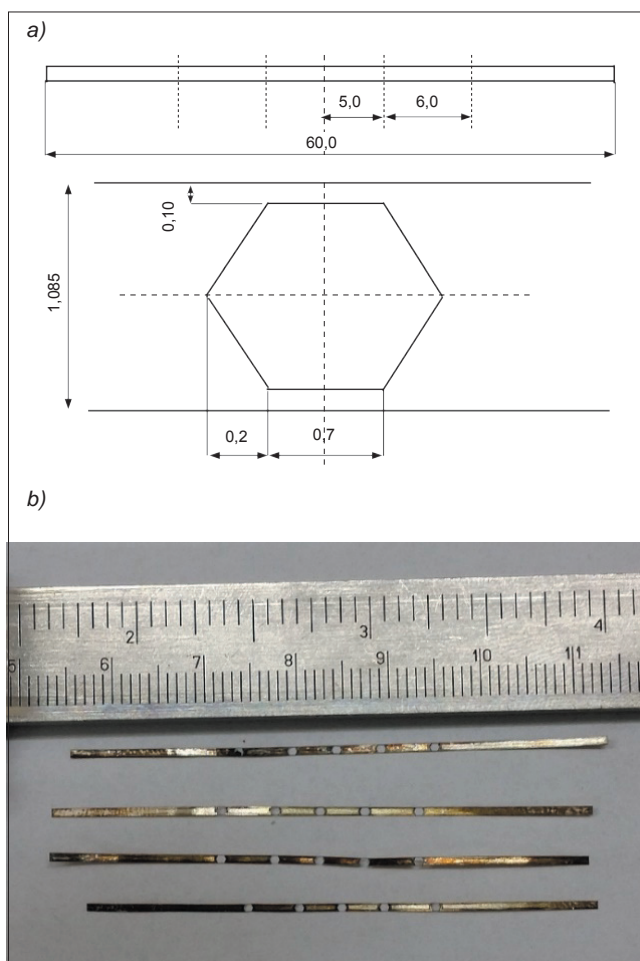




Rys. 5. Cienkowarstwowe elementy przewodzące [7]: a) elektrody w warstwie ITO na podłożu dielektrycznym do wytwarzania organicznych diod elektroluminescencyjnych (OLED), b) struktury OLED (emitujące światło żółte) wykonane na systemie elektrod pokazanych na a), c) termorezystor do pomiarów kriogenicznych, wykonany w cienkiej warstwie AgHT

## Podsumowanie

Ablacyjna mikroobróbka laserowa impulsami nanosekundowymi lasera włóknowego pozwala na wytwarzanie elementów mikrosystemów ceramicznych i krzemowych. Elementy te cechuje dobra jakość odwzorowania kształtów geometrycznych i wymiarów – wystarczająca w przypadku wielu zastosowań. Ważną rolę w optymalizacji procesu mikroobróbki laserowej odgrywa modelowanie komputerowe. Wyniki zastosowania modelu termicznego do ablacyjnego procesu usuwania materiału są dobrze skorelowane z rezultatami badań doświadczalnych.



Rys. 6. Miniaturowe topiki bezpiecznikowe wycinane w folii Ag: a) projekt topika (wymiarów w mm), b) topiki wycięte laserem włóknowym

## LITERATURA

- Antoszewski B., Sęk P. "Laser surface texturing: Chosen problems". *Proceedings of SPIE*. Vol. 8703 (2013) 87030H.
- www.ipgphotonics.com
- Steen W.M., Mazumder J. "Laser Material Processing". London: Springer, 2010.
- Chichkov B.N., Momma C., Nolte S., von Alvensleben F., Tünnermann A. "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids". *Journal of Applied Physics*. A 63 (1996): pp. 109÷115.
- Gusarov A.V., Smurov I. "Thermal model of nanosecond pulsed laser radiation: Analysis of energy and mass transfer". *Journal of Applied Physics*. Vol. 97, Iss. 1 (2005) 014307.
- Bäuerle D., Luk'yanchuk B., Schwab P., Wang X.Z., Arenholtz E. "Laser ablation: Fundamentals and recent developments". *Laser Ablation of Electronic Materials: Basic Mechanisms and Applications*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher B.V., 1992.
- Pawlak R., Tomczyk M., Walczak M. "Ablation of selected conducting layers by fiber laser". *Proceedings of SPIE*. Vol. 9291 (2014), 92910P-1.
- Tomczyk M., Walczak M., Sęk P. "Laser technologies in microsystems". *Advanced Materials Research*. Vol. 874 (2014): pp. 119÷124.
- Dziuban J.A. „Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo-szklanych w technice mikrosystemów”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- Pawlak R., Tomczyk M., Walczak M., Domagalski P. "Semiconductor and Ceramic Microstructure Made by Single Mode Fiber Laser". *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 494, Iss. 1 (2014) 012015.
- Pawlak R., Kawczyński R., Korzeniwska E., Lebioda M., Rosowski A., Rymaszeński J., Sibiński M., Tomczyk M., Walczak M. „Ogniwa fotowoltaiczne o niekonwencjonalnych kształtach”, *Przegląd Elektrotechniczny*. Nr 7 (2013): s. 288÷292. ■