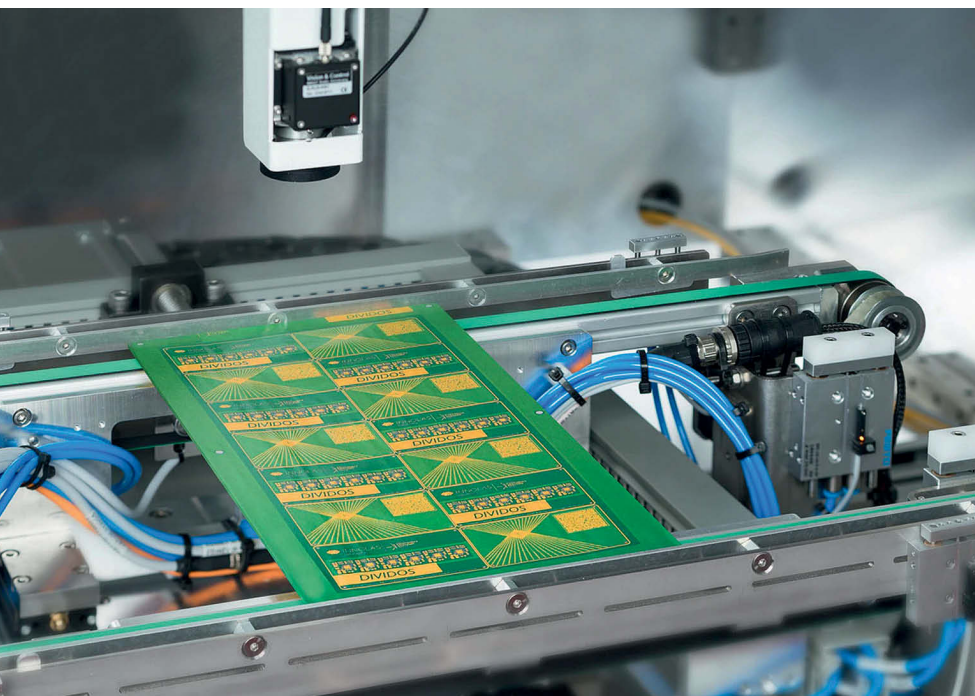


Technika cięcia laserowego w procesie separacji płytek drukowanych

Zastosowanie nowoczesnych systemów laserowych do depanelizacji płytek drukowanych, w porównaniu z tradycyjnymi metodami obróbki mechanicznej może stanowić poważne wyzwanie dla każdego inżyniera procesu produkcji. Właściwe zrozumienie interakcji pomiędzy wiązką laserową, a materiałem podłoża jest niezbędne, aby wybrać i zastosować właściwą technologię separacji płytek drukowanych gwarantującą najwyższą jakość obróbki.



Tendencja ciągłej miniaturyzacji elementów elektronicznych i obwodów drukowanych stawia nowe wyzwania procesom produkcyjnym. Producenci obwodów drukowanych na ogół nie wytwarzają obecnie pojedynczych płytek o małej powierzchni. Ze względu na automatyzację i powtarzalność procesów korzystają z formatki o standardowych rozmiarach. Ta sama zasada obowiązuje przy montażu obwodów elektronicznych. Grupowanie pojedynczych płytek drukowanych w formie matrycy na formacie zmniejsza liczbę operacji montażowych i umożliwia wzrost wydajności produkcji. W koń-

cowym etapie każdy niezależny obwód drukowany na formacie poddawany jest separacji. Mechaniczne metody oddzielania obwodów drukowanych, wykorzystujące frezarki, wykrojniki czy separatory typu pizza cutter, są powszechnie stosowane wyłącznie przy obróbce laminatów sztywnych. Mechaniczna obróbka, jak każda technika, posiada pewne ograniczenia. Przede wszystkim może prowadzić do deformacji krawędzi, a także do delaminacji podłoża. Szybko obracające się frezy czy ostrza wytwarzają tarcie na styku narzędzie-materiał. W przypadku zbyt gwałtownego lub nierównego prowadzenia narzędzia lub po-

prostu pod wpływem zużywania się narzędzi, krawędzie skrawające mogą wykruszać obrabiany materiał lub odrywać jego zewnętrzne warstwy. Odsłonięte lub uszkodzone warstwy mogą narażać płytkę na działanie wilgoci, agresywnych płynów oraz innych czynników zewnętrznych, które spowodują pogorszenie jakości. Dodatkowo produkują one dużo zanieczyszczeń, które trzeba potem usuwać. Jest to szczególnie ważne w przypadku płytek zawierających elementy optyczne, czujniki lub złącza. W przypadku wykrawania konieczne jest utrzymywanie stale naostrzonych stempli, tak żeby nie dopuścić do zginięcia odcinanego materiału. Występujące w trakcie obróbki mechanicznej naprężenia ściskające i zginające na krawędziach płytki mogą prowadzić do groźnych, bo czasami trudnych do zidentyfikowania, mikropęknięć spoiwa jak i uszkodzeń elementów, powodując zmniejszenie niezawodności. W celu ograniczenia wpływu obróbki mechanicznej na jakość obwodów drukowanych elementy umieszczane są w pewnej odległości od krawędzi, co zwiększa rozmiary płytek drukowanych.

W przypadku laminatów elastycznych (flex), półelastycznych (semi-flex) czy sztywno-elastycznych (rigid-flex), zawierających w swojej konstrukcji polimid i/lub włókno szklane spajane żywicą epoksydową o grubości poniżej 200 µm, konieczne jest wykorzystanie innych, alternatywnych metod separacji. Nowoczesnym rozwiązaniem są urządzenia wykorzystujące lasery w zakresie światła widzialnego, ultrafioletu

lub podczerwieni. W przeciwieństwie do tradycyjnych technik cięcia, promieniowanie laserowe nie wywiera mechanicznego nacisku na obrabiany materiał, a precyzja cięcia pozwala na rozdzielanie znacznie mniejszych płytek PCB.

Wybór lasera

Firma Semicon w ramach realizowanego projektu „Innowacyjne technologie montażu elementów na elastycznych podłożach flex dla aplikacji krytycznych, Internetu Rzeczy i Przemysłu 4.0” od ponad roku prowadzi badania nad wdrożeniem i zastosowaniem technologii cięcia laserowego w procesie depanelizacji płytek drukowanych. Prowadzone prace skupiają się głównie na wykorzystaniu unikalnego urządzenia ASYS Divisio 8100 wyposażonego w laser zielony o $\lambda = 532$ nm i ocenie jakości cięcia w porównaniu do wyników depanelizacji metodami mechanicznymi.

Wybór rodzaju lasera do procesu technologicznego uzależniony jest przede wszystkim od właściwości i grubości obrabianego materiału, wymaganej mocy lasera, średnicy wiązki laserowej oraz wydajności procesu, która będzie wpływać na koszty wdrażanej technologii. Urządzenia laserowe są powszechnie używane do obróbki metali, materiałów dielektrycznych i półprzewodników. Pomijając parametr grubości, niektóre materiały ze względu na strukturę są trudne do przetwarzania z różnych powodów, do których z pewnością zaliczyć należy: zbyt niską szybkość procesu technologicznego czy niedostateczną jakość cięcia, która wpływa na możliwość późniejszego zastosowania. Do takich problematycznych materiałów zaliczyć należy przede wszystkim:

- metale i/lub materiały przewodzące elektrycznie o wysokim współczynniku odbicia, np. aluminium lub miedź i ich stopy,
- niemetały takie jak ceramika, gruba ceramika strukturalna, np. węglík krzemu lub mullit-aluminium,
- kompozyty i materiały kompozytowe, np. włókno węglowe lub włókno szklane,
- materiały kamieniarskie, niejednorodne skały, np. większość materiałów granitowych.

Poza procesem cięcia lasery są najczęściej stosowane do drążenia mikrootworów przelotowych i nieprzelotowych. Inne zastosowania dotyczą możliwości tworzenia specjalnych zagłębień wyko-



Rys. 1. Różne zastosowania laserów w obróbce materiałów

rzystywanych przy produkcji elementów wbudowanych, naprawy soldermask na płytkach drukowanych, usuwania organicznych lub metalowych masek w procesach fotolitograficznych, jak również warstw coverlay tworzonych na laminatach elastycznych (rys. 1). Warstwa coverlay na płytkach elastycznych spełnia taką samą funkcję jak soldermaska na płytce sztywnej. Zabezpiecza i hermetyzuje ścieżki obwodu. Jedyną różnicą jest elastyczna forma takiej soldermaski. Strukturę takiego pokrycia tworzy warstwa poliimidu o grubości zazwyczaj 25 μm , na którą naniesiona jest warstwa kleju akrylowego o zbliżonej grubości.

Ze względu na konstrukcję podłoży płytek drukowanych konieczne jest wykorzystanie lasera pozwalającego na precyzyjną obróbkę materiałów takich jak: mata szklana impregnowana żywicą epoksydową, poliimidy czy folia miedziana o grubościach od kilku do kilkudziesięciu μm . Ważne jest, aby dla każdego materiału wyznaczyć charakterystykę jego absorpcji dla określonej długości fali promieniowania laserowego. Od właściwości absorpcyjnych materiałów składowych będą zależały wszystkie parametry cięcia dla danego podłoża.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność absorpcji materiałów składających się na laminat typu FR4 w zależności od długości fali promieniowania elektromagnetycznego. W odróżnieniu od źródła zielonego – 532 nm, czy lasera CO₂ – 1064 nm, dla źródła UV – 355 nm wszystkie wymienione materiały doskonale pochłaniają tę długość fali. W przypadku żywicy epoksydowej, która stanowi do 70% zawartości laminatu, promie-

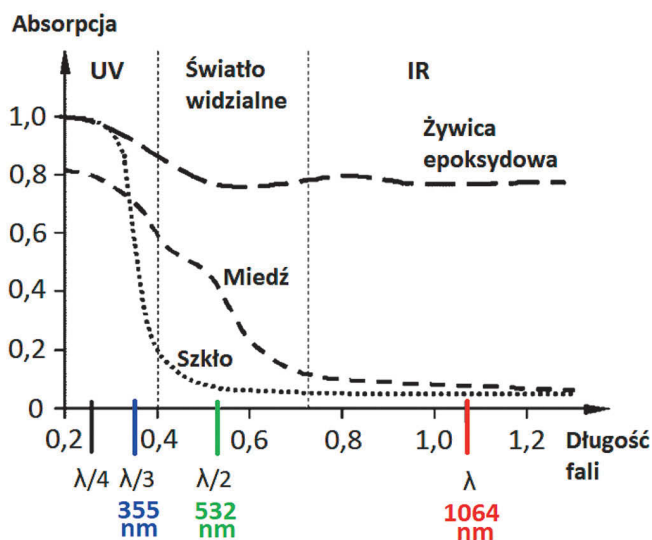
niowanie pochłanianie jest nawet czasami zbyt mocno, co ogranicza tym samym głębokość wnikania wiązki w podłoże i szybkość procesu, w wyniku czego cięcie materiałów typu FR4 o grubościach powyżej 0,8 mm jest mało wydajne. Sytuacja wygląda w tym przypadku inaczej niż w przypadku źródła zielonego, czy lasera CO₂. Lepsza transmisja niż absorpcja pozwala wnikać światłu dalej w materiał, co jest szczególnie korzystne w przypadku grubszych materiałów. Inna trudność wynika z faktu, że podłoża FR4 wzmocnione włóknami nie są jednorodne. Włókno szklane ma zupełnie inne właściwości fizykotermiczne od żywicy epoksydowej, co wpływa na różną gęstość energii w procesie ablacji dla obu rodzajów materiałów.

Laser UV w produkcji elektroniki

Jeszcze do niedawna najpowszechniej stosowanym narzędziem do formowania mikrootworów i laserowego depanelingu płytek drukowanych, gwarantującym wysoką precyzję i jakość procesu, był laser UV o długościach fal 193–355 nm (tab. 1). Ponieważ promieniowanie o krótszej długości fali, któremu zwykle towarzyszy krótsza szerokość impulsu, oferuje wyraźne zalety, dzięki wynalezieniu laserów ekscymerowych UV i w ostatnich latach laserom półprzewodnikowym o zwielokrotnionej częstotliwości, pojawiły się nowe możliwości przetwarzania materiałów. W szczególności zdolność do usuwania materiałów organicznych, metali i szkieł ze znanej głębokości przy mniejszym uszkodzeniu termicznym sprawiła, że

Tabela 1. Porównanie parametrów laserów UV stosowanych w mikroobróbkę

Typ lasera	Długość fali	Długość impulsu	Długość powtarzania impulsu (repetycji)
Ekscymerowy	193 – 351 nm	35 – 50 ns	0 – 100 Hz
Na parach miedzi (CVL)	271 nm, 511 nm	18 – 25 ns	2 – 30 kHz
Nd YAG	266 nm, 355 nm	5 – 45 ns	0 – 50 kHz



Rys. 2. Krzywe absorpcji miedzi, szkła i żywicy epoksydowej w laminacie FR4

lasery UV są bardzo atrakcyjne w przemyśle elektronicznym do mikroobróbki ogólnego zastosowania i do specjalnych potrzeb jakim jest mikrowiercenie.

Spośród wymienionych typów lasera UV, laser półprzewodnikowy Nd: YAG jest obecnie najczęściej stosowanym laserem w przemyśle elektronicznym. Jego podstawowa długość fali bliskiej podczerwieni (1064 nm) pozwala obrabiać materiały jedynie przez ich stapianie lub spalanie, co sprawia, że nie nadaje się do większości zastosowań w procesach mikroobróbki. Możliwe jest jednak trzykrotne lub czterokrotne podzielenie tej długości fali poprzez dodanie nieliniowych kryształów do standardowych konfiguracji rezonatora, co powoduje przesunięcie częstotliwości do widma ultrafioletowego odpowiednio do 355 lub 266 nm, które są znacznie bardziej odpowiednie do tych zastosowań. Długość fali wiązki laserowej z zakresu UV w połączeniu z odpowiednio dobraną energią i czasem trwania impulsu laserowego pozwalają na uzyskanie warunków zimnej ablacji, co ogranicza proces karbonizacji spowodowany wzrostem temperatury na skutek skoń-

czony przewodności cieplnej obrabianych materiałów. Podstawowym ograniczeniem zastosowań współczesnych laserów z zakresu UV jest mocno ograniczona głębokość obróbki, która ze względu na silną absorpcję i wydajność procesów technologicznych nie przekracza zazwyczaj 200 μm . Mała głębokość penetracji optycznej (277 nm) dla promieniowania o długości fali 355 nm zmniejsza objętość materiału, w którym energia jest pochłaniana. Głębokość penetracji termicznej długości fali jest również niewielka (178 nm) ze względu na zastosowane krótkie impulsy laserowe. Na rysunku 3 przedstawiono zależność absorpcji polimidu w zależności od długości fali promieniowania elektromagnetycznego. Najlepsza absorpcja osiągana jest dla źródła UV, dla lasera zielonego 532 nm i CO_2 1064 nm jest na porównywalnym poziomie.

Nawet zastosowanie silnie skupionej wiązki laserowej i relatywnie długich czasów impulsu, charakterystycznych dla większości źródeł UV stosowanych w mikroobróbce, powoduje że konieczne jest uzyskanie wysokich wartości energii przy pracy impulsowej, aby ciąć pod-

łoża o większej grubości. Z tego względu lasery UV wykorzystywane są zazwyczaj do cięcia obwodów elastycznych wykonanych z poliimidu, których grubość nie przekracza zwykle 100 μm oraz drążenia mikrootworów przelotowych i nieprzelotowych. Wysokoenergetyczne promieniowanie laserowe UV stawia wysokie wymagania wewnętrznym elementom lasera i jego optyce. Z tego powodu stosowanie źródła z zakresu UV nie zawsze jest uzasadnione ekonomicznie dla laminatów o grubości powyżej 200 μm i wymaga kosztownego planu konserwacji i częstej wymiany źródła laserowego. Średnia żywotność takiego źródła jest szacowana na 10 tys. godzin pracy, a koszt wymiany przekracza typowo 10 tys. zł.

Diodowe lasery zielone

Obecnie na rynku dostępne są kolejne urządzenia do depanelingu wyposażone w impulsowe źródła laserowe DPSSL (Diode-Pumped Solid-State Lasers) pracujące w zakresie zielonym. Nowa generacja lasera oparta na kryształach Nd: YVO₄ (wandan itrowo-ortowy domieszkowany neodymem) z podwojoną przemianą częstotliwości SHG (Second-Harmonic Generation) zastąpiła do niedawna popularne lasery Nd: YAG (granat itrowo-glinowy domieszkowany neodymem). Jedną z najbardziej atrakcyjnych cech Nd: YVO₄, w porównaniu z Nd: YAG, jest 5-krotnie większy współczynnik absorpcji dla długości fali pompowania 808 nm, która jest obecnie standardem dla diod laserowych dużej mocy. Umożliwia to zastosowanie mniejszych kryształów Nd: YVO₄, a tym samym, na stworzenie bardziej kompaktowych systemów laserowych. Dla danej mocy wyjściowej oznacza to również niższy poziom energii pompowania, przy którym działa dioda laserowa, przedłużając w ten sposób żywotność drogiej diody laserowej. Cenne jest także szerokie pasmo absorpcji Nd: YVO₄, które jest

od 2,4 do 6,3 razy większe niż Nd: YAG. Oprócz bardziej wydajnego pompowania, kryształ Nd: YVO₄ pozwala w ten sposób na szerszy zakres wyboru specyfikacji diod. Stwarza to możliwość producentom systemów laserowych szerszego wyboru diody przy projektowaniu systemów lasero-

Tabela 2. Porównanie właściwości cięcia lasera CO_2 , UV i zielonego

Rodzaj lasera	Absorpcja miedzi	Absorpcja żywicy epoksydowej	Absorpcja poliimidu	Zalety	Wady
CO_2/IR	1–2%	75–78%	1–2%	Niska cena Wysoka szybkość procesu	Silna karbonizacja Zastosowanie tylko do procesów cięcia Średnica wiązki >70 μm
UV DPSSL	66%	90%	75%	Brak karbonizacji Średnica wiązki <20 μm	Wysokie koszty eksploatacji Niewielka głębia ostrości Niska prędkość procesu
Zielony DPSSL	50%	70%	3–4%	Brak karbonizacji Stosunkowo tani w eksploatacji Duże pole robocze Duża głębia ostrości Zadawalająca prędkość procesu	

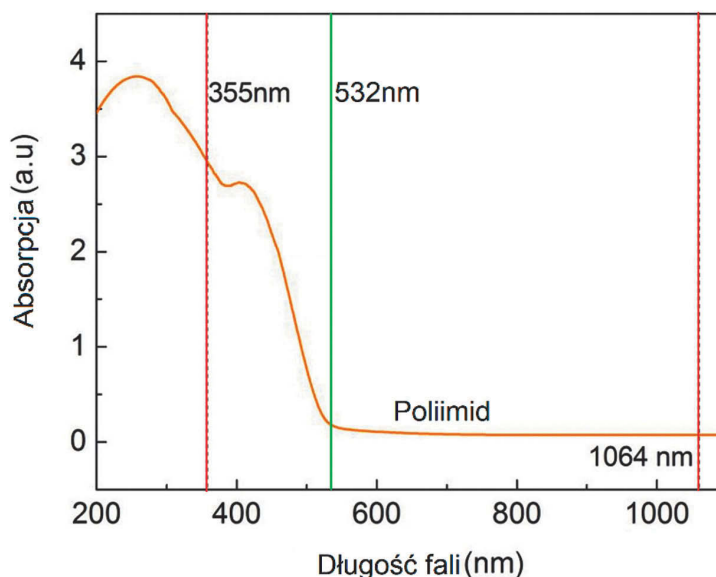
wych zgodnie z ich potrzebami. Większa przepustowość pompy umożliwia także stosowanie diod o niższych tolerancjach, co przekłada się na niższy koszt. Inną ważną cechą laserów Nd: YVO4 jest to, że laser utrzymuje silną emisję pojedynczej linii, a ponieważ kryształ wanadatu jest jednoosiowy, wytwarza jedynie spolaryzowaną moc lasera, unikając w ten sposób wpływu niepożądanych efektów dwójłomności na konwersję częstotliwości. Chociaż okres użytkowania Nd: YVO4 jest około 2,7 razy krótszy niż w przypadku Nd: YAG, to ze względu na wyższą wydajność kwantową pompy, efektywność nachylenia (slope efficiency) diody laserowej może być utrzymywana ciągle na wysokim poziomie. Urządzenie oparte na kryształach Nd: YVO4 generuje wiązkę o długości fali 532 nm i gwarantuje tę samą jakość cięcia co źródła UV, przy większej szybkości i wydajności procesu. Na zdjęciach mikroskopowych pokazano wyniki cięcia płytek testowych typu semi-flex i rigid przeprowadzone w laboratorium firmy ASYS z wykorzystaniem lasera zielonego o mocy 30 W i lasera UV o mocy 14 W. Testowano różne parametry obu źródeł w celu określenia najlepszej jakości i szybkości cięcia. Ostatecznie uzyskano porównywalną jakość, ale tylko w przypadku materiałów o grubościach 0,2 i 0,4 mm. Proces cięcia z wykorzystaniem lasera zielonego okazał się natomiast znacznie szybszy. Zmierzona średnia prędkość cięcia dla płytki semi-flex wyniosła ~80 mm/s, przy prędkości ~30 mm/s dla lasera UV. Pomimo zastosowania większej liczby przejść wiązki UV oraz adaptacji ogniskowej, cięcie materiałów grubszych niż 0,4 mm okazało się praktycznie niemożliwe.

Urządzenia do cięcia

Jeszcze niedawno lasery pracujące w paśmie zielonym nie zapewniały wystarczającej mocy szczytowej impulsu do cięcia włókien szklanych, tak jak lasery UV. Firma InnoLas Photonics jako jedna z pierwszych wypełniła tę lukę prezentując system cięcia laserowego BLIZZ 532-30-V (fot. 4).

System generuje średnią moc (P_a) 30 W, przy częstotliwości impulsu 40 kHz i czasie trwania (T_p) <20 ns oraz energii impulsu na poziomie (E) 750 μ J, zapewniając rekordową w tych zastosowaniach moc szczytową (P_p) 37,5 kW.

Laser zawiera aktywny Q-switch, który umożliwia akumulację energii w nie-

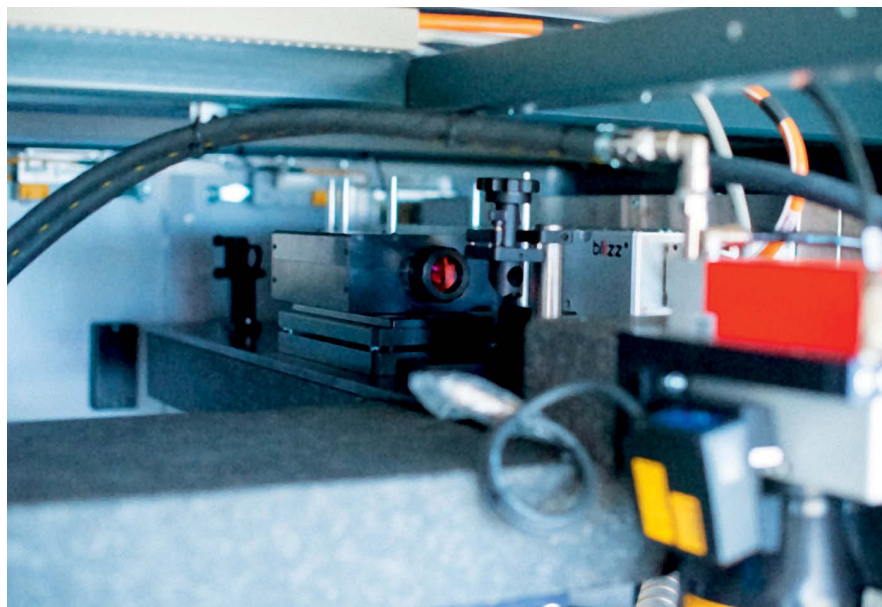


Rys. 3. Krzywa absorpcji polimidu

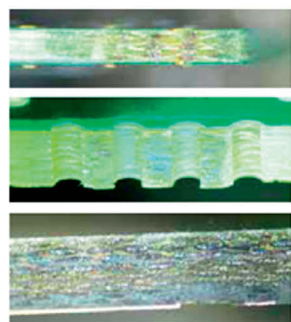
liniowym kryształach bez emisji promieniowania przez większość okresu powtarzania impulsu oraz szybkie uwolnienie zgromadzonej energii w bardzo krótkim impulsie. Możliwa do uzyskania częstotliwość powtarzania impulsów: od pojedynczego impulsu do 400 kHz. Uzyskiwane w tym systemie parametry techniczne pozwalają na osiągnięcie znacznie wyższych współczynników szybkości cięcia do całkowitych kosztów procesu. W najbardziej nowoczesnych rozwiązaniach możliwe jest uzyskanie mocy szczytowych na poziomie 66 kW przy czasach impulsów krótszych od 15 ns, co pozwala na osiągnięcie prędkości cięcia rzędu 20 mm/s dla płytek FR4 o grubości poniżej 0,6 mm i rigid-flex

o grubościach 0,1÷0,8 mm, 50 mm/s dla płytek FR4 o grubości poniżej 0,3 mm i aż 100 mm/s dla płytek flex o grubości poniżej 0,2 mm. Żywotność źródła zielonego jest trzykrotnie większa w porównaniu do źródeł UV i wynosi średnio 30 tys. godzin pracy. Dzięki temu możliwa jest redukcja kosztów związanych z eksploatacją, w tym konserwacji i wymiany kosztownych źródeł laserowych. Obecnie koszt konserwacji i wymiany źródła zielonego wynosi około 3 tys. dol., co jest typowo 4-krotnie niższą kwotą niż przy wymianie źródła UV.

Zjawiska występujące podczas mikroobróbki laserowej nie tylko eliminują skutki stresu mechanicznego, które występują podczas klasycznej separacji pły-

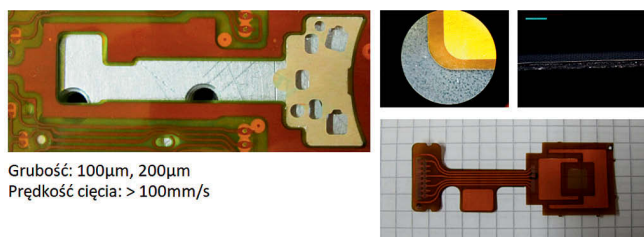


Fot. 4. System cięcia laserowego BLIZZ 532-30-V w urządzeniu ASYS Divisio 8100



- grubość PCB = 0,85mm
-> prędkość cięcia = 20,8mm/sek
- grubość PCB = 1,7mm
-> prędkość cięcia = 3,7mm/sek
- grubość PCB = 1,5mm
-> prędkość cięcia = 4,2mm/sek

Rys. 5. Widok krawędzi płytek FR4



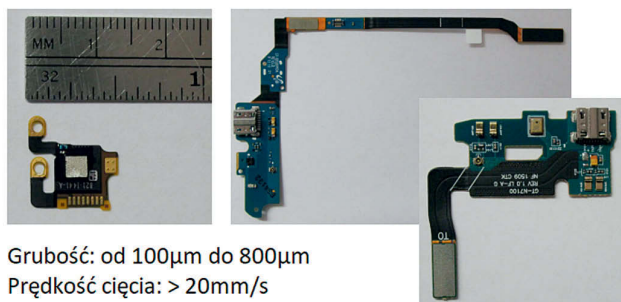
Grubość: 100µm, 200µm
Prędkość cięcia: > 100mm/s

Rys. 6. Wyniki cięcia płytek polimidowych Flex

tek drukowanych, ale zapobiegają przede wszystkim powstawaniu deformacji i uszkodzeń krawędzi płytek.

Korzyści z zielonego lasera

Technologia cięcia laserem zielonym jest szczególnie atrakcyjna, bo umożliwia wycinanie skomplikowanych kształtów nie tylko w obwodach elastycznych wykonanych z polimidu, ale również w laminatach sztywnych, przy użyciu skolimowanej wiązki laserowej o średnicy około 20 µm. Powszechnie używany w konstrukcji podłoży elastycznych polimid jest wyjątkowo odporny termicznie i chemicznie. Polimid nie topi się w trakcie cięcia laserowego, ale jest bezpośrednio odparowywany w interakcji z wiązką laserową. Dzięki stosunko-



Grubość: od 100µm do 800µm
Prędkość cięcia: > 20mm/s

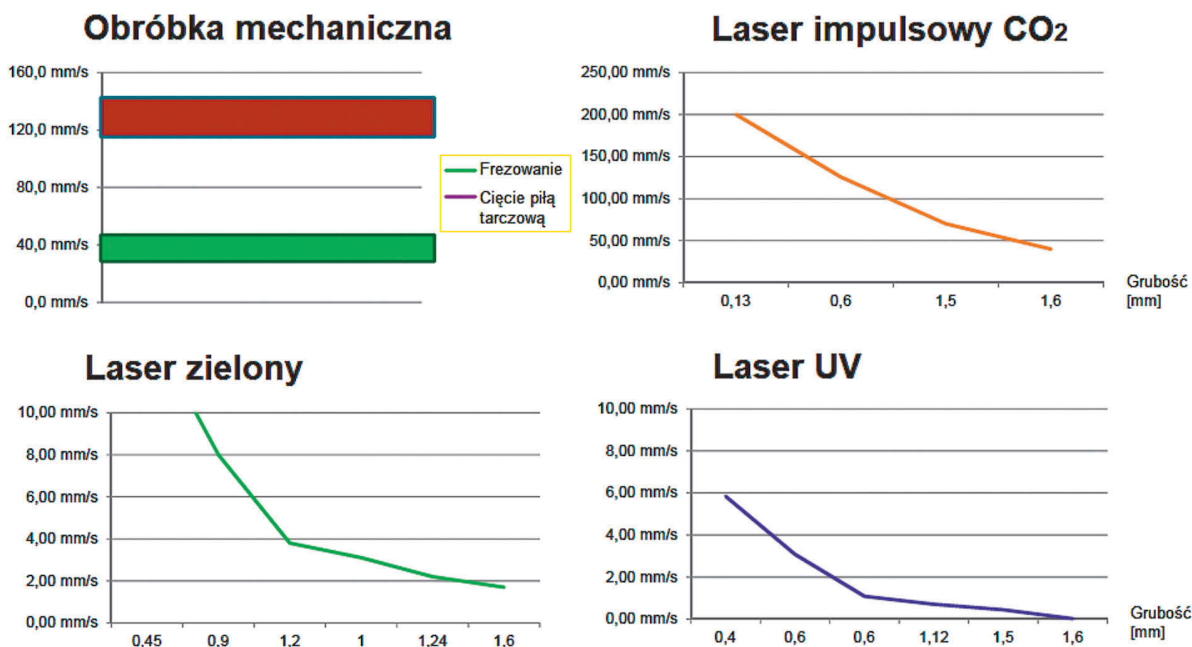
Rys. 7. Wyniki cięcia płytek rigid-flex

wo niskiej temperaturze parowania wynoszącej 750°C wymagana moc lasera jest relatywnie niska dla osiągnięcia wysokich prędkości cięcia. Mała głębokość penetracji optycznej zmniejsza objętość materiału, w którym energia jest pochłaniana. Głębokość penetracji termicznej jest również niewielka ze względu na zastosowanie krótkich impulsów laserowych o odpowiednio dobranej częstotliwości repetycji. W efekcie uzyskuje się dobrze zdefiniowany obszar usuwania materiału i doskonałą jakość cięcia przy minimalnej karbonizacji.

Jakość cięcia i szybkość w zależności od grubości laminatu i rodzaju materiału pokazano na rysunkach 5–7.

Lasery CO₂

Oprócz laserów pracujących w paśmie zielonym oraz UV powszechnie wykorzystywane są do cięcia różnych materiałów lasery CO₂. Zasadniczą różnicą pomiędzy laserami CO₂ a opisywanymi powyżej laserami pracującymi w paśmie zielonym oraz UV jest długość fali promieniowania laserowego. Lasery CO₂ pracują w obszarze dalekiej podczerwieni (FIR), podczas gdy promieniowanie o długości fali 10,6 µm jest silnie pochłaniane przez zdecydowaną większość materiałów dielektrycznych. System cięcia laserowego oparty na laserach CO₂ powoduje, że powierzchnia obrabianego materiału jest silnie podgrzewana i odparowywana, co często określa się wręcz mianem obróbki termicznej. Lasery te są stosowane do cięcia



Rys. 8. Porównanie wydajności mechanicznego procesu depanelingu oraz różnych systemów laserowych dla płytek typu FR4

wszystkich rodzajów metali, wielu materiałów organicznych i większości tworzyw sztucznych. Jednak pewnych tworzyw sztucznych i specjalnych polimerów, np. poliimidu, nie można dokładnie obrobić za pomocą lasera pracującego w zakresie podczerwieni. Obróbka termiczna powoduje deformację tworzywa sztucznego, karbonizację krawędzi cięcia, a to prowadzi do osłabienia mechanicznego i utworzenia dodatkowej ścieżki przewodzącej. W przypadku wielu aplikacji jest to niedopuszczalne, ponieważ produkty węglowe mogą przewodzić i absorbować wilgoć, co może prowadzić do awarii całego urządzenia. Ponadto związki węgla są silnie aromatyczne, co jest nie do zaakceptowania w aplikacjach, w których produkt znajduje się blisko twarzy użytkownika, takich jak telefony komórkowe, czy zestawy głośnomówiące Bluetooth. Karbonizacja krawędzi zauważalna jest również w przypadku laminatów epoksydowo-szklanych. Poprawa jakości cięcia wymaga wielu dodatkowych zabiegów, dlatego lasery pracujące w paśmie podczerwieni nie są odpowiednie do obróbki obwodów drukowanych zarówno sztywnych jak i elastycznych. Dodatkowo, energia wiązki lasera pracującego w zakresie podczerwieni nie może być dobrze pochłaniana przez miedź nawet przy wysokich gęstościach energii, co jeszcze bardziej ogranicza zastosowanie lasera CO₂. Miedź charakteryzuje się wysokim przewodnictwem cieplnym, a dodatkowo w stanie stałym silnie odbija promieniowanie podczerwone. To sprawia, że takie metale są

Promocja projektu pt. Innowacyjne technologie montażu elementów na elastycznych podłożach FLEX dla aplikacji krytycznych, Internetu Rzeczy i Przemysłu 4.0. Umowa o dofinansowanie: POIR.01.01.01-00-1083/17-00 z dnia 22.06.2018. Projekt jest współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

trudne do cięcia laserem CO₂. Współczynnik odbicia miedzi i innych metali zmniejsza się dopiero wraz ze wzrostem temperatury metalu, i gwałtownie spada, gdy materiał osiągnie temperaturę topnienia (np. do <70% dla miedzi w stanie stopionym). Metale te pochłaniają znacznie więcej energii lasera w stanie stopionym. Do efektywnego cięcia potrzebne są więc znaczne ilości energii, rzędu 100 W i większe. W tabeli 2 zestawiono właściwości lasera CO₂, UV i zielonego.

Piotr Ciszewski
pciszewski@semicon.com.pl
Semicon Sp. z o.o.

Semicon Sp. z o.o., www.semicon.com.pl