

Urządzenie laserowe do mikroobróbki folii metalowych

mgr inż. ROBERT BARBUCHA¹, dr inż. MAREK KOCIK¹, mgr inż. MATEUSZ TAŃSKI¹,
prof. dr hab. inż. JERZY MIZERACZYK^{1,2}

¹ Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, Instytut Maszyn Przepływowych, Gdańsk

² Akademia Morska, Wydział Elektryczny, Gdynia

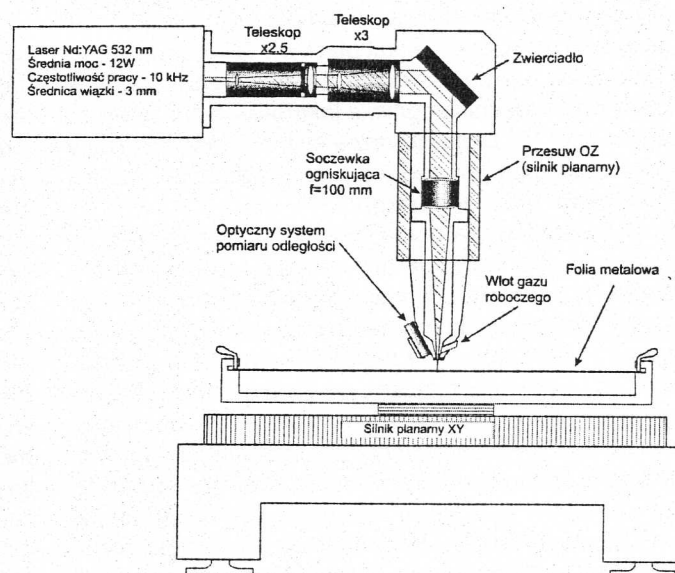
W Polsce działa kilkadziesiąt małych przedsiębiorstw zajmujących się wytwarzaniem płytek drukowanych metodą montażu powierzchniowego (technologia SMT - *Surface Mounted Technology*). W przedsiębiorstwach tych szablony do nakładania pasty lutowniczej są wytwarzane za pomocą trawienia chemicznego. Metoda ta ma kilka wad. Najważniejsze z nich jest to, że szablony są niskiej jakości. Poza tym, za pomocą trawienia chemicznego nie można wytwarzać szablonów do produkcji płytek w tzw. technologii „*high density*”, w której rozmiary wycinanych padów (pojedynczych otworów w szablonie do nakładania pasty lutowniczej) są mniejsze niż 100 μm . Mimo tych wad, trawienie chemiczne wciąż pozostaje podstawową techniką produkcji szablonów, ponieważ urządzenia do wycinania szablonów za pomocą urządzeń laserowych są bardzo drogie. Pomimo że na rynku pojawiły się lasery Nd:YAG nowej generacji w cenie od 50 - 60 tys. euro, to proces wycinania szablonów jest na tyle skomplikowany, że najprostsze urządzenie laserowe mogące służyć do ich wycinania kosztuje około 0,5 mln euro. Małe lub średnie przedsiębiorstwo w Polsce nie może sobie pozwolić na zakup tak drogiego urządzenia laserowego.

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie laserowego urządzenia do mikroobróbki materiałów (ULMM) zbudowanego głównie z polskich komponentów. Urządzenie to jest przystosowane przede wszystkim do wykonywania szablonów do nakładania pasty lutowniczej w procesie montażu powierzchniowego elementów elektronicznych na płytkach drukowanych [1]. Najczęściej stosuje się szablony z folii stalowej, niklowej lub mosiężnej o grubości 80 - 200 μm [2]. Możliwości tego urządzenia nie ograniczają się do wykonywania szablonów. Urządzenie w zasadzie nadaje się do wykonywania wszystkich procesów mikrocięcia i mikrodrążenia materiałów.

Konstrukcja urządzenia

Urządzenie składa się z nowoczesnego impulsowego lasera Nd:YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$) pompowanego diodami, układu transmitującego i ogniskującego wiązkę laserową w obszarze roboczym, stołu planarnego XY, oprogramowania kontrolującego pracę urządzenia oraz układów pomocniczych (rys. 1). Konstrukcja urządzenia jest modułowa, tzn. każdy podzespół urządzenia może być łatwo zmodyfikowany lub wymieniony na inny o parametrach dostosowanych do konkretnego zastosowania. W prezentowanej wersji urządzenie jest dostosowane do cięcia folii metalowych, a w szczególności do wykonywania szablonów do nakładania pasty lutowniczej w procesie wytwarzania płytek drukowanych metodą montażu powierzchniowego. Poniżej omówione zostały szczegółowo poszczególne moduły urządzenia.

W latach 1990 - 2000 mikroobróbka laserowa bazowała na impulsowych laserach miedziowych [3]. Parametry lasera miedziowego, tj. promieniowanie widzialne $\lambda = 510,6 \text{ nm}$ i $\lambda = 578,2 \text{ nm}$, średnia moc - 10...50 W, częstotliwość powtarzania impulsów - 20 kHz, wysoka jakość wiązki laserowej - 1,5 x granica dyfrakcyjna, predysponowały ten laser do mi-



Rys. 1. Konstrukcja urządzenia do laserowej mikroobróbki materiałów ULMM

Fig. 1. Design of device for laser micromachining of the materials ULMM

kroobróbki laserowej. Niestety z powodu kłopotów technologicznych (krótki czas życia lasera, wysoka temperatura pracy, niestabilność generacji impulsów laserowych, „pływanie” osi wiązki laserowej) urządzenia laserowe do mikroobróbki bazujące na laserze miedziowym nie znalazły uznania przemysłu. Fakt ten dostrzegły firmy produkujące lasery i około 2000 roku ukazały się impulsowe lasery Nd:YAG z podwójną przemianą częstotliwości ($\lambda = 532 \text{ nm}$) o parametrach wiązki zbliżonych do laserów miedziowych. Ta nowa generacja laserów Nd:YAG zrewolucjonizowała technologię urządzeń do mikroobróbki laserowej, głównie dzięki małym wymiarom, niskiej temperaturze pracy i długiemu czasowi ich życia. Obecnie istnieje kilka firm na świecie oferujących lasery Nd:YAG ($\lambda = 532 \text{ nm}$) z przeznaczeniem do mikroobróbki. Lasery te są jednak bardzo drogie i dlatego podjęta została przez autorów próba skonstruowania pierwszego polskiego lasera do mikroobróbki materiałów. Zastosowanie polskiego lasera w urządzeniu do laserowej mikroobróbki materiałów pozwoliłoby na znaczne obniżenie jego ceny, która często jest kluczowym czynnikiem decydującym o sukcesie rynkowym produktu na rynku polskim.

Laser, który może znaleźć zastosowanie w precyzyjnej obróbce materiałów, musi emitować wiązkę dającą się zogniskować do średnicy kilku mikrometrów. Wymóg małej średnicy wiązki laserowej wynika z dwóch powodów. Po pierwsze, determinuje ona minimalną szerokość ścieżki cięcia lub średnicę drążonego otworu. Po drugie, mała średnica ogniska laserowego pozwala osiągnąć duże gęstości mocy w miejscu mikroobróbki laserowej, co prowadzi do ablacji materiału i zminimalizowania niekorzystnych zjawisk termicznych w obrabianym materiale.

Minimalny rozmiar ϕ wiązki laserowej o średnicy D po zogniskowaniu jej soczewką o ogniskowej f jest ograniczony dyfrakcją i wynosi:

$$\phi = 2,44\lambda \frac{f}{D}$$

Jak wynika z równania, średnica ogniska jest tym mniejsza, im mniejsze są długość fali λ emitowanej przez laser i ogniskowa soczewki skupiającej oraz im większa jest średnica wiązki laserowej padającej na soczewkę.

Wyrażenie (1) określa minimalną średnicę ogniska wiązki laserowej (tzw. granicę dyfrakcyjną - *diffraction limit*) przy założeniu, że wiązka laserowa jest równoległa (czyli czoło fali wiązki laserowej na soczewce jest płaskie). W rzeczywistości jednak wszystkie wiązki laserowe są rozbieżne, wskutek czego rzeczywista średnica ogniska laserowego jest większa niż podaje to wzór (1). Dlatego ważne jest, aby laser używany do mikroobróbki miał jak najmniejszą rozbieżność wiązki (w praktyce około 100 - 200 μ rad).

Długość fali emitowanej przez laser ma wpływ nie tylko na rozmiar ogniska, ale decyduje też o rodzaju oddziaływania wiązki laserowej z obrabianym materiałem. Wynika to z innego mechanizmu oddziaływania promieniowania ultrafioletowego, widzialnego i podczerwonego z materiałem. Przykładem jest cięcie za pomocą lasera generującego promieniowanie podczerwone obrabiany materiał musi najpierw się podgrzać, wtedy wzrasta absorpcja promieniowania podczerwonego i możliwe staje odparowanie obrabianego materiału, czyli np. usunięcie materiału w postaci ścieżki cięcia. W tym przypadku tzw. strefa oddziaływania ciepła (HAZ - *Heat Affected Zone*) dostarczonego przez wiązkę laserową do obrabianego materiału jest duża i brzegi cięcia są stosunkowo mocno zniekształcone. Natomiast w przypadku cięcia widzialną wiązką laserową absorpcja promieniowania laserowego jest duża i następuje szybkie odparowanie obrabianego materiału bez zniekształcania brzegów cięcia. Poprzez zastosowanie lasera impulsowego (czas impulsu do 100 ns) o bardzo dużej mocy szczytowej impulsu (kilka GW) możliwe jest osiągnięcie tak dużej gęstości energii w miejscu mikroobróbki, że zachodzi ablacja materiału, co także zmniejsza zniekształcenia termiczne materiału.

Z powyższych rozważań wynika, że pod wieloma względami optymalnym rozwiązaniem w laserowej mikroobróbce materiałów jest zastosowanie 10 W (moc średnia) impulsowego lasera UV o jak najkrótszym impulsie (także w zakresie pikosekund) i dużej częstotliwości powtarzania impulsów (kilkadziesiąt kHz). Jednak cena takiego lasera wielokrotnie przekracza założenia budżetowe taniego urządzenia do mikroobróbki materiałów. Dlatego zamiast drogiego urządzenia UV, zdecydowano się na użycie lasera impulsowego Nd:YAG z podwajaniem częstotliwości, emitującego wiązkę widzialną ($\lambda = 532$ nm), która jest dobrze absorbowana przez metale i ceramikę.

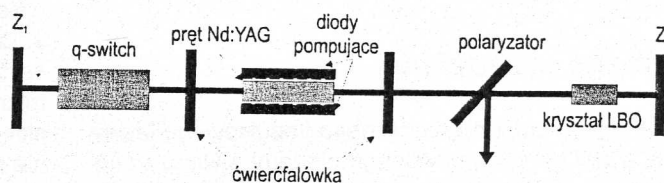
Na podstawie przytoczonych rozważań i wieloletnich doświadczeń w laserowej mikroobróbce z użyciem impulsowych laserów miedziowych ($\lambda = 510,6$ nm) założono, że laser do mikroobróbki materiałów powinien mieć następujące parametry:

- długość fali 532 nm,
- średnią moc wyjściową 10 - 15 W,
- czas trwania impulsu 5 - 100 ns,
- częstotliwość powtarzania impulsów 2 - 20 kHz,
- rozbieżność wiązki laserowej mniejszą od 200 μ rad.

Każdy z tych parametrów jest stosunkowo łatwo osiągnąć indywidualnie i od lat są oferowane lasery Nd:YAG spełniające jeden lub parę z powyższych warunków. Jednak skonstruowanie lasera spełniającego wszystkie ww. warunki okazuje się dość trudne. Jedynie kilka firm na świecie oferuje lasery

o zbliżonych parametrach, jednakże zastosowane rozwiązania techniczne są okryte tajemnicą. Dlatego autorzy zostali zmuszeni do przetestowania różnych konfiguracji głowicy laserowej, zanim ostatecznie podjęto decyzję o wyborze docelowej konfiguracji. W efekcie powstał laser Nd:YAG, ($\lambda = 532$ nm) pompowany diodami o parametrach założonych w projekcie.

Schemat rezonatora lasera Nd:YAG, ($\lambda = 532$ nm) przedstawia rys. 2. Stabilny rezonator konfokalny zbudowano na bazie dwóch zwierciadeł Z_1 i Z_2 o różnych promieniach krzywizny ($R_1 = 500$ oraz $R_2 = 1500$) i współczynniku odbicia HR@1064 nm. Odległości pomiędzy pręt Nd:YAG a zwierciadłami dopasowane są do termoogniskowania wiązki w przecie laserowym. Efekt ten jest także ściśle powiązany z absorpcją promieniowania pompujących diod laserowych. Ze względu na istotną zależność termoogniskowania od energii promieniowania pompującego, a więc od prądu diod pompujących, układ optyczny ma optymalne parametry tylko dla wartości prądu diod pompujących. Warunek ten jednak nie jest „ostry” i pozwala uzyskać jednorodną pracę lasera w pewnym zakresie zmian prądu diod pompujących. W rezonatorze zastosowano dwie płytki ćwierćfalowe, pomagające wymusić generację jednorodną promieniowania. Dzięki zastosowaniu polaryzatora wymuszającego generację wiązki o polaryzacji liniowej oraz płytek ćwierćfalowych, uzyskany został wysoki stopień polaryzacji wiązki > 1:100. Dodatkowo, w celu minimalizacji liczby elementów optycznych znajdujących się w rezonatorze, na polaryzator nałożono warstwę HR@532. Warstwa ta powoduje, że polaryzator pełni również rolę płytki światło dzielącej, wydzielając wiązkę $\lambda = 532$ nm. Do modulacji dobroci rezonatora użyto aktywnego q-switcha akusto-optycznego, umieszczonego po przeciwnej stronie rezonatora niż kryształ LBO. Kryształ LBO służy do wytwarzania drugiej harmonicznej promieniowania $\lambda = 1064$ nm generowanego przez pręt Nd:YAG. W celu minimalizacji gabarytów głowicy laserowej, rezonator został dwukrotnie złamany w kształt litery Z. Proces wytwarzania drugiej harmonicznej w kryształ LBO jest poważnym źródłem strat w rezonatorze laserowym. Wiązka $\lambda = 532$ nm jest wyprowadzana z rezonatora poprzez płytkę światłodzielną (polaryzator).



Rys. 2. Schemat rezonatora lasera Nd:YAG w urządzeniu ULMM
Fig. 2. Design of resonator of Nd:YAG laser used in ULMM

Do pompowania pręta Nd:YAG użyto komory pompującej zbudowanej z dookoła ustawionych zestawów diod laserowych o emisji dopasowanej do absorpcji pręta Nd:YAG ($\lambda = 808$ nm). Ze względu na wymóg generacji w jednym modzie poprzecznym zastosowano pręt z niskim domieszkowaniem Nd na poziomie 0,6% oraz z niedomieszkowanymi zakończeniami w celu minimalizacji efektu termosoczewkowania.

Jak wspomniano, generację drugiej harmonicznej realizowano w kryształ LBO, pracującym w warunkach NCPM (non critical phase matching) w temperaturze 147°C. Ten reżim pracy zapewnia stosunkowo niewielką wrażliwość

sprawności przetwarzania na zmiany kąta ustawienia kryształu. Jest to dość istotne, ponieważ drobne rozjustowanie w warunkach użytkowych nie pogarsza sprawności przetwarzania. Wysoka graniczna wartość dopuszczalnej gęstości mocy promieniowania dla zastosowanego kryształu LBO ($> 18 \text{ GW/cm}^2/1064 \text{ nm damage threshold}$) zapewnia dobrą i stabilną pracę kryształu w warunkach generacji impulsów o bardzo wysokiej mocy szczytowej w reżimie pracy z modulacją dobroci rezonatora.

Pomiary wiązki emitowanej przez skonstruowany laser są następujące:

- długość fali 532 nm,
- średnia moc emitowana 12 W,
- czas trwania impulsu 80 ns,
- częstotliwość powtarzania impulsów 5 - 15 kHz,
- rozbieżność wiązki laserowej mniejsza od 200 μrad .

Możliwości urządzenia i przykłady zastosowań

W prezentowanej wersji urządzenie laserowe do mikroobróbki materiałów pozwala na:

- cięcie folii metalowych (miedź, stal, brąz, aluminium) o grubościach do 200 μm z prędkością 2 cm/s,
- strukturyzację powierzchni metalowych,
- cięcie i strukturyzację ceramiki i grafitu,
- cięcie drutów,
- drażnienie i trepanowanie otworów,
- grawerowanie.

Wszystkie te prace mogą się wykonywać z dokładnością do 20 μm .

Aktualnie głównym zastosowaniem urządzenia jest wykonywanie szablonów do nanoszenia pasty lutowniczej w procesie wytwarzania płytek drukowanych metodą montażu powierzchniowego. Przydatność urządzenia do tej aplikacji została sprawdzona we współpracy z firmą Techno-Service z Gdańska, która od lat zajmuje się wytwarzaniem płytek drukowanych.

Inne zastosowania urządzenia to np.:

- korekcja rezystorów cienko i grubowarstwowych,
- siatki grafitowe w tyrystorach,
- strukturyzacja powierzchni implantów,
- wykonywanie masek kalibracyjnych do kamer termowizyjnych,
- wykonywanie stentów wyżywanych w kardiochirurgii,

- wykonywanie macierzy identycznych struktur (np. wafer-bumps) do produkcji kuleczek lutowniczych stosowanych w procesie SMT,
- wykonywanie precyzyjnych metalowych siatek stosowane w produkcji paneli LCD.

Podsumowanie

Prezentowane urządzenie do mikroobróbki laserowej ULMM charakteryzuje się wysoką precyzją i jakością obróbki materiałów. W chwili obecnej zostało ono przystosowane do wykonywania metalowych szablonów stosowanych w technologii montażu powierzchniowego (SMT). Szablony wykonane za pomocą tego urządzenia charakteryzują się większą precyzją wykonania, niż szablony wykonane tradycyjną metodą chemiczną. Jednocześnie koszt wykonania szablonu za pomocą urządzenia ULMM jest niższy niż przy pomocy elektroformowania, a porównywalny z kosztem wykonania szablonów metodą chemiczną. Urządzenie do laserowej mikroobróbki materiałów pozwala na pełną kontrolę procesu cięcia i drażnienia przez:

- kontrolę parametrów wiązki laserowej,
- kontrolę rozmiaru ogniska laserowego,
- zaawansowane algorytmy przesuwania ogniska laserowego wzdłuż ścieżki cięcia,
- kontrolę położenia ogniska laserowego względem obrabianego materiału oraz kontrolę prędkości procesu cięcia lub drażnienia.

Na zakończenie warto zaznaczyć, że udało się osiągnąć podstawowy cel, jakim było zbudowanie urządzenia do laserowej mikroobróbki materiałów, które byłoby dostępne cenowo dla małych i średnich polskich przedsiębiorstw. Szacunkowa cena prezentowanego urządzenia to 500 tys. PLN (w wersji dostępnej komercyjnie), czyli kilkakrotnie mniej niż porównywalne urządzenie obecnie dostępne na rynku.

Urządzenie zostało wykonane w ramach Projektu Rozwojowego MNiI nr R02 021 01.

Literatura

- [1] Hackiewicz H.: Metalowe szablony do montażu powierzchniowego. *Elektronika*, 12, 1999, s. 37.
- [2] Coleman W. E.: Metal stencils for adhesive printing. *Global SMT & Packaging*, vol. 2, no. 1, 2002, ss. 27-30.
- [3] Kocik M. I in.: CuBr laser system for precision processing of the materials. *Proc. SPIE (USA) vol. 4397, Lasers, Physics and Applications*, Eds.: P. A. Atanasov, S. Cartaleva, 2000, s357.