

# Laboratoryjne urządzenie do bezpośredniego naświetlania laserowego

mgr inż. ROBERT BARBUCHA, dr MAREK KOCIK, Instytut Maszyn Przepływowych, Gdańsk  
dr GRAŻYNA KOZIOŁ, mgr JANUSZ BORECKI, Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa  
prof. dr hab. JERZY MIZERACZYK, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny

Rosnąca wciąż miniaturyzacja oraz złożoność układów elektronicznych ma istotny wpływ na wymagania stawiane producentom PCB. Jednak dostęp do nowoczesnych rozwiązań technologicznych jest często ograniczony ze względu na ich wysokie koszty. Dlatego prowadzone są badania naukowe nad opracowaniem tańszych, konkurencyjnych technologii.

Jednym z ważniejszych procesów technologicznych podczas produkcji PCB jest wytworzenie wzoru mozaiki ścieżek elektrycznych na warstwie miedzi pokrywającej PCB. Krytycznym elementem tego procesu jest naświetlanie mozaiki ścieżek w warstwie światłoczułego polimeru nałożonego na warstwę miedzi. Standardowo proces naświetlania mozaiki odbywa się w kopiarkach emitujących promieniowanie UV, w których naświetla się powierzchnię fotopolimeru przez nałożoną na niego fotomaszkę. W fotomasce wykonywany jest negatywny wzór mozaiki ścieżek. Minimalne rozmiary ścieżek, możliwe do osiągnięcia w tej technologii, wynoszą 150  $\mu\text{m}$ , natomiast minimalna średnica otworu to 200  $\mu\text{m}$ . Aby zbliżyć się do gęstości upakowania wynoszącej 50/50  $\mu\text{m}$ , opracowano technologię LDI (*Laser Direct Imaging*), która zapewnia wysoki stopień upakowania ścieżek [2].

Artykuł ma na celu zaprezentowanie możliwości laboratoryjnego urządzenia pracującego w technologii LDI do bezpośredniego naświetlania PCB pokrytych fotopolimerem. Zprezentowano również przykładowe próbki naświetlania PCB, składające się ze ścieżek o różnej gęstości upakowania.

## Laboratoryjne urządzenie do LDI

W laboratoryjnym urządzeniu do LDI (fot. 1) jako źródło promieniowania UV wykorzystano laser diodowy CUBE ( $\lambda = 375 \text{ nm}$ ) firmy Coherent. Laser generuje ciągłe promieniowanie UV o średniej mocy wyjściowej 8,36 mW. Wiązka laserowa może być modulowana z częstotliwością 150 MHz. W laserze wbudowany jest kolimator, który poprawia właściwości geometryczne wiązki laserowej.

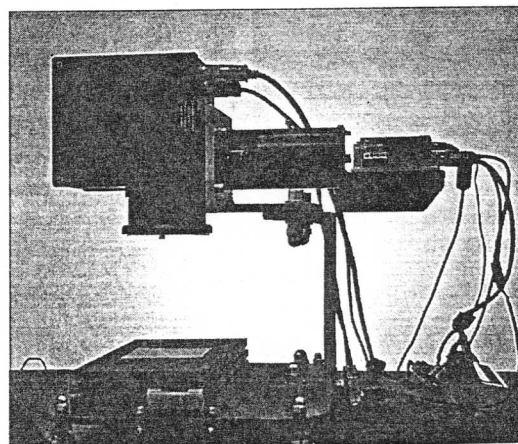
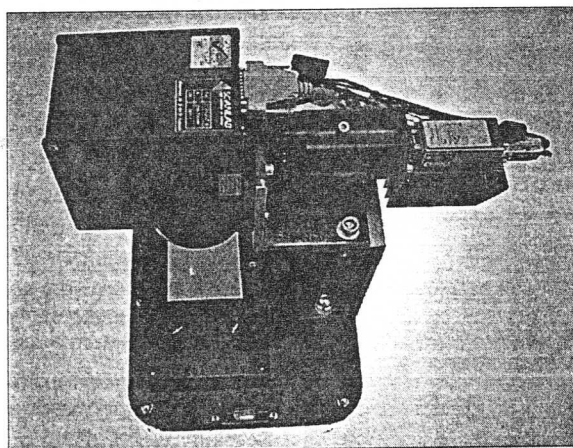
Do skanowania powierzchni PCB wiązką laserową został użyty skaner optyczny firmy Scanlab. Składa się on z dwóch

precyzyjnych silników krokowych z zamocowanymi lustrami odbijającymi promieniowanie UV. Maksymalna prędkość przemieszczania wiązki laserowej po powierzchni PCB wynosi 1 m/s. Zamontowany w skanerze obiektyw typu „plane field” o ogniskowej 100 mm umożliwia naświetlanie bez zniekształceń obszaru o wymiarach 5 x 5 cm.

W laboratoryjnym urządzeniu do LDI zastosowano także teleskop, który umożliwia szybką (16 rad/s) zmianę średnicy wiązki laserowej poprzez kontrolowany ruch jednej z soczewek teleskopu. Teleskop ten poszerza średnicę wiązki z 1 mm do 2,5 mm. W połączeniu ze skanerem optycznym teleskop umożliwia płynną zmianę średnicy „plamki laserowej” na powierzchni PCB. Dzięki temu położenie „plamki laserowej” na PCB może być kontrolowane w trzech wymiarach, a w rezultacie możliwe jest otrzymanie wzorów o różnych szerokościach linii. Jednak teleskop jest wykorzystywany tylko do precyzyjnego ustawienia szerokości najcieńszych ścieżek, gdyż jego parametry pozwalają jedynie na zmianę szerokości naświetlanych ścieżek w zakresie 30  $\mu\text{m}$ .

Laboratoryjne urządzenie do bezpośredniego naświetlania ścieżek na PCB ma również specjalną funkcję naświetlania ścieżek o zadanej grubości. Polega ona na tym, iż do liniowego ruchu plamki laserowej na powierzchni PCB dodawany jest ruch kołowy o danej amplitudzie i częstotliwości. Amplituda tego ruchu wyznacza docelową grubość naświetlanej ścieżki. W ten sposób można naświetlać ścieżki o grubości od 100  $\mu\text{m}$  do 4,5 mm.

Laboratoryjne urządzenie do LDI przy zmianie wielu parametrów pozwala na naświetlenie dowolnej ścieżki w zakresie od 40  $\mu\text{m}$  do 4,5 mm. Uniwersalność jego sprawia, że może znaleźć wiele zastosowań przy wykonywaniu prototypowych obwodów drukowanych. Wadą urządzenia jest przede wszystkim mały obszar, na którym możliwe jest naświetlenie danego wzoru mozaiki ścieżek na PCB. Planuje się jednak powiększenie tego obszaru przez zamontowanie tego urządzenia nad stołem XY napędzanym silnikami krokowymi. Będzie się to jednak wiązało z opracowaniem specjalnego oprogramowania komputerowego, dzielącego duże wzory na mniejsze, odpowiadające obszarowi robocznemu skanera optycznego.



Fot. 1. Laboratoryjne urządzenie do bezpośredniego naświetlania laserowego  
Fig. 1. Laboratory system for Laser Direct Imaging

Jednym z niewątpliwych atutów laboratoryjnego urządzenia do LDI jest program komputerowy Scan Maker, służący do sterowania nim. Pozwala on przede wszystkim na pracę z danymi zapisanymi w formacie HPGL (*Hewlett Packard Graphics Language*) oraz modyfikowanie, skalowanie, transformacje i normalizacje tych danych. Program umożliwia także optymalizację drogi naświetlania w celu skrócenia czasu naświetlania podczas przechodzenia do nowych wektorów ruchu. Poza wieloma funkcjami dotyczącymi obsługi skanera optycznego, lasera UV oraz teleskopu, program Scan Maker ma również opcje służące do testowania procesu naświetlania, tj. funkcję generowania linii o różnych grubościach i długościach oraz w różnych odstępach od siebie.

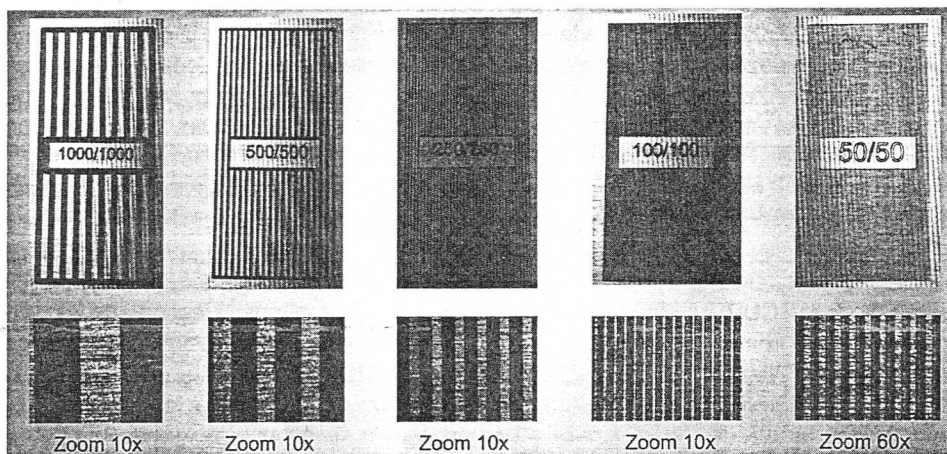
## Testowe wzory naświetlane na PCB

W wyniku przeprowadzonych prób na płytkach PCB pokrytych konwencjonalnym fotopolimerem Laminar 5038 firmy Shipley, o czułości w zakresie UV wartości 35...55 mJ/cm<sup>2</sup> (dostarczonych przez firmę Technoservice – [www.technoservice.com.pl](http://www.technoservice.com.pl)), wykonano testy naświetlania mozaiki utworzonej z linii. Szerokości naświetlanych linii wynosiły od 50 µm do 1 mm. Naświetlanie przeprowadzano w zaciemnionym pomieszczeniu, w otoczeniu żółtego światła, które jest neutralne dla większości fotopolimerów. Po naświetleniu płytek PCB przeprowadzono proces ich wywoływania w 1-procentowym roztworze węgla sodu. Naświetlone płytki PCB zanurzano w roztworze Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> do czasu, aż stwierdzono całkowite rozpuszczenie się polimeru w miejscach nienaświetlonych.

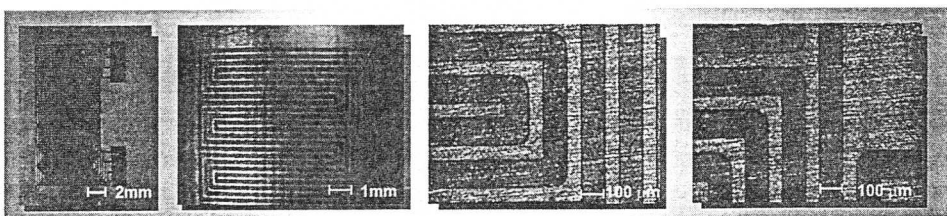
Na podstawie wcześniejszych badań w zakresie bezpośredniego naświetlania laserowego [3] naświetlanie płytek PCB

wykonano przy stałej szybkości przemieszczania plamki laserowej po powierzchni PCB równej 3 cm/s. Naświetlanie z szybkością mniejszą niż 2 cm/s powodowało naświetlenie również okolicznych obszarów. Po wywołaniu „prześwieconych” płytek PCB widać było cienką błonę spolimeryzowanego fotopolimeru w miejscach, gdzie powinien on zostać rozpuszczony. Natomiast dla prędkości większych niż 5 cm/s fotopolimer był niedoświetlony. W tym przypadku w miejscach naświetlania powstawała cienka błona fotopolimeru, która łatwo odklejała się od warstwy miedzi podczas wywołania. Średnica plamki laserowej na powierzchni fotopolimeru wyniosła od 50 µm. Szerokość naświetlanych linii była zmieniana poprzez dodanie do ruchu liniowego na powierzchni PCB dodatkowego ruchu kołowego o ustalonej częstotliwości, wynoszącej 1300 Hz oraz zmiennej amplitudzie. Wykonane próbki naświetlania płytek PCB przedstawiają różną gęstość upakowania ścieżek. Szerokości ścieżek zawierały się pomiędzy 50 µm a 1 mm.

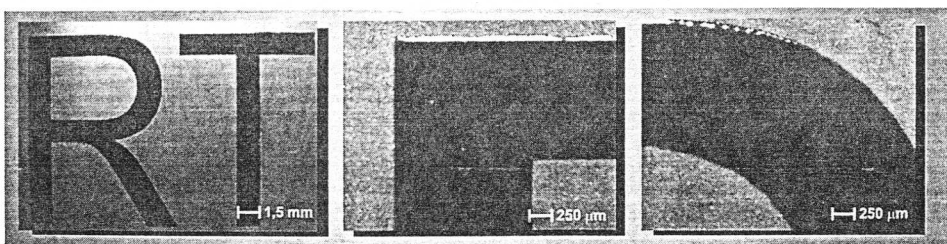
Na fotografii 2. przedstawiono próbki naświetlania ścieżek na płytkach PCB, przedstawiające różne gęstości upakowania ścieżek na PCB wraz z powiększeniami fragmentów próbek. Przykładowy symbol 1000/1000 na naświetlonej próbce oznacza, że szerokość ścieżki oraz odstęp pomiędzy ścieżkami wynosi 1000 µm. Wymiary próbek to 2 cm x 4 cm. Poniżej zdjęć próbek na fot. 2 znajdują się zdjęcia ścieżek w powiększeniu. Różne szerokości ścieżek zostały uzyskane poprzez dodanie do ruchu liniowego plamki laserowej w obszarze roboczym skanera optycznego, ruchu kołowego o zadanej częstotliwości i amplitudzie. W ten sposób za pomocą zmiany amplitudy tego ruchu możliwe było naświetlanie ścieżek z różną grubością.



Fot. 2. Naświetlone ścieżki o różnej szerokości i gęstości upakowania na PCB  
Fig. 2. Tracks on PCB with different width and density



Fot. 3. Wzór cewki naświetlonej na PCB. Fig. 3. An example of coil on PCB



Fot. 4. Wypełnione wzory liter o wysokości 11 mm  
Fig. 4. Filled letter patterns (height 11 mm)

Fotografia 3. ilustruje przykładowe zastosowanie bezpośredniego naświetlania laserowego w postaci wzoru nadrukowanej cewki na PCB. Wymiar podłużny wzoru naświetlonej cewki wyniósł 1,9 cm i składał się z siedmiu grzebień. Wzór ten został naświetlony przy wykorzystaniu funkcji poszerzania wiązki laserowej przez dodanie cyrkulacji o amplitudzie 100 µm w ruchu liniowym plamki laserowej w obszarze roboczym skanera optycznego. Fakt ten można zaobserwować w miejscach, gdzie naświetlona linia zakręca (fot. 3). Widać, że narożnik linii jest zaokrąglony.

Za pomocą urządzenia do bezpośredniego naświetlania laserowego można także naświetlać większe (fot. 4) powierzchnie przy zachowaniu dobrej jakości brzegów. Naświetlanie większych obszarów na PCB polega na naświetleniu obrysu danego kształtu oraz wypełnieniu wnętrza kształtu za pomocą równoległych, przylegających do siebie linii, które minimalnie na siebie nachodzą.

## Podsumowanie

W artykule zaprezentowano laboratoryjne urządzenie do bezpośredniego naświetlania laserowego, jego możliwości oraz przykładowe próbki naświetlania. Urządzenie do bezpośredniego naświetlania laserowego może znaleźć – jak na razie – zastosowanie

w produkcji prototypowych płytek drukowanych o wysokiej skali integracji układów elektronicznych. Jednak jego niewielki obszar roboczy pozwala jedynie na ograniczone wzory. Dlatego kolejnymi aspektem w rozwoju tego urządzenia będzie powiększenie tego obszaru przez zastosowanie stolika mikrometrowego XY, którego dokładność przesuwu będzie wynosić 1  $\mu\text{m}$ . Za pomocą tego stołu będzie można przemieszczać naświetlaną płytkę drukowaną do kolejnych obszarów roboczych skanera optycznego i łączyć mniejsze naświetlane obszary w większy wzór.

Urządzenie to, ze względu na niewielką moc zastosowanego lasera UV, nie znajdzie zastosowania w przemyśle elektronicznym, ale na podstawie jego konstrukcji z powodzeniem można opracować komercyjne urządzenie do LDI. Zaprezentowane laboratoryjne urządzenie do LDI oraz wstępne wyniki naświetlania mozaiki ścieżek na PCB wykazały, że w warunkach polskich możliwe jest wykonanie komercyjnego urządzenia do LDI. Cena takiego urządzenia mogłaby być atrakcyjna dla małych

i średnich przedsiębiorstw wytwarzających płytki PCB (cena podobnych urządzeń zagranicznych jest podawana w milionach dolarów). Komercyjne urządzenia do LDI nie tylko dorównują wydajnością konwencjonalnym urządzeniom do naświetlania PCB w kopiarkach UV, ale są dokładniejsze i oferują większą rozdzielczość naświetlanych wzorów. Dlatego zapotrzebowanie na tego typu urządzenia będzie w Polsce wzrastało.

**Badania wykonano w ramach Projektu Badawczego MNiI nr 3T11B02027.**

## Literatura

- [1] Süllau A., Wiemers A.: *Laser Direct Imaging*. ILFA Publication, 1999.
- [2] Omer Udi: An introduction to laser direct imaging for high density interconnects. *Circuit World* 29/1, 32–35, 2002.
- [3] Barbucha R., Kocik M., Mizeraczyk J., Koziół G., Borecki J.: Laserowe odwzorowanie mozaiki ścieżek na płytkach drukowanych. IV Krajowa Konferencja Elektroniki, Dąbrowa Wschodnie, 2005, ss. 579–584.

# Niskonapięciowe układy analogowe oparte na inwerterach CMOS

dr inż. WITOLD MACHOWSKI, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Katedra Elektroniki, Kraków

We współczesnej mikroelektronice największe znaczenie praktyczne mają układy klasy SoC (ang. *System on a Chip*), w których wszystkie elementy składowe projektowanego systemu, zarówno analogowe, jak i cyfrowe, a coraz częściej również inne elementy (np. czujniki, mikromaszyny lub moduły radiokomunikacyjne) zostają zintegrowane w jednym układzie scalonym, a gdy okazuje się to nierealizowalne – stosuje się kompromisowe rozwiązanie SiP (ang. *System in Package*) lub bardzo zbliżone do tego ostatniego MCM (ang. *Multi Chip Module*). Rozwój technologii CMOS, systematyczne zmniejszanie struktur i związane z tym reguły skalowania parametrów elektrycznych niosą także nowe wyzwania dla technik układowych, zwłaszcza w odniesieniu do części analogowej, której względna powierzchnia wprawdzie systematycznie maleje, ale nie zanika zupełnie i jest wciąż istotna dla funkcjonalności całego systemu.

Jednym z najistotniejszych ograniczeń, przed jakim staje projektant części analogowej, jest coraz niższe napięcie zasilania. Wprawdzie jest to tendencja trwająca już od kilkunastu lat, ale niektóre z zakładanych scenariuszy opisywanych w International Technology Roadmap for Semiconductors [1, 2, 3] pozwalają sądzić, że możemy mieć do czynienia ze zmianą o charakterze jakościowym, a nie tylko ilościowym. Problem bierze się stąd, że wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów tranzystora MOSFET musi następować redukcja grubości tlenku podbramkowego, czego naturalną konsekwencją jest obniżenie dopuszczalnego napięcia zasilania. Zmiany napięć progowych tranzystorów MOSFET są jednak nieproporcjonalnie mniejsze, co powoduje, że dotychczas ugruntowane metody projektowania części analogowej, oparte na różnych modyfikacjach układowych symetrycznej pary różnicowej ze sprzężeniem źródłowym, mogą okazać się nieprzydatne do technologii dopiero powstających. Wykorzystanie wspomnianej struktury układowej wymaga bowiem napięcia zasilającego około czterech napięć progowych – w przeciwnym wypadku następuje degradacja quasi-liniowego obszaru pracy pary różnicowej, wyrażająca się dużą nieliniowością charakterystyk przejściowych. Dzieje się tak dlatego, że obwód zasilania obejmuje zawsze stos trzech lub więcej tranzystorów, więc

w jego ścieżce występują zawsze co najmniej trzy napięcia progowe. Tymczasem spojrzenie na przewidywane parametry technologii głęboko submikronowych (tabela) pod kątem relacji napięcie zasilania – średnie napięcie progowe pokazuje, że relacja ta stale się pogarsza i co więcej, może spaść poniżej 4 a nawet 3. Nie jest zatem wykluczone, że dobrze ugruntowane techniki układowe wykorzystujące parę różnicową będą wymagały rozwiązania alternatywnego.

Takich alternatyw poszukuje się albo w specjalnych zabiegach technologicznych (np. tranzystory DTMOS – *Dynamic Threshold MOS*, tranzystory z „pływającą” bramką – *Floating Gate MOS*) albo w wykorzystaniu nietypowych układów pracy, jak np. sterowanie podłożowe.

Paradygmat SoC każe jednak poszukiwać rozwiązań dla niskonapięciowej elektroniki analogowej przede wszystkim w obrębie standardowych (a więc tanich) cyfrowych technologii CMOS. Jednym z takich rozwiązań może być próba „zaprzęgnięcia” klasycznego inwertera CMOS do przetwarzania analogowego. Inwerter ma stos tylko dwóch tranzystorów, więc wymagania napięciowe tego układu są najmniejsze z możliwych dla dowolnej technologii CMOS i w pełni kompatybilne z wymaganiami części cyfrowej, której inwerter też przecież jest podstawą.

**Tab. 1. Rozwój submikronowych technologii CMOS według [1]**  
**Tabl. 1. Submicron CMOS technology evolution after [1]**

| Wymiar charakterystyczny $L_{\min}$ [ $\mu\text{m}$ ] | Grubość tlenku podbramkowego $T_{\text{ox}}$ [nm] | Dopuszczalne napięcie zasilania $U_{\text{DD}}$ [V] | Napięcie progowe tranzystora $V_T$ [V] |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1,0                                                   | 250                                               | 5,0                                                 | 0,95                                   |
| 0,8                                                   | 200                                               | 5,0                                                 | 0,85                                   |
| 0,5                                                   | 135                                               | 3,3                                                 | 0,73                                   |
| 0,35                                                  | 100                                               | 3,3                                                 | 0,59                                   |
| 0,25                                                  | 60                                                | 2,5                                                 | 0,52                                   |
| 0,18                                                  | 50                                                | 1,8                                                 | 0,42                                   |
| 0,12                                                  | 42                                                | 1,2                                                 | 0,32                                   |
| 0,10                                                  | 36                                                | 1,2                                                 | 0,31                                   |
| 0,07                                                  | 30                                                | 0,9                                                 | 0,30                                   |