

# Prototyp w godzinę - precyzja niemal przemysłowa

## Płytki drukowane w domu, część 1

### Wstęp

Potrzeba łatwego dostępu do płytek drukowanych towarzyszy elektronikom niemal od początku obecności technologii PCB na rynku. Jeszcze we wczesnych latach 90. możliwości wyboru zawierały się pomiędzy żmudnym malowaniem ścieżek lakierem do paznokci bądź alchemią ciemni fotograficznej a wydaniem okrągłej sumki na płytkę wykonaną profesjonalnie lub poświęceniem należnej liczby godzin na zabawę z kynarem i płytką uniwersalną. Na przestrzeni ostatnich kilku lat problem amatorskich PCB zaczął jednak nabierać nowego wymiaru. Otóż coraz większa liczba interesujących układów

scalonych opuszcza fabryki wyłącznie w obudowach SMD o gęstości wyprowadzeń przekraczającej możliwości jakichkolwiek płytek uniwersalnych.

Z drugiej strony oferta zakładów zajmujących się profesjonalną technologią PCB staje się coraz łatwiej dostępna (przede wszystkim finansowo) dla zwykłych śmiertelników. Do przeszłości należą kłopotliwe pytania o listy apertur oraz własnoręczne przygotowywanie plików Gerbera i listy wierceń. Większość zakładów bez oporów przyjmuje pliki zapisane w formacie popularnych narzędzi projektowych. W zasadzie nie stanowi już w tej chwili większego problemu

*W artykule omówiono popularne, domowe metody wykonywania płytek drukowanych, ze szczególnym uwzględnieniem czynników warunkujących powtarzalność procesu i przyczyn najczęściej popełnianych błędów.*

*W pierwszej części artykułu przedstawiamy przegląd najbardziej popularnych metod wykonywania płytek drukowanych, za miesiąc opublikujemy opis metody pozwalającej w warunkach domowych uzyskać powtarzalne ścieżki 6-milsowe.*

złożenie zamówienia na wykonanie precyzyjnych, jednostkowych płytek przeznaczonych do prototypu urządzenia. Jednak wciąż pozostaje kilka istotnych „ale”... Rozmiary jednostkowego zamówienia są zazwyczaj znacznie mniejsze od rozmiarów typowych formatów stosowanych w procesie technologicznym. Dlatego wykonawcy czekają, aż zbierze się odpowiednia liczba „detalistów” potrzebna do wypełnienia formatki produkcyjnej lub odpowiednio podnoszą ceny obowiązujące przy małych zamówieniach. Również koszt przygotowania dokumentacji produkcyjnej wnosi swój niebagatelny udział do finalnej kwoty widniejącej na fakturze. Oczywiście można powiedzieć, że „prototyp musi kosztować”. Jednak niezależnie od posiadanego budżetu nie da się zniwelować czasu, jaki musi upłynąć od zapisania na dysku projektu PCB do chwili wzięcia do ręki upragnionego kawałka laminatu. Nawet zamawiając usługę 24-godziną według specjalnych superpresowych stawek, nie uniknie się konieczności fizycznego dostarczenia płytki do zleciodawcy. Dlatego amatorskie metody wytwarzania PCB wciąż budzą żywe zainteresowanie. Uściślijmy przy tym, że pojęcie „amatorskie” nie odnosi się do rangi i stopnia komplikacji samych projektów, a raczej oznacza brak dostępu do rozbudowanego zaplecza technologicznego. Z punktu widzenia hobbyisty, techniki te stwarzają możliwość omińnięcia kosztów stawiających pod znakiem zapytania sens realizacji wielu zamierzeń. Dla projektanta-profesjonalisty kryje się w nich łatwość szybkiego prototypowania i wprowadzania zmian do projektowanych układów. Dysponując technologią amatorską, nawet o gorszej jakości niż technologie profesjonalne, ale za to dostępną na zawołanie, można ją efektywnie wykorzystać przy uruchamianiu niekrytycznych fragmentów układu. Jak zresztą zobaczymy w drugiej części artykułu, rezultaty osiągane po nabraniu pewnego doświadczenia są co najmniej godne uwagi.

Najefektywniejsza, a zarazem precyzyjna metoda szybkiego wytwarzania jednostkowych płytek prototypowych polega na bezpośrednim grawerowaniu mozaiki na powierzchni laminatu. M.in. w EP8/2001

opisywaliśmy marzenie projektanta - specjalizowane plottery grawerujące firmy LPKF. Niestety urządzenia te, z racji ceny, leżą w zasięgu możliwości jedynie nielicznych zespołów projektowych, a dla większości z nas pozostaną właśnie marzeniem.

### Tajniki technologii

Zdecydowana większość współczesnych technologii PCB opiera się na metodach fotochemicznych, przy czym rozróżniamy tu dwie zasadnicze grupy:

- metody subtraktywne polegające na selektywnym usuwaniu zbędnych obszarów miedzi z powierzchni laminatu,
- metody addytywne (lub pół-addytywne) wykorzystujące selektywne osadzenie miedzi tworzącej mozaikę ścieżek.

łości wąskich ścieżek i niepowodowanie zwarć blisko położonych elementów mozaiki. Od minimalnych osiągalnych rozmiarów ścieżek i dzielących je separacji zależy m.in. jakich typów obudów elementów będziemy mogli używać w swoich projektach.

- dokładne zachowanie rozmiarów całego projektu, umożliwiające m.in. dopasowanie precyzyjnych elementów o dużych rozmiarach, takich jak np. wielostykowe złącza lub gniazda pamięci DIMM.
- ze względu na warunki warsztatowe dodajmy jeszcze brak wymagań dotyczących kosztownego wyposażenia, trudno dostępných bądź toksycznych odczynników itp. Obecnie możemy w zasadzie mówić o trzech „domowych”

### Termotransferową metodę wykonywania płytek polecamy w szczególności:

**Amatorom - jako tani sposób wytwarzania jednostkowych płytek do własnych projektów nie wymagający korzystania z ciemni i czystego laboratorium.**

**Zawodowcom - jako sposób na szybkie wykonywanie płytek prototypowych. W ramach zachęty zasygnalizujemy, że wykonanie jednostronnej płytki drukowanej dobrej jakości zajmuje mniej niż 1 h i daje się przeprowadzić niemalże na biurku obok komputera.**

Metody addytywne, a do nich należą niestety prawie wszystkie sposoby metalizacji otworów, do chwili obecnej leżą poza zasięgiem działań amatorskich. Wynika to zarówno z konieczności korzystania ze skomplikowanych procesów chemicznych (aktywacja powierzchni nieprzewodzących, chemiczne i elektrochemiczne osadzenie miedzi), jak również z konieczności użycia precyzyjnych wysokoobrotowych wiertarek niezbędnych do wykonania otworów o równych, gładkich ściankach.

Tak więc, w domenie amatorów pozostają wyłącznie jedno- lub dwuwarstwowe płytki drukowane wykonywane metodą subtraktywną, czyli wykonywane przez selektywne maskowanie i trawienie nieosłoniętej miedzi.

Uściślijmy zatem, jakie wymagania powinna spełniać zadowolająca technologia wytwarzania PCB:

- wierne odwzorowanie szczegółów projektu, a w szczególności zachowanie ciąg-

sposobach maskowania powierzchni miedzi:

- malowanie ścieżek pisakiem odpornym na trawienie,
- zastosowanie emulsji światłoczułej (fotolitografia),
- nanoszenie maski ochronnej metodą termotransferu.

O malowaniu pisakiem chemoodpornym wspominałem jedynie z kronikarskiego obowiązku, gdyż nadaje się wyłącznie do bardzo prostych urządzeń. Ręczne naniesienie punktów lutowniczych pod układ w obudowie DIP wymaga pewnej ręki i nie zawsze udaje się bez błędów. Posiadanie odpornego na trawienie pisaka z bardzo cienką końcówką (np. 0,3 mm) może jednak okazać się przydatne do ew. retuszu masek wykonanych innymi metodami.

Kolejne dwie techniki są przedmiotem niekończącej się rywalizacji pomiędzy zwolennikami emulsji światłoczułej Positiv 20 a użytkownikami folii TES-200 oraz - od niedawna - fanami obiecującej metody termotransferowej wy-

korzystającej papier kredowy w roli nośnika. Pierwsze dwie metody, tzn. Positiv i TES-200 są powszechnie znane, a ich opisy łatwo dostępne w Internecie. Artykuł poświęcony fotochemicznemu wytwarzaniu płytek PCB znalazł się też kiedyś na łamach EP (listopad 1994) i jest również dostępny na internetowej stronie EP (<http://www.ep.com.pl/?ftp/makepcb/index.html>). Jednak urok każdej technologii tkwi w szczegółach, a posiadanie jej opisu nie oznacza jeszcze prostej drogi do sukcesu. Nieprzypadkowo najcenniejszym tomem dokumentacji technologicznej w wielu zakładach jest zeszyt z odręcznymi notatkami głównego technologa. Dlatego, zamiast powtarzać ogólnie znane wyjaśnienia, skoncentruję się przede wszystkim na omówieniu czynników decydujących o jakości wykonania oraz na mechanizmach najczęściej popełnianych błędów.

Pewną nowością, znaną dotychczas głównie uczestnikom internetowych grup dyskusyjnych, jest zmodyfikowana metoda termotransferowa wykorzystująca papier kredowy. Opierając się na bardzo prostym pomysłe, pozwala ona na osiągnięcie zaskakująco dobrych i powtarzalnych wyników. Nie będę ukrywał, że technika ta najbardziej przypadła mi do gustu, dlatego poświęcę jej drugą część artykułu, próbując zarazem określić, gdzie leżą granice jej możliwości.

### Fotolitografia z wykorzystaniem Positivu

Starsi stażem Czytelnicy pamiętają zapewne skomplikowane przepisy przygotowania i stosowania negatywowych emulsji światłoczułych sporządzonych na bazie albuminy, kleju stolarskiego lub szelaku i uczulanych dwuchromianem potasu lub amonu. Można zarzykować stwierdzenie, że dopiero upowszechnienie preparatu Positiv 20 otworzyło drogę do wytwarzania dobrych jakościowo płytek drukowanych w warunkach domowego warsztatu. Łatwość nanoszenia emulsji, doskonała rozdzielczość, dobra światłoczułość i prosty sposób wywoływania niezmiernie uprościły i skróciły proces technologiczny. Fotolitografia oferuje również potencjalnie najwyższą precyzję odwzorowania. Jednak, z drugiej strony, metoda fotoche-

miczna to wciąż czasochłonny, kilkietapowy proces o wielu stopniach swobody, a błędy popełnione na którymkolwiek z etapów powodują, że pracę trzeba zacząć od początku. Uzyskanie powtarzalnych wyników wymaga ścisłego przestrzegania reżimu technologicznego. Wymieńmy zatem najważniejsze etapy decydujące o jakości finalnego produktu:

- przygotowanie powierzchni laminatu,
- nanoszenie warstwy światłoczułej (fotorezystu),
- suszenie fotorezystu,
- naświetlanie,
- wywoływanie,
- trawienie miedzi,
- usuwanie rezystu.

### Przygotowanie powierzchni płytki

W odniesieniu do Positiv 20, producent (firma CRC Kontakt Chemie) często w swoich materiałach używa określenia „lakier”. Faktycznie, opakowanie aerosolowe i stosowane rozpuszczalniki (m.in. aceton, eter dwumetylowy) blisko kojarzą się z malowaniem, a zamierzając uzyskać powłokę o dobrej przyczepności, również powinniśmy stosować się do zasad panujących w tej dziedzinie. Do wykonania płytek drukowanych należy wybierać laminat pozbawiony wgnieceń, głębokich rys i śladów korozji. Przygotowanie powierzchni polega na delikatnym, równomiernym zmatowieniu miedzi (rozwiniecie powierzchni poprawia adhezję lakieru) oraz bardzo dokładnym odtłuszczeniu. W praktyce dosyć dobrze zdają egzamin detergentowe, „nierysujące” mleczka do czyszczenia urządzeń sanitarnych (np. CIF, Skrzat itp.) lub płyny do mycia naczyń. Można również posłużyć się bardzo drobnym, wodoodpornym papierem ściernym o gradacji >1000, szlifując płytkę na mokro - najlepiej pod strumieniem bieżącej wody. O dobrym odtłuszczeniu świadczy równomierne zwilżanie przez wodę

całej powierzchni. Nie muszę chyba dodawać, że od tego momentu nie wolno już dotykać miedzi palcami. Ponieważ czysta powierzchnia miedzi ulega stopniowemu utlenianiu i zabrudzeniom, nie należy też niepotrzebnie zwlekać z lakierowaniem.

### Nanoszenie fotorezystu

Podobnie jak w przypadku powłok lakierniczych, przy nakładaniu fotorezystu zależy nam na równomiernym, szczelnym pokryciu całej powierzchni podłoża. Dodatkowo jednak, szczególnego znaczenia nabiera grubość naniesionej warstwy przekładająca się bezpośrednio na wartość energii promieniowania potrzebnej do jej prawidłowego naświetlenia. Nie-równomierność warstwy może spowodować problemy z dobrem czasu ekspozycji, a w skrajnym przypadku uniemożliwić poprawne naświetlenie całego pola roboczego. Grubość warstwy światłoczułej decyduje również o osiągalnej rozdzielczości odwzorowania - aczkolwiek zalecana powłoka Positivu jest stosunkowo cienka (ok. 6...8 μm), dzięki czemu w zastosowaniach PCB jej grubość nie wywiera znaczącego wpływu na rozdzielczość metody. Do oszacowania grubości można posłużyć się oceną barwy - zgodnie z **tab. 1**. Podane barwy odnoszą się do emulsji naniesionej na podłoże bezbarwne - np. aluminium. Na skutek mieszania barw, lakier naniesiony na powierzchnię miedzi zyskuje odcień fioletowy.

Nakładanie powłoki najlepiej wykonywać przy żółtym świetle, aczkolwiek w stanie mokrym emulsja jest słabo wrażliwa i toleruje krótkotrwałe oświetlenie przytłumionym światłem dziennym. W miarę schnięcia jej światłoczułość wzrasta, dlatego suszenie powinno odbywać się już w ciemności.

Płytkę przeznaczona do lakierowania musi być dokładnie wysuszona po myciu. Do malowania natryskiem układamy laminat poziomo lub nachylony pod niewielkim kątem. Malowanie prowadzi się jednym nieprzerwanym ruchem, rozpoczynając natrysk poza płytką, a następnie wodząc dyszę wzdłuż linii zygzakowatej, począwszy od górnego narożnika. Przed skierowaniem strumienia na płytkę warto poświęcić kilka kropel preparatu na przedmuchiwanie dyszy i uwolnienie ewentual-

**Tab. 1. Grubość powłoki emulsji Positiv 20 można ocenić po kolorze pokrycia**

Barwa	Grubość powłoki [μm]
Jasna szaroniebieska	1...3
Ciemna szaroniebieska	3...6
Niebieska	6...8
Ciemnoniebieska	>8

nych skrzepniętych „kłaczków”. Przy malowaniu należy uważać, aby trzymać opakowanie możliwie blisko pionu. Przechylenie do poziomu powoduje niepotrzebną ucieczkę gazu nośnego i występowanie przerw w strumieniu, co odbija się na jednorodności powłoki. Nanoszony lakier w pierwszym momencie osiada na płytce w postaci „pomarańczowej skórki”, a dopiero po chwili rozplywa się w jednolitą, gładką warstwę. Ponadto rozplywająca się emulsja wykazuje tendencję do tworzenia zgrubień na krawędziach laminatu, dlatego należy pamiętać o zachowaniu odpowiednich marginesów wokół pola roboczego.

Nakładaniu cienkich powłok sprzyja bardzo niska lepkość preparatu, jednak natryśnięcie pokrycia o stałej, powtarzalnej grubości wymaga sporej wprawy. Dlatego, szczególnie przy precyzyjnych projektach, rozprowadzanie lakieru powinno być wspomagane wirowaniem płytki. Dzięki małej lepkości wystarczająco stosunkowo niewielkie prędkości wirowania - rzędu 100 obr./min. W warunkach amatorskich można wykonać prostą wirówkę, adaptując np. typowy wentylator z silnikiem stałoprądowym 12 V zasilany obniżonym napięciem.

Emulsja Positiv 20 ma ograniczoną trwałość (w temperaturze max. 25°C nominalnie 1,5 roku od daty konfekcjonowania), a przekroczenie daty ważności objawia się np. w postaci nierównomierności nałożonej warstwy (powstawanie „kłaczków”). Znacznie krótszy czas przydatności charakteryzuje suchą emulsję naniesioną na powierzchnię laminatu. Według danych producenta, okres przechowywania w temperaturze pokojowej nie może przekraczać 4 tygodni. Zwróćmy uwagę, że okres ten dotyczy również gotowych lakierowanych płytek oferowanych przez niektórych dystrybutorów. Przedłużeniu trwałości sprzyja składowanie w temperaturze obniżonej do +8...+12°C. Trzeba jednak pamiętać, żeby (z uwagi na kondensację pary wodnej) przed użyciem ogrzać płytki do temperatury pokojowej.

### Suszenie

Naniesiona warstwa musi być dokładnie wysuszona przed naświetlaniem. Jakość wysuszenia decyduje o przyczepności rezystu do podłoża,

a także, o czym już wspominałem, o jego efektywnej czułości na światło. Na całkowite wyschnięcie lakieru w temperaturze pokojowej potrzeba co najmniej 24 h.

Z jednej strony czas ten powinien być jak najkrótszy, gdyż lepka powierzchnia lakieru jest szczególnie podatna na chwytywanie zanieczyszczeń z powietrza. Z drugiej - zbyt intensywne suszenie może spowodować wytworzenie „skórki” i pomarszczenie powłoki.

**Błędy, których przyczyn nie widać**  
**Wydaje się, że 5 mils to niewiele, ale tylko błąd naświetlania może udaremnić próbę wykonania ścieżek o szerokości mniejszej od 10...12 mils.**

Uwzględniając oba wymagania, producent zaleca suszenie przyspieszone w temperaturze 70°C w suszarce z promiennikiem IR lub obiegiem ciepłego powietrza. Po umieszczeniu płytki w komorze, należy powoli podnosić temperaturę, a po osiągnięciu maksimum odczekać jeszcze 15...20 minut do całkowitego wyschnięcia. Przypomnijmy, że suszenie powinno odbywać się w ciemności, w otoczeniu wolnym od kurzu. Przekroczenie temperatury 80°C powoduje, że fotorezyst ulega nieodwracalnym przemianom, stopniowo tracąc rozpuszczalność.

### Naświetlanie

Naświetlanie emulsji jest najbardziej krytycznym etapem fotolitografii, a ze względu na dużą liczbę parametrów również najtrudniejszym z punktu widzenia powtarzalności procesu. Wymieńmy zasadnicze czynniki decydujące o powodzeniu procesu:

- dobór diapozytywu (rysunek w pozytywie, właściwa gęstość optyczna),
- dobór źródła światła (charakterystyka widmowa, gęstość mocy, kolimacja),
- równomierny docisk kliszy do laminatu,
- dobór czasu naświetlania,
- zachowanie czystości.

### Diapozytyw

Positiv 20 należy do grupy emulsji pozytywowych, tzn. uzyskujących rozpuszczalność w wyniku naświetlenia. Dlatego na diapozytywie użytym do naświetlania musi się znajdować pozytywowy rysunek mozaiki - tzn. czarne ścieżki na przezroczystym tle. Naświetlone obszary fotorezystu, czyli

tło projektu stają się rozpuszczalne i zostają usunięte podczas wywoływania odsłaniając powierzchnię miedzi. Dla porównania przypomnijmy, że tradycyjne, amatorskie emulsje chromianowe należały do grupy negatywowej, tzn. pod wpływem światła następowało w nich garbowanie białek i utrata rozpuszczalności. Dlatego też wymagały naświetlania rysunkiem w negatywie - w miejscach przezroczystych ścieżek następowało utrwalenie

emulsji chroniącej później miedz przed trawieniem.

Niedoświetlenie skutkuje słabą rozpuszczalnością fotorezystu utrudniającą odsłonięcie tła i powodującą powstawanie zwarć pomiędzy ścieżkami. Natomiast prześwietlenie powoduje m.in. podmywanie ścieżek, a w skrajnym przypadku spłynięcie całej emulsji podczas wywoływania.

Zakres swobody w doborze czasu naświetlania jest ograniczony przez kontrast posiadanego diapozytywu, a w praktyce przede wszystkim przez jego gęstość optyczną (D) w obszarach zaczerpionych (czyli logarytm dziesiętny ze stosunku ilości światła padającego do przechodzącego). Zbyt mała gęstość optyczna objawia się naruszeniem powierzchni miedzi na płaszczyznach, które powinny pozostać nietknięte. Najlepszą gęstość optyczną ( $D > 3,5$ ) mają klisze wykonane na fotoploterze lub naświetlarce rastrowej. Natomiast gęstość pokrycia uzyskanego na wydruku z drukarki laserowej lub atramentowej często okazuje się niewystarczająca. Ponadto na wydrukach z niektórych drukarek laserowych występuje również tendencja do niejednolitego krycia dużych obszarów. W przypadku drukarki laserowej lub ksero można uzyskać znaczącą poprawę, umieszczając wydruk na kilkadziesiąt minut w parach acetonu lub rozpuszczalnika nitro, powodujących spęcznienie tonera i w efekcie jego optyczne uszczelnienie.

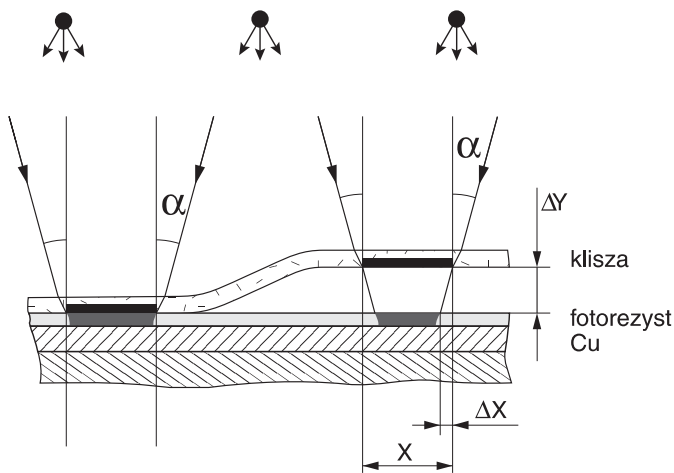
### Źródło światła

Maksimum czułości widmowej Positivu przypada w zakresie bliskiego ultrafioletu UVA - czyli w przedziale

340...420 nm. Gęstość energii wymagana do naświetlenia warstwy fotorezystu o grubości 8  $\mu\text{m}$  wynosi orientacyjnie 100  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ . Najlepszym dostępnym źródłem światła o odpowiedniej charakterystyce widmowej są wyładowcze lampy rtęciowe (np. przezroczysta świetlówka UV lub jarznik pozyskany z wysokoprężnej lampy rtęciowej). Aczkolwiek wystarczająco dobre rezultaty daje również zastosowanie żarowej lampy halogenowej, a nawet bezpośredniego światła słonecznego. Ze względu na trudność obiektywnego pomiaru natężenia ultrafioletu w warunkach amatorskich, najłatwiej ustalić właściwy czas ekspozycji eksperymentalnie, wykonując serię próbek o różnym stopniu naświetlenia. Zamiast stosowanego profesjonalnie klina szarości, wystarczy wielokrotne naświetlenie próbki ze stopniowym odsłanianiem kolejnych partii fotorezystu. Spodziewane czasy naświetlania przy użyciu typowych źródeł (lampa kwarcowa, halogen 500 W) i odległości rzędu 0,3...0,5 m plasują się zazwyczaj w przedziale kilku...kilkunastu minut.

Dobór źródła światła powinien uwzględniać jeszcze dwa aspekty - jednorodność oświetlenia całej powierzchni pola roboczego oraz kolimację światła. Równomierność oświetlenia nie wymaga, jak sądzę, szczegółowego uzasadnienia. Można ją uzyskać, stosując jednorodne źródło światła o powierzchni porównywalnej z powierzchnią stołu roboczego (np. zespół równoległych świetlówek UV z reflektorami parabolicznymi) lub źródło punktowe znacznie oddalone od płaszczyzny roboczej. Drugie zagadnienie wymaga jednak kilku słów wyjaśnienia. Otóż rozmiary obiektu odwzorowanego w fotorezycie nigdy nie będą identyczne z rozmiarami tego samego obiektu na kliszy. Zjawisko to, zwane podcięciem krawędzi jest skutkiem podświetlania fotorezystu położonego pod zaczerpionym fragmentem kliszy (rys. 1). Przyjmując, że stosujemy fotorezyst pozytywowy (czyli np. Positiv), którego naświetlenie powoduje rozpuszczalność emulsji, zaobserwujemy efekt polegający na zwięźeniu ścieżek w stosunku do wymiarów założonych w projekcie. Zwróćmy uwagę, że skutki podcięcia krawędzi fotorezystu kumulują się ze zwięźeniem ścieżek po-





Rys. 1. Jedną z przyczyn podświetlenia krawędzi podczas naświetlania jest niedokładne dociśnięcie kliszy do powierzchni fotorezystu

wstającym na skutek podtrawiania miedzi. Jednym ze sposobów kolimacji, przydatnym szczególnie w przypadku naświetlania za pomocą płaskiego zespołu świetłówek UV, może być zastosowanie kolimatora kratownicowego, czyli grubej przesłony w postaci kratownicy o niewielkim przekroju otworów i cienkich ściankach pochłaniających światło. W warunkach amatorskich za wystarczające można jednak uznać zastosowanie źródła punktowego (o niewielkich rozmiarach) oddalonego od powierzchni płytki. W swojej praktyce używałem, z dobrym skutkiem, archaicznej lampy kwarcowej do opalania, z krótkim jarznikiem rtęciowym o mocy 125 W umieszczonej na wysokości ok. 50 cm nad kopioramką.

**Docisk kliszy**

Niedokładne przyłożenie i docisk kliszy, w połączeniu z brakiem kolimacji oświetlenia jest istotnym, chociaż często niedocenianym źródłem błędów. Jestem skłonny zaryzykować stwierdzenie, że właśnie w tym miejscu kryje się praktyczne ograniczenie rozdzielczości domowej fotolitografii. Jak już wspomniałem w połączeniu z nierównoległością wiązki światła (brak kolimacji) skutkuje podcinaniem krawędzi i zwężaniem ścieżek (rys. 1) Spróbujmy przeprowadzić szybkie oszacowanie. Załóżmy, że dysponujemy oświetleniem o maksymalnym kącie deklinacji  $\alpha=15^\circ$ , a jednocześnie pomiędzy fotorezystem a niedokładnie dociśniętą kliszą powstała szczelina

$\Delta Y=0,5$  mm. Przyjęty maksymalny kąt padania światła odpowiada mniej więcej zastosowaniu typowej oprawy oświetleniowej z liniowym żarnikiem halogenowym 500 W umieszczonej na wysokości 40 cm nad płytką.

Z prostego układu geometrycznego możemy wyliczyć, że krawędzie ścieżek na fotorezycie zostaną podświetlone na głębokość:

$$\Delta X = \Delta Y \cdot \text{tg}(15^\circ) \approx 0,13 \text{ mm,}$$

czyli ok. 5 mils (mils = 0,001 cala jest jednostką powszechnie stosowaną w projektowaniu PCB)

Oczywiście w obliczeniu pominieliśmy wszelkie subtelnosci, takie jak: różne współczynniki załamania światła w materiale kliszy i warstwie światłoczułej, ugięcie światła na krawędzi maski, wsteczne odbicie światła od miedzi, a także charakterystykę czułości fotorezystu.

Jakie to ma znaczenie praktyczne? Wydaje się, że 5 mils to niewiele, ale tylko ten jeden błąd naświetlania może udaremnić próbę wykonania ścieżek o szerokości mniejszej od 10...12 mils.

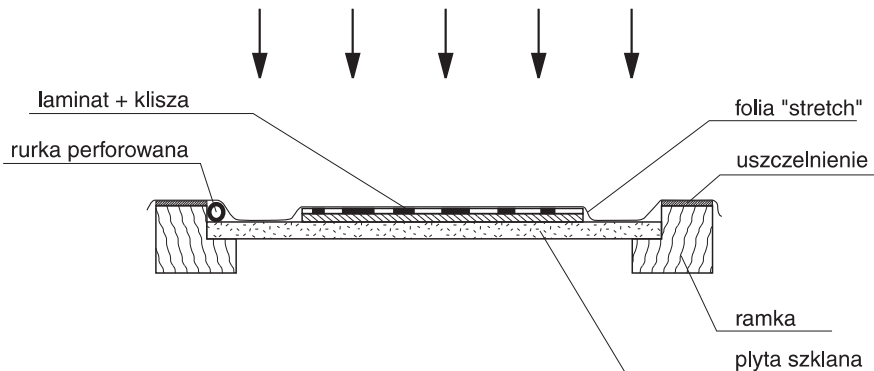
Występowanie szczelin pomiędzy maską optyczną a fotorezystem zależy przede wszystkim od zastosowanej metody docisku - ale nie tylko. Przede wszystkim klisza musi leżeć na płytce emulsyj (lub tonerem) do dołu! Grubość kliszy wynosząca 0,1...0,2 mm jest już wystarczająca aby, przy niewłaściwym ułożeniu, spowodować zauważalne podświetlenie krawędzi. Często stosowany docisk za pomocą szyby (szklanej lub PMMA) niestety nie zawsze zdaje egzamin. Nawet niewielkie zwichrowanie płytki laminatu zazwyczaj uniemożliwia równomierne przyciśnięcie maski na całej powierzchni. Ponadto szkło pochłania część ultrafioletu, natomiast miękkie plexi łatwo ulega zarysowaniu. Jedynym skutecznym sposobem wydaje się zastosowanie kopioramy z dociskiem próżniowym. Mimo poważnie brzmiącej nazwy jest to urządzenie łatwe do wykonania, a doraźnie dające się zastąpić nawet torebką z przezroczystej folii PE. Na swoje potrzeby wykonałem prostą kopioramkę złożoną z kwadratowej, drewnianej ramki z zagłębioną płytą szklaną (rys. 2, fot. 3). Użycie szkła wynikało z potrzeby zastosowania płaskiej gładkiej płyty, ale przy okazji ułatwia optyczne centrowanie masek podczas wykonywania płytek dwustronnych. Krawędzie ramki zostały pokryte warstwą silikonu sanitarnego i wygładzone na mokro. Powierzchnia gumy silikonowej przez dłuższy czas zachowuje pewną lepkość, dzięki czemu doskonale zdaje egzamin jako uszczelnienie. Zaznaczona na rysunku i widoczna na zdjęciu rurka z otworami, biegnąca wzdłuż krawędzi ramki służy jako doprowadzenie podciśnienia. Ze względu na niewielkie wymagania odnośnie wydat-

ności i ciśnienia końcowego, w roli pompy próżniowej może wystąpić prosta, inżektorowa pompa wodna, a nawet agregat sprężarkowy wymontowany ze złomowanej lodówki.

Naświetlaną płytkę wraz z maską należy położyć na kopioramie, fotorezystem do góry, a następnie całą ramkę nakryć cienką, przezroczystą folią polietylenową (stretch) stosowaną do pakowania żywności (fot. 4). Folia PE o grubości ok. 10  $\mu\text{m}$  praktycznie nie pochłania ultrafioletu a wprowadzane przez nią ewentualne załamania światła nie odzwierocują się na fotorezycie. Naprężona, czysta folia bardzo łatwo przylega szczelnie do powierzchni silikonu. Po włączeniu podciśnienia, ulega ugięciu o 2...3 mm, praktycznie nie przemieszczając się w płaszczyźnie poziomej. Dzięki temu cała powierzchnia maski zostaje równomiernie dociśnięta do laminatu, bez ryzyka przesunięcia względem otworów centrujących.

**Wróg numer 1 - kurz**

Wymóg sterylnej niemalże czystości - od początku nanoszenia emulsji do chwili wyjęcia płytki z kopioramy, jest wspólną cechą wszystkich fotolitografii. Jakkolwiek wymogi czystości niezbędnej przy wykonywaniu PCB są nieporównywalne z rygorami panującymi w *cleanroomach* laboratoriów półprzewodnikowych, to jednak przyjmuje się, że przy fotolitografii wysokoprecyzyjnych PCB pomieszczenia laboratoryjne muszą być utrzymane w klasie czystości „10000“, co znaczy, że liczba cząstek stałych o średnicy  $>0,5 \mu\text{m}$  nie może przekraczać (po przeliczeniu na jednostki metryczne) 350 szt./dm<sup>3</sup> powietrza, natomiast cząstek o średnicy  $>5 \mu\text{m}$  już tylko 2,3 szt./dm<sup>3</sup>.



Rys. 2. Rysunek przekrojowy ilustrujący budowę kopioramy podciśnieniowej



Fot. 3. Podciśnienie dociskające folię można uzyskać dzięki wprowadzeniu pod folię polietylenowej rurki z otworami

Drobiny kurzu przyklejone w czasie natryskiwania emulsji powodują powstawanie widocznych zgrubień. Z drugiej strony, wysoka rozdzielczość fotorezystu paradoksalnie skutkuje zwiększoną wrażliwością na zanieczyszczenia obecne w czasie naświetlania. Niewidoczne gołym okiem włóknisko pomiędzy kliszą a warstwą światłoczułą może zostać odwzorowane jako cieniutka „szpilka“ zwierająca dwie sąsiednie ścieżki.

W moim odczuciu, kłopoty z utrzymaniem czystości stanowią jedną z najważniejszych przyczyn niepowodzeń domowej fotolitografii. Oczywiście nie chcę nikogo przekonywać o celowości budowy amatorskiego *cleanroomu* ze służącą oddzielającą strefy: szarą i białą, filtracją powietrza i przepływem laminarnym. Jednak warto zdawać sobie sprawę z obowiązujących zasad postępowania. Na laboratorium najlepiej wybierać pomieszczenia pozabawione „łapaczy kurzu“ w postaci zasłon, wykładzin itp., wyposażone w wentylację, ale nie wywołującą przeciągów. Uporawszy się ze sprzątnięciem, warto przed przystąpieniem do pracy, zwilżyć spryskiwaczem najbliższe otoczenie, co skutecznie ograniczy ilość kurzu unoszącego się w powietrzu. Najbardziej śmiejącym obiektem w laboratorium jest jednak sam człowiek. Dlatego należy zadbać o niepyłące ubranie obejmujące w szczególności czepek na włosy (sic!) i fartuch ze ściągaczami mankietami, nie nachylać się bezpośrednio nad płytką, a przede wszystkim unikać wykonywania gwałtownych ru-

chów. Opanowanie emocji przydaje się nie tylko ze względu na unoszący się kurz.

Płytkę laminatu od momentu naniesienia emulsji do chwili wyjęcia z kąpeli trawiącej podlega wielu operacjom, w czasie których bardzo łatwo o zarysowanie warstwy fotorezystu. Równie kłopotliwa może okazać się drobna, słabo widoczna rysa na kliszy fotograficznej. Dzięki dużej rozdzielczości zostanie odwzorowana np. jako słabo widoczna, cienka przerwa naruszająca ciągłość ścieżki.

### Wywoływanie

Pod wpływem światła fotorezyst staje się rozpuszczalny i poddaje się wymywaniu w kąpeli wywołującej. Natomiast obszary ciemne pozostają nienaruszone, chroniąc powierzchnię miedzi w czasie późniejszego trawienia. Wywoływacz zalecany przez producenta powinien składać się z 0,7% roztworu wodorotlenku sodowego (7 g NaOH w 1 dm<sup>3</sup> wody) o temperaturze pokojowej. W warunkach domowych można sięgnąć po preparat do udrażniania rur (np. "Kret"), składający się głównie z NaOH. Poprawnie naświetlony rysunek powinien ulec całkowitemu wywołaniu w czasie ok. 1 min. Zbyt wysokie stężenie wywoływacza powoduje natychmiastowe spłynięcie całej warstwy światłoczułej. Z drugiej strony stężenie zbyt małe lub zużycie NaOH stwarza trudności z wymyciem naświetlonej emulsji, interpretowane jako niedoświetlenie i mylnie korygowane wydłużaniem czasu naświetlania. Zwróćmy uwagę, że wodorotlenek sodowy, stojąc w otwartym naczyniu, zużywa się, wiążąc



Fot. 4. Niezbędnym elementem wyposażenia kopioramy jest folia kuchenna stosowana do pakowania żywności

obecny w powietrzu dwutlenek węgla. Mimo że wywoływanie to czynność stosunkowo prosta do wykonania, to jednak wydaje się, że błędy na tym etapie są popełniane wyjątkowo często i niestety wymagają powtórzenia całego procesu od początku.

### Trawienie

Positiv wykazuje odporność wobec większości kąpeli trawiących stosowanych w technologii PCB począwszy od łagodnie alkalicznych kąpeli amoniakalnych, przez roztwór chlorku żelazowego (FeCl<sub>3</sub>), roztwór nadsiarczanu amonu ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>), aż do kąpeli kwaśnych (HCl lub H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) z dodatkiem perhydroflu (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Natomiast mniej znany jest fakt, że w wyniku utrwalań termicznego (przeciętnie 10...30 minut w temperaturze 120°C, a przy szczególnych wymaganiach 160...190°C) można uodpornić powłokę rezystu na działanie tak agresywnych czynników jak np. stężony kwas azotowy (65% HNO<sub>3</sub>) lub fluorowodorowy (40% HF). Podaję tę informację jako ciekawostkę, sygnalizując zarazem, że potencjalny zakres zastosowań rozciąga się znacznie poza wytwarzanie PCB, pozwalając również na fotolitografię np. stali, srebra, szkła, aluminium itp.

### Usuwanie maski ochronnej

Niewielkie powierzchnie nienaświetlonego Positivu można łatwo usunąć za pomocą popularnych rozpuszczalników organicznych (aceton, estry - np. rozpuszczalnik „nitro“). W przypadku zmywania dużych powierzchni lub usuwania emulsji poddanej łagodnemu utrwalań termicznemu

wygodniej będzie posłużyć się roztworem wodorotlenku sodowego (NaOH) o stężeniu 5...30% (uwaga - żrące!). Emulsja poddana utrwalań wysokotemperaturowemu jest praktycznie nierozpuszczalna i nadaje się wyłącznie do usunięcia mechanicznego.

Podsumowując wyniki amatorskiej fotolitografii, określiłbym je jako świetny przykład niewykorzystanych możliwości. Jedynie nielicznym osobom udało się uzyskać wymiary ścieżek/separacji rzędu 5/5 mil. Większość użytkowników uznaje za sukces powtarzalnie wykonywanie płytek ze ścieżkami o szerokości 10...12 mil. Fotolitografia z natury rzeczy wymaga dużej staranności i powtarzalności parametrów, trudnych do uzyskania *ad hoc* poza laboratorium. Dodajmy przy tym, że cały proces zajmuje kilka godzin, a błąd popełniony nawet na końcowym etapie wymaga powtórzenia całej ścieżki od początku. Wysokie wymagania i pracochłonność metody fotochemicznej tłumaczą w pewnym stopniu zainteresowanie, jakim cieszą się inne, konkurencyjne i jednocześnie mniej wymagające sposoby wytwarzania PCB.

### Termotransfer - folia TES-200

Małą rewolucję w dziedzinie amatorskich PCB wywołało spostrzeżenie, że polimerowy toner stosowany w większości drukarek laserowych wykazuje zadowalającą odporność na działanie popularnych rozpuszczalników organicznych (aceton, estry trawiących). Wykonanie maski ochronnej na laminacie polega na wydrukowaniu mozaiki ścieżek na specjalnej folii transferowej, a następnie przeniesieniu na gorąco (naprasowaniu - stąd

też pochodzi żartobliwa nazwa „metoda żelazkowa“) tonera z wydruku na powierzchnię laminatu. Prasowanie może odbywać się różnymi metodami: np. przez przykładanie żelazka od góry do folii albo potraktowanie żelazka jako stolika podgrzewającego laminat i wprasowywanie tonera od strony folii z użyciem tamponu lub gumowego wałka. Po ostudzeniu i oderwaniu folii warstwa tonera powinna pozostać na laminacie. Stosowany nośnik transferowy musi jednak spełniać dwa zasadnicze wymagania:

- Folia nie może ulegać deformacji w temperaturze mięknienia tonera tzn. w podczas utrwalania termicznego w drukarce oraz przy przeniesieniu wydruku na płytkę.

- Toner musi wykazywać większą adhezję do miedzi niż do folii, dzięki czemu przy zrywaniu nośnika polimerowy nadruk pozostaje na powierzchni płytki.

Folia transferowa dostępna w Polsce nosi oznaczenie TES-200. Użytkownicy metody termotransferowej sugerują również wypróbowanie konkurencyjnych nośników - zwykłej folii do wydruków laserowych oferowanej przez różnych producentów, a także np. woskowanego papieru podkładowego z etykiet samoprzylepnych. Niestety w praktyce, z kilku powodów, trudno o uzyskanie zadowolających wyników:

- Jakość wydruku laserowego na folii różni się niestety od jakości wydruku możli-

wego do uzyskania na papierze. W niektórych typach drukarek toner ma tendencję do niedokładnego krycia płaszczyzn i gromadzenia się na krawędziach ścieżek.

- Punkt mięknienia folii leży niewiele powyżej temperatury transferu tonera (wynoszącej ok. 150..160°C). Nawet niewielkie przegrzanie może spowodować popłynięcie folii i zmianę wymiarów wydruku. Ponadto folia wykazuje skłonność do ślizgania się na wałkach prowadzących w drukarce, co może powodować skrócenie wydruku wzdłuż osi równoległej do kierunku ruchu arkusza.

- Krytycznym punktem tej metody jest sposób odrywa-

nia folii. Według powszechnych zaleceń gorącą płytkę należy - przed oderwaniem folii - szybko schłodzić przez włożenie do zamrażalnika. Niestety, jak wynika z moich doświadczeń, na powierzchni zerwanej folii zawsze pozostaje część tonera - zazwyczaj w postaci obrysu ścieżek, ale czasem także oddzielonych większych fragmentów mozaiki.

- Cena folii, plasująca się w okolicach 3 zł za arkusz A4, nie sprzyja eksperymentom. Zwłaszcza że niedokładne wykonanie transferu oznacza zazwyczaj konieczność sięgnięcia po następny arkusz.

**Marek Dzwonnik, AVT**  
**marek.dzwonnik@ep.com.pl**