

Urządzenie laserowe do naświetlania masek przeciwlutowych

Streszczenie. Artykuł dotyczy naświetlania masek przeciwlutowych (soldermask) stosowanych jako zewnętrzna ochronna warstwa polimerowa na płytkach drukowanych. Opisano w nim prototyp urządzenia laserowego do naświetlania masek przeciwlutowych o dużych mocach produkcyjnych. W artykule zaprezentowano koncepcję oraz rzeczywisty model głównego układu wykonawczego, tj. głowicy naświetlającej złożonej z dużej ilości laserów półprzewodnikowych.

Abstract. In this article a new method of the soldermask exposure using Digital Mirror Device (DMD) is presented. A prototype laser head for irradiation the DMD was developed and tested for soldermask production. The performance of the laser head makes it attractive for the industrial implementation. (Laser system for soldermask exposure).

Słowa kluczowe: płytki drukowane, maski przeciwlutowe, soldermaski, naświetlanie polimerów, promieniowanie UV, produkcja PCB.

Keywords: Printed Circuit Boards, soldermasks, photoresits exposure, UV radiation, PCB manufacturing.

Wprowadzenie

Obecnie płytki drukowane można znaleźć w większości urządzeń elektronicznych, które stają się coraz mniejsze i lżejsze oraz bardziej wydajne. Złożoność połączeń na płytkach drukowanych ciągle rośnie. Coraz częściej gęstość upakowania elementów na płytkach wynosi 15/15 μm (szer. ścieżki/szer. odstępu). Z tego powodu urządzenia do produkcji płytek muszą spełniać coraz większe wymagania dotyczące precyzji ich wykonania. Jednym z bardziej istotnych etapów produkcji płytek jest naświetlanie promieniowaniem UV polimerów pokrywających poszczególne warstwy płytek. Stosowanymi źródłami promieniowania UV są głównie lampy halogenowo-rtęciowe. W procesie naświetlania popularna jest ciągle metoda fotolitograficzna, wykorzystująca klisze fotograficzne ze wzorem maskującym [1]. Jednakże, ze wzrostem złożoności połączeń na płytkach konieczne stało się opracowanie nowych technologii, stosujących promieniowanie laserów UV zamiast promieniowania lamp halogenowo-rtęciowych. Jedną z takich nowych technologii, zwana LDI (Laser Direct Imaging) stała się od roku 2004 wiodącą w procesie wytwarzania płytek o wysokiej skali zagęszczenia ścieżek, zwanych płytkami HDI (High Density Interconnects). Technologia ta została zaprezentowana przez firmę Orbotech w urządzeniu o nazwie Paragon. Zasada działania tego urządzenia jest podobna do klasycznej drukarki laserowej. Naświetlanie płytek drukowanych realizowane jest za pomocą wiązki lasera UV metodą rastrową, tzn. linia po linii. Skanując płytkę drukowaną, wiązka lasera UV przenosi rastrową informację na światłoczuły polimer. W celu zapewnienia wysokiej rozdzielczości rzędu 20 μm na piksel, firma Orbotech opracowała specjalny moduł optyczny o nazwie LSO (Large Scan Optics) do transmisji i ogniskowania wiązki laserowej [2]. Pomimo, iż na rynku pojawiło się wiele podobnych rozwiązań pracujących w technologii LDI [3-4], ich wydajność jest mniejsza niż urządzenia Paragon.

Wraz z rozwojem nowoczesnych mikroukładów MEMS powstał nowy pomysł na konstrukcję urządzenia do naświetlania płytek drukowanych. Pomysł ten polega na zastosowaniu nowego elementu opto-elektronicznego o nazwie DMD (Digital Micromirror Device) firmy Texas Instruments, który pierwotnie był wykorzystywany w projektorach multimedialnych do modulacji odbitego światła (tzw. cyfrowy modulator optyczny) [5]. Główną zaletą tego układu, składającego się z matrycy 2 milionów ruchomych mikro-zwierciadeł (o rozmiarze 10 x 10 μm każde), była możliwość selektywnego odbijania promieniowania UV z bardzo wysoką rozdzielczością, taką, która jest wymagana

w wysokoprecyzyjnych urządzeniach do naświetlania płytek drukowanych. Element DMD jest układem działającym bardzo szybko, dlatego możliwe stało się przetwarzanie bardzo dużej ilości informacji w krótkim czasie, co umożliwia uzyskanie dużej wydajności procesu naświetlania.

Miarą wydajności procesu naświetlania płytek drukowanych jest głównie ilość naświetlonych płytek w ciągu 24 godzin przez jedno urządzenie. Obecnie, aby zwiększyć wydajność danego urządzenia do naświetlania płytek drukowanych, jego elementy składowe muszą być na najwyższym poziomie zaawansowania technologicznego. Jednym z najbardziej istotnych elementów nowoczesnego urządzenia do naświetlania jest źródło promieniowania UV o dużej mocy. Dotychczas starano się zaadaptować lampy halogenowo-rtęciowe, stosowane wcześniej w konwencjonalnych urządzeniach fotolitograficznych. Urządzenia z lampą UV o mocy 1 kW (lub matryca lamp UV o mniejszej mocy sprzężonych światłowodami) umożliwiają naświetlenie 300 płytek w ciągu 24 godzin (np. japońskie urządzenie Mercurex z firmy Dainippon Screen [6]). Jednak taka wydajność jest niewystarczająca, aby sprostać obecnym wymaganiom przemysłu. Duże przedsiębiorstwa w Chinach szacują zapotrzebowanie produkcyjne na około 1000 – 1500 płytek na dzień z jednego urządzenia naświetlającego. Jest to warunek tego, aby moce produkcyjne pozostałych urządzeń na linii produkcyjnej w tych przedsiębiorstwach były wykorzystane w 100%. Jedną z głównych wad lamp halogenowo-rtęciowych jest ich mała wydajność końcowa, spowodowana kłopotami z kolimacją i transmisją „szerokokątnego” promieniowania UV do płytki drukowanej. Wydajność ta wynosi około 10%. Wynika stąd, że około 90% promieniowania UV emitowanego przez lampę ulega rozproszeniu. Dlatego alternatywą lamp halogenowo-rtęciowych są lasery generujące promieniowanie UV dużej mocy. Wysoka kierunkowość wiązki promieniowania laserów gwarantuje zminimalizowanie strat ich energii podczas transmisji promieniowania przez układy optyczne.

W niniejszym artykule zaprezentowano nową koncepcję głowicy naświetlającej płytki drukowane. Zastosowano w niej matryce laserów półprzewodnikowych jako źródło promieniowania UV. W celu uzyskania wymaganej dużej mocy promieniowania UV opracowano głowicę integrującą 52 lasery typu Blue-ray o długości fali 405 nm, umożliwiającą wygenerowanie gęstości energii na płytce drukowanej około 350 mJ/cm^2 . Jest to gęstość wystarczająca do naświetlania standardowych masek przeciwlutowych. Lasery półprzewodnikowe UV są obecnie

bardzo popularne (głównie ze względu na stosowanie ich w nagrywarkach Blue-ray). Ich cena jest bardzo niska w porównaniu z cenami innych źródeł UV. Dzięki temu zaproponowane przez nas rozwiązanie jest tanie.

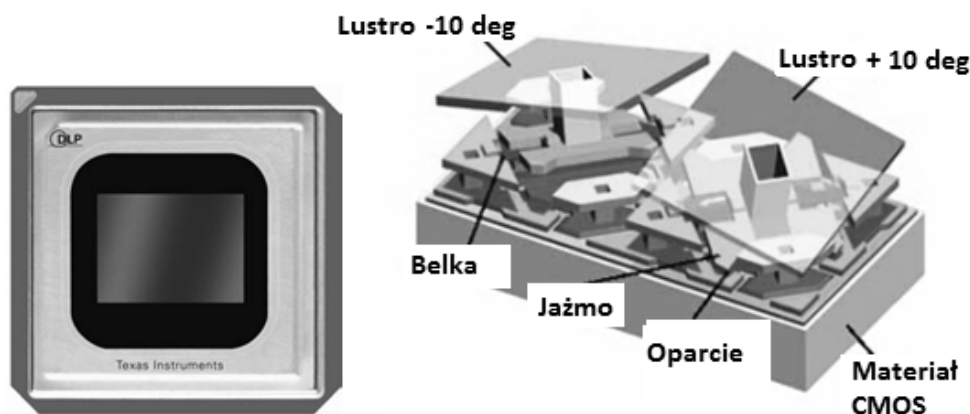
Metoda naświetlania bezpośredniego (metoda DMD)

Nowoczesne urządzenia do naświetlania płytek drukowanych zamiast standardowej techniki fotolitografii (naświetlanie polimeru światłem UV poprzez kliszę ze wzorem maskującym) wykorzystują techniki bezpośredniego przenoszenia wzoru maskującego na polimer. Oprócz technologii LDI pojawiła się nowa metoda cyfrowego odwzorowywania schematu połączeń na fotopolimerze – metoda DMD. Metoda ta była wcześniej wykorzystana w projektorach multimedialnych, gdzie w porównaniu do projektów LCD, zapewniała dużo większy kontrast odwzorowania kolorów na ekranie. Okazało się, że element opto-elektroniczny DMD może znaleźć także zastosowanie w wielu innych dziedzinach techniki, np. jako [7-8]:

- szybki przełącznik światła w sieci światłowodowej,
- układ do projekcji wolumetrycznej,
- modulator światła w telewizorach podświetlanych od tyłu,
- układ obrazowania układu krwionośnego człowieka,

- kamera 3D do projekcji siatki pomiarowej, a także w
- holografii do zapisu i przechowywania danych cyfrowych,
- mikroskopii, endoskopii i spektroskopii.

Element DMD (rys. 1) jest macierzą mikro-luster (każde o wymiarze $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$) w układzie 1920×1080 luster, gdzie każde mikro-lustro może przyjmować 3 pozycje kątowe względem przekątnej (dwie skrajne i pozycję środkową). Światło odbite od mikro-luster jest kierowane na projekcyjny układ optycznych (obiektyw) a następnie trafia na ekran (w przypadku naświetlania - na polimer). Zaletą macierzy mikro-luster jest to, iż można za ich pomocą rzutować obraz na wybrany przedmiot, np. polimer na płytce drukowanej w formie jasnych i ciemnych pikseli. Odbywa to się w ten sposób, że mikro-lustra odbijające promieniowanie UV prostopadłe do obiektywu tworzą na polimerze układ jasnych pikseli, natomiast pozostałe mikro-lustra, odbijając promieniowanie UV w kierunku pochłaniacza tworzą układ ciemnych pikseli na polimerze. Takie odseparowanie jasnych i ciemnych pikseli daje bardzo duży kontrast w rzutowanym obrazie. Dlatego technologia DMD jest jedną z głównych metod stosowanych obecnie do produkcji płytek drukowanych na masową skalę.



Rys. 1. Element DMD oraz zasada działania mikro-lusterek [5]

Głowica laserowa do naświetlania masek przeciwlutowych

Głównym celem niniejszych prac było opracowanie, zbudowanie i przetestowanie zaawansowanego urządzenia do naświetlania fotopolimerów ciekłych stosowanych w maskach przeciwlutowych. Maski przeciwlutowe są warstwą zabezpieczającą ścieżki obwodu drukowanego przed zwarciem w procesie lutowania podzespołów a także przed przebiciem między ścieżkami, które mogłyby być spowodowane np. nadmierną wilgocią. Należy zwrócić uwagę, że im bardziej skomplikowana jest płytka drukowana, tym większe wymagania musi spełnić maska przeciwlutowa. Wytwarzanie maski przeciwlutowej polega na nanoszeniu płynnej warstwy polimeru na powierzchnię płytki a następnie na utwardzeniu tej warstwy za pomocą np. promieniowania UV.

Główną różnicą pomiędzy fotopolimerem suchym stosowanym przy naświetlaniu schematów ścieżek a fotopolimerem ciekłym do masek przeciwlutowych jest ich docelowa grubość wynikająca z przeznaczenia. Polimery suche usuwa się w procesie strippingu, gdyż służą one jedynie do maskowania powierzchni miedzi w procesie trawienia chemicznego. Natomiast polimery ciekłe, pozostają na płytce jako zabezpieczenie. Dlatego m.in. z tego powodu warstwa polimeru ciekłego na powierzchni płytki jest grubsza (przeważnie w zakresie od 35 do 50 μm)

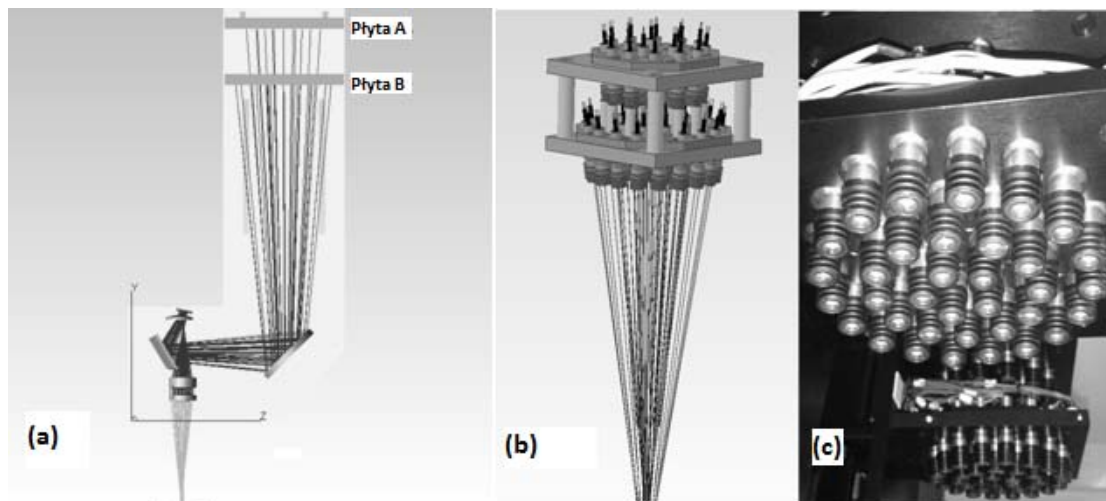
niż warstwa polimeru suchego. Powoduje to, że polimery ciekłe wymagają dużo większej gęstości energii promieniowania UV do ich utwardzenia niż polimery suche. W związku z tym, przy budowie urządzenia do naświetlania masek przeciwlutowych, konieczne jest zastosowanie silnych źródeł promieniowania UV.

W niniejszym artykule zaprezentowano nowy, stosunkowo tani sposób zwiększenia mocy promieniowania UV w urządzeniu do naświetlania masek przeciwlutowych. Istotą tego sposobu jest koncepcja zastosowania głowicy naświetlającej, składającej się z układu tanich półprzewodnikowych laserów UV do wytworzenia promieniowania UV o dużej mocy. W celu sprawdzenia tej koncepcji opracowano specjalny układ mechaniczny składający się z dwóch płyt, w których umieszczono w ruchomych uchwytach 52 półprzewodnikowe lasery UV (długość fali 405 nm, moc wiązki każdego lasera - 200 mW) - rysunek 2. Ilość laserów została dobrana na podstawie specyfikacji technicznej elementu DMD, określającej maksymalną moc promieniowania UV, która nie powoduje degradacji mikro-luster. Prezentowana głowica umożliwia wygenerowanie promieniowania o mocy średniej około 6 W, co przy wymaganej gęstości energii 350 mJ/cm^2 i standardowych rozmiarach płytki drukowanej (45 cm x 60 cm) umożliwia naświetlenie jednej strony płytki w czasie około 120 s. Urządzenie naświetlające wyposażone w 4

głowice naświetla jedną stronę płytki w czasie 30 s. Daje to wydajność około 1400 dwustronnie naświetlonych płytek na dobę.

Każdy z laserów został wyposażony we własną soczewkę, za pomocą której można było odpowiednio „rozogniskować jego plamkę laserową” na powierzchni matrycy mikro-luster DMD. Dzięki temu można było doprowadzić do tego, że każdy z laserów „oświetla” całą powierzchnię matrycy mikro-luster DMD w prawie równym stopniu, co sprzyjało uzyskaniu równomiernego

sumarycznego oświetlenia matrycy przez zestaw 52. laserów. W celu wyznaczenia odpowiedniego kąta padania poszczególnych wiązek laserowych na powierzchnię matrycy mikro-luster DMD opracowano symulację trajektorii tych wiązek w programie TracePro, w którym zastosowano metodę zwaną ray-tracing. Głównym celem tej symulacji było określenie warunków optymalnego zestrojenia trajektorii 52. wiązek laserowych, tak aby oświetlenie powierzchni matrycy mikro-luster DMD było równomierne.

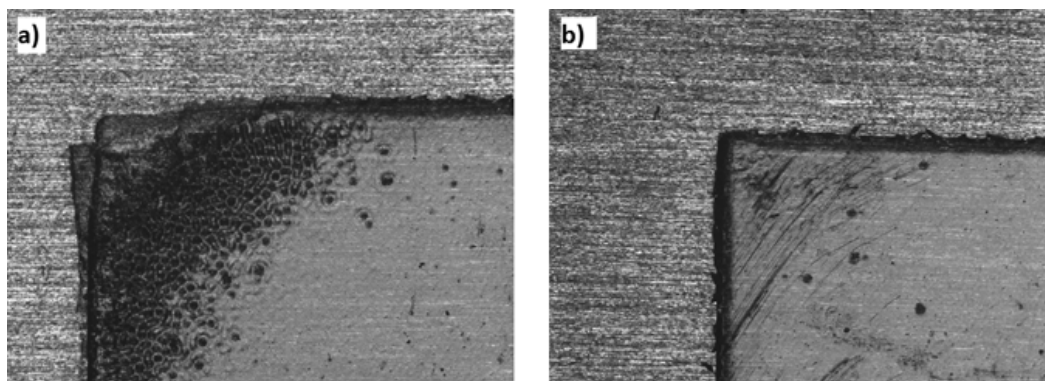


Rys. 2. Symulacja trajektorii wiązek laserowych (a), model CAD głowicy laserowej (b) oraz dwie głowice zamontowane w urządzeniu do naświetlania masek przeciwlutowych (c)

Testy wykazały, że mimo zastosowania zaawansowanego mechanicznie sterowania wiązkami laserowymi, nie udało się uzyskać jednorodnego stopnia utwardzenia warstwy polimeru na powierzchni płytki drukowanej (rys. 3a). Przyczynę tego upatrujemy w niejednorodnym oświetleniu powierzchni polimeru, wynikającym z gaussowskiego profilu poprzecznego rozkładu natężenia promieniowania zastosowanych wiązek laserowych oraz z ich różnych kątów padania na element DMD. Mimo wielu prób, nie udało się skorygować tej wady poprzez optymalizację kierunków padania wiązek laserowych.

W związku z powyższym przetestowana została metoda kompensująca skutki nierównomiernego oświetlenia

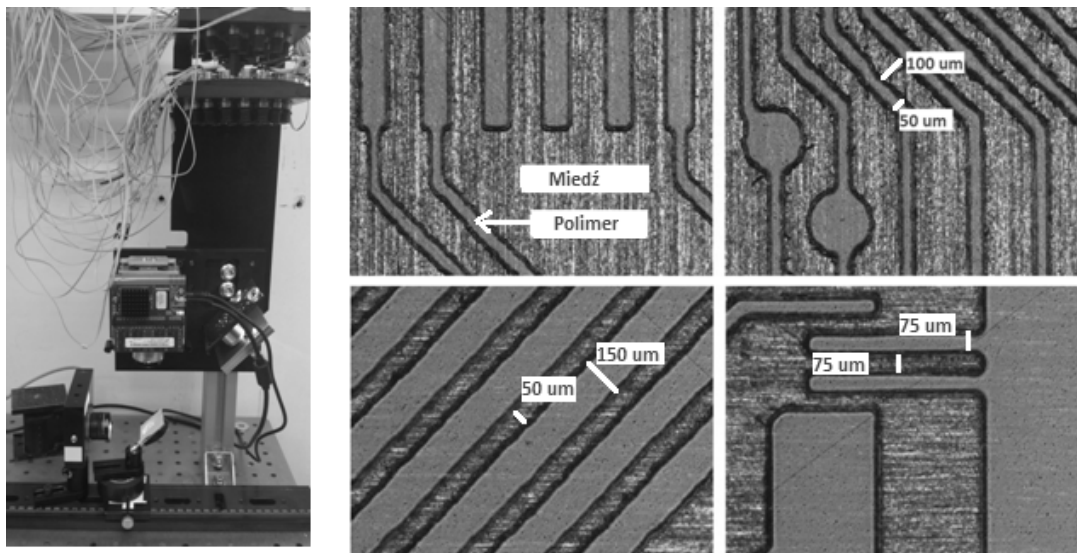
elementu DMD przez głowicę laserową. W metodzie tej zastosowano konwencjonalny sposób produkcji tzw. skali szarości na elemencie DMD, polegający na bardzo szybkim włączaniu i wyłączaniu aktywności wybranych zwierciadeł, czyli na zmienianiu stosunku czasów trybu aktywności mikro-luster „on” i „off”. Dzięki takiej procedurze można było regulować energię promieniowania UV odbijanego przez dane mikro-zwierciadło w kierunku powierzchni polimeru. Po opracowaniu i zastosowaniu odpowiedniego algorytmu korygującego czas działania mikro-luster tak, aby czas naświetlania pikseli dotychczas słabiej oświetlanych uległ wydłużeniu, otrzymano bardziej równomierne oświetlenie powierzchni polimeru a w konsekwencji równomierniejsze utwardzenie jego warstwy (rys. 3b).



Rys. 3. Korekcja rozkładu oświetlenia i utwardzenia polimeru: a) wynik bez korekcji, b) z korekcją

Opracowana głowica laserowa umożliwiła rzutowanie w skali 1:1 obrazu (wzoru maski przeciwlutowej) o rozmiarze 1,4 cm x 1 cm na powierzchnie polimeru za

pomocą obiektywu. Na rysunku 4 przedstawiono otwartą głowicę z układem projekcyjnym oraz przykłady wykonanych masek przeciwlutowych.



Rys. 4. Głowica z układem projekcyjnym oraz przykłady wzorów testowych

Tabela 1. Podstawowe parametry komercyjnego urządzenia ze źródłem o mocy 4 W [9]

Parametr	Płytki HDI	Maski przeciwłutowe
Rozdzielczość [µm]	15 µm x 30 µm	60 µm x 60 µm
Wydajność dla panelu 24 x 18 cali	8 s na stronę przy 15 mJ/cm ² , 6 głowic naświetlających	8 s na stronę przy 50 mJ/cm ² , 4 głowice naświetlające
Wydajność dla panelu 24 x 18 cali	14 s na stronę przy 40 mJ/cm ² , 6 głowic naświetlających	16 s na stronę przy 100 mJ/cm ² , 4 głowice naświetlające
Wydajność dla panelu 24 x 18 cali	16 s na stronę przy 50 mJ/cm ² , 6 głowic naświetlających	31 s na stronę przy 200 mJ/cm ² , 4 głowice naświetlające

Za pomocą opracowanej głowicy laserowej (z oprogramowaniem korygującym) możliwe jest uzyskanie gęstości upakowania ścieżek polimerowych na poziomie 25 µm. Jednakże przy produkcji masek przeciwłutowych nie jest wymagana tak duża rozdzielczość, ponieważ na wierzchnich warstwach płytek drukowanych nie występują mikroskopijne połączenia elektryczne a wymiary elementów elektronicznych (np. SMD) wynoszą setki mikrometrów. Przyjmuje się zatem, że wystarczającą rozdzielczością jest 50 µm, co z powodzeniem zapewnia opracowane w tej pracy urządzenie.

Podsumowanie i dyskusja

W tym artykule zaprezentowano przykład głowicy laserowej do naświetlania polimerów stosowanych przy produkcji płytek drukowanych. Głównym celem prowadzonych prac, było uzyskanie dostatecznie dużej mocy promieniowania UV, które można wykorzystać do szybkiego utwardzania polimerów ciekłych stosowanych do produkcji masek przeciwłutowych. Opracowanie głowicy tego typu ma na celu zbudowanie wydajnego urządzenia naświetlającego, dostosowanego do obecnych wymagań przemysłu. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe wymagania, jakie musi spełniać komercyjne urządzenie naświetlające (używające źródła promieniowania UV o mocy 4 W) do naświetlania płytek HDI oraz naświetlania masek przeciwłutowych. Jak widać w tabeli 1, stosując 4 głowice naświetlające potrzebne jest 31 sekund do naświetlenia jednej strony płytki, przy gęstości energii promieniowania UV 200 mJ/cm². Daje to satysfakcjonującą przemysł wydajność 1400 płytek drukowanych dziennie. Jednakże do produkcji masek przeciwłutowych używa się przeważnie polimery o gęstości energii utwardzania równej 350-500 mJ/cm². Dlatego im większa moc wiązki głowicy

naświetlającej, tym jest ona bardziej przydatna do produkcji masek przeciwłutowych. A zatem opracowana przez nas głowica o gęstości energii 350 mJ/cm² jest atrakcyjna dla przemysłu produkującego płytki drukowane.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Akademia Morska, Wydział Elektryczny, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: jmiz@imp.gda.pl; dr inż. Robert Barbucha, mgr Mateusz Tański, dr hab. Marek Kocik, Instytut Maszyn Przepływowych, ul. Fiszerza 14, 80-231 Gdańsk, E-mail: brobert@imp.gda.pl, tanski@imp.gda.pl.

LITERATURA

- [1] Bruning J.H., Optical Lithography – Thirty years and three orders of magnitude, *SPIE* Vol. 3051, (1997), 14-27
- [2] Barclay B., Morrell M., Laser Direct Imaging – A user perspective, *Leiterplatten Magazine* 7–8, (2001), 1–11
- [3] Barbucha R., Kocik M., Mizeraczyk J., Laser Direct Imaging System for High Density Interconnects on PCB, *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 84, (2008), No 3, 54-56
- [4] Limata UV-P 300 machine from <http://www.limata.de/en/>.
- [5] Dudley D., Duncan W., and Slaughter J., Emerging digital micromirror device (DMD) applications, *Proc. SPIE* 4985, (2003), 14-29
- [6] Dainippon Screen Mercurex machine from <http://focus.ti.com/pdfs/dlpdmd/Mercurex.pdf>
- [7] Favalora G., 2003, Today, most medical imaging systems acquire 3-D data that needs to be compressed to be viewed in standard displays terminals, Perspecta product from Actuality Systems presentation on HIMSS 2003 conference, San Diego CA, Feb. 9-13
- [8] Nesbitt R.S., Smith S.L., Molnar R.A., Benton S.A., 1999, Holographic recording using a Digital Micromirror Device, *Proc. SPIE*, Vol. 3637
- [9] www.visitech.no