

УДК 621.3.095.2

DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15247

*І. Ш. НЕВЛЮДОВ, Є. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, Д. О. НІКІТІН, Д. С. БЛИЗНЮК,
Р. Е. СТРИЛЕЦЬ*

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

СТВОРЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОПОЛІМЕРНИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D ДРУКУ

У цій статті розглянуті можливості застосування адитивних технологій 3D-друку плат із застосуванням фотополімерних принтерів SLA, DLP та LCD. Запропонована в статті технологія, що дозволяє об'єднати в один етап виробничі процеси нанесення маски та експонування, яка відрізняється від традиційного методу фотолітографії. Описаний принцип дії експериментальної установки на базі LCD принтера. В ході експериментів методом фотополімерних масок були отримані зразки тестових друкованих плат, якість яких (підтравлювання торців доріжок, відхилення геометричних розмірів при травленні) порівняли з платою, виконаною з використанням фоторезистивної плівки. У програмі IBM SPSS Statistics були отримані результати досліджень та побудована множинна лінійна регресійна модель впливу технологічних параметрів експонування фотополімерних смол на збереження геометричних розмірів топології друкованих плат.

Ключові слова: *Фотолітографія, експонування, адитивні технології, DLP, SLA, LCD, фото-маски, виробництво.*

Вступ. Сучасний розвиток технологій в області приладобудування направлений, в першу чергу, на мініатюризацію пристроїв і інтеграцію в одному пристрої великої кількості модулів, що в свою чергу призводить до необхідності мініатюризації як виробів в цілому, так і їх окремих компонентів, вузлів і друкованих модулів [1]. Мініатюризація пристрою передбачає як зменшення розмірів радіоелектронних елементів, так і габаритів друкованих плат (ДП) [2]. Процес виготовлення плат за технологією фотолітографії трудомісткий і на створення трафаретів вимагає додаткових витрат матеріалів та обладнання, використання яких в свою чергу не дозволяє швидко перелаштовувати виробництво на створення нових виробів. При сучасних темпах автоматизованого виробництва відсутність подібної гнучкості є істотним недоліком.

Одним з способів вирішення даних проблем є розробка методів адаптації та оптимізації технологічних параметрів експонування топології ДП без резистивних плівок, при виготовленні односторонніх та двосторонніх ДП з використанням фольгованого склотекстоліту та гетинаксу, шляхом використання адитивних технологій 3D друку.

Таким чином, цей підхід може забезпечити не тільки вирішення поставлених проблем, а також отримати необхідні параметри виробництва, такі як:

- збереження геометричних розмірів топології ДП;
- точність позиціонування провідників;
- забезпечення електричної надійності ДП;
- збереження механічної стійкості провідників;
- уніфікація дефектів у топології ДП.

Постановка задачі. Основною задачею дослідження є розробка технології створення провідникової топології ДП з використанням технологій SLA та DLP

3D-друку. Для рішення поставленої задачі необхідно:

- оцінити можливості традиційних технологій виробництва друкованих плат;
- проаналізувати сучасні методи 3D друку фотополімерними смолами – це послужить обґрунтуванням для нового методу, запропонованого в даній статті.

Кінцевим результатом є отримання емпіричних даних, на основі яких будується кореляційно-регресійна модель впливу технологічних параметрів друку на збереження початкових геометричних розмірів топології друкованих провідників.

Дослідження. На початковому етапі процесу фотолітографії поверхню, що обробляється, покривають фоторезистом, який наносять за допомогою аерозолю, або наклеюванням фоточутливої полімерної плівки. Потім через фотошаблон, із заданою топологією плати, фоторезист засвічується. Далі експоновані ділянки видаляються у проявнику. Одержаний малюнок на фоторезисті використовується для подальших технологічних етапів: травлення, електроосадження, вакуумне напилення або інш. [3]. Після проведення одного з цих процесів залишки фоторезиста при проявленні також видаляються (рис. 1).

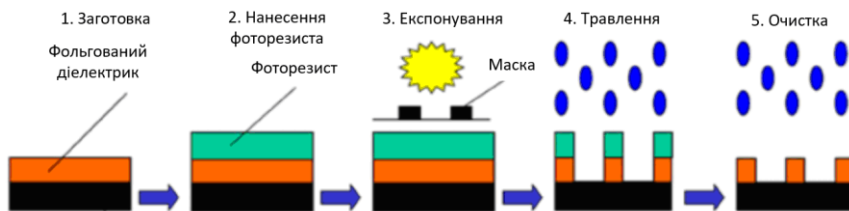


Рис. 1. Спрощена схема фотолітографії для друкованих плат

Експонування може проводитися як із використанням фотошаблону, так і без нього (безмасочна літографія). В останньому випадку малюнок на фоторезисті формується безпосередньо переміщеннями лазерної плями, або електронним променем чи їх групою, сфокусованим на поверхні фоторезиста. При застосуванні фотошаблонів частіше використовуються проєкційні методи експонування, коли малюнок з фотошаблону переноситься на фоторезист з використанням системи оптичних лінз.

Таким чином, процес фотолітографії складається з послідовних етапів: нанесення фоторезиста на виріб і подальше експонування фотошаблону на оброблювану поверхню з наступним травленням. Для кожного етапу необхідні вузькоспеціалізоване обладнання та витратні матеріали. Дорогі, складні в обслуговуванні, габаритні верстати (наприклад установки для прямого експонування) неможливо використовувати в невеликих підприємствах.

При виробництві великих партій кожен етап займає значну кількість часу, для прикладу, при нанесенні фоторезисту аерозолем потрібен час для просушки виробів. Також, в результаті помилки оператора або технічного збою обладнання, на кожному етапі можуть виникнути дефекти на виробі. Для мінімізації цих негативних факторів необхідний більш високий рівень автоматизації, що забезпечує контроль і синхронну роботу всього основного і допоміжного обладнання.

До того ж, на стадії травлення, можливі геометричні відхилення отриманого зображення від вихідної топології ДП, наприклад підтравлювання провідникових доріжок.

Поява технологій адитивного виробництва (3D друку) дозволяє по-новому подивитися на вирішення цієї проблеми. Технології фотополімерного друку мо-

жливо використовувати для маскування окремих ділянок фольгованого діелектрика та подальшого травлення провідникової системи. Дане обладнання дає можливість швидкого переналаштування для виробництва нових виробів, забезпечуючи при цьому високу точність виготовлення [4].

Існують декілька технологій засвічування полімеру в фотополімерних принтерах. З них можна виділити три основних (рис. 2):

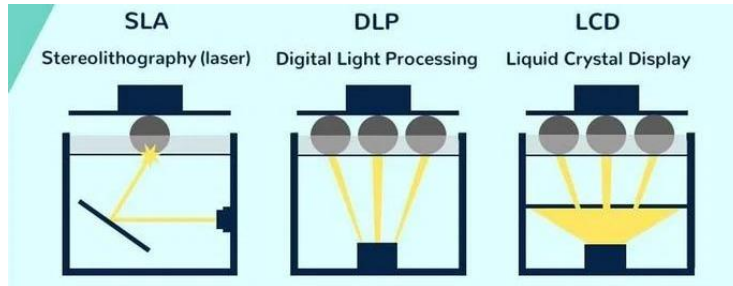


Рис. 2. Види фотополімерних технологій 3D друку

1) SLA технологія (*Selective Laser Sintering*). Спосіб адитивного виробництва (3D-друку) під назвою "стереолітографія", яка полягає в послідовній полімеризації тонких шарів рідкого фоточутливого полімеру променем ультрафіолетового лазера малої потужності. У робочій ємності 3D принтера розташована платформа занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться біля поверхні полімеру, покрита тонким шаром від 20 мікронів до 150 мікрон, на якому лазер починає формувати шар деталі [5].

Модель нарізується на тонкі шари, рівні роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Створивши один шар, принтер занурює платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і створює наступний шар.

Під впливом лазера (його потужність може бути відносно невеликою, що робить принтер дешевше апаратів, які працюють з порошковими матеріалами SLS, SLM і т.д.) полімер твердне, утворюючи стінки майбутнього виробу. Таким чином, шар за шаром, створюється модель цілком. Якщо в ній є навісні елементи, то для них вибудовуються підтримки з того ж полімеру, які потім механічно видаляються. Підтримки в моделі передбачають та створюють в CAD-програмах на стадії проектування моделі.

Перевага такої технології: можливість побудови моделей великих розмірів; велика точність; можливість побудови моделей будь-якої форми та конструкції; низький процент втрати зайвого матеріалу; низький шум роботи.

Недоліки: використання фотополімеру, що є дорожче ніж інші матеріали; висока вартість самого принтеру; необхідність забезпечення високого класу точності при побудові принтера, що забезпечить правильний кут виставлення дзеркала; необхідність точної механіки, що забезпечить знаходження ванни на рівні одного шару від поверхні до платформи; необхідність частого обслуговування принтера;

2) DLP технологія (*Digital Light Processing*). Принцип роботи 3D принтерів, що використовують технологію 3D друку DLP схожий на роботу проектора. Полімер переходить в тверду форму під дією світла (видимого спектру), при чому засвічується відразу весь шар. Потік світла модулюється системою MEMS-мікромеханічними дзеркалами, кожне з яких керується окремо. Залежно від по-

ложення дзеркала, світло або проходить в дану точку шару, або ні. Таким чином, машина має фіксоване логічне розширення – кількість точок по координатам XY [4]. Їх фізичний розмір залежить від того, на якій відстані від джерела випромінювання, в системі мікро дзеркал, перебуває модель. Розмір робочої зони залежить від проектора, від його мінімальної проекційної відстані, на якій зображення має найменший розмір пікселя. Точність принтера залежить від роздільної здатності та розміру робочої зони. Може будуватися з використанням дзеркала, що буде відбивати зображення на платформу з полімером [6].

Недоліком даної технології є залежність від проектора, що встановлює робочу зону та точність по осі XY. Такі проектори мають високу ціну, що також є недоліком. Використання можливо лише з персонального комп'ютера або мікрокомп'ютера, що буде управляти проектором та платою управління. Може мати великі розміри при маленьких розмірах робочої зони, задля забезпечення необхідної відстані від лінз проектора до ванни.

Перевагами є невелика, порівняно з SLA технологією, вартість. Потребує меншої точності виготовлення компонентів. Може мати велику швидкість друку за рахунок великої потужності лампи проектора;

3) LCD технологія (*Liquid Crystal Display*). LCD технологія – технологія подібна до технології DLP, але в своєму складі має LCD екран. Моделі будуються лише знизу-вгору, екран знаходиться безпосередньо під ванною з фотополімером. Екран відображує весь шар моделі, відкриваючи світлі області-пікселі, через які проходить ультрафіолетове випромінювання. Фотополімер засвічується світлодіодною матрицею, зображення формується за рахунок LCD-дисплея, який покадрово виводить переріз формованої деталі. Якщо відмінності класичної SLA технології від DLP та LCD очевидні, то DLP і LCD-технології засвічування часто плутають, що невірно, тому що кожна з цих технологій має свої особливості, які впливають на можливості принтера та якість друку [7].

Недоліком даної технології є залежність робочої області від розміру екрана, точність залежить від екрана та його розміру, на сьогодні більше 10 дюймових екранів на ринку не має, також при такому екрані навіть з розширенням 8K менше ніж 50 мікрон розмір пікселя отримати неможливо. Також відносним недоліком є знаходження екрана безпосередньо під ванною. Ванна складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною в 50-150 мкм, що при невеликих механічних пошкодженнях може пропускати фотополімерну смолу, яка буде потрапляти на екран та електроніку і призводити до можливого загоряння чи пошкодження принтера.

Перевагами даної технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. Порівняно з технологією DLP, перевагою є відсутність спотворення зображення на робочій області. В результаті порівняння можливо зробити висновок, що ці три різновиди технології на сьогодні мають велику область використання, кожна з яких займає свою нішу в побуті та виробництві. Але технологія LCD на сьогодні має найбільший розвиток, завдяки чому має великий науковий інтерес в дослідженні та вдосконаленні технології та її використання [8].

Застосування даних технологій 3D друку дозволить створювати на фольгованому діелектрику маскувальний шар для подальшого травлення. Як маскувальний матеріал використовуються фотополімерні смоли, які є хімічно інертними по відношенню до більшості травників. Таким чином, за рахунок технологій фотополімерного 3D друку, можливо створювати повністю готову маску необхід-

ної товщини і конфігурації [9-10].

При використанні технологій фотополімерного 3D-друку можливо одночасно виконувати етап нанесення маски та експонування (рис. 3).

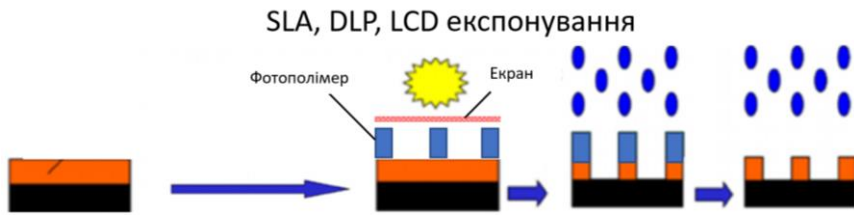


Рис.3. Етапи 3D експонування масок

Такий підхід може бути реалізований за допомогою SLA або LCD технологій друку та має переваги:

- установка безпосередньо експонує задану топологію на заготовку, без попереднього нанесення фоторезистивних плівок або аерозолів;
- немає необхідності в двох окремих установках для нанесення фоторезиста і експонування – все здійснюється одночасно на одній установці, це дозволяє розвантажити виробничі площі;
- так як час засвічування фотополімера від 6 до 14 секунд, що менше часу засвічування фоторезистивних плівок, збільшується продуктивність.

Виходячи з цього був проведений експеримент виготовлення ДП за допомогою LCD технологією. Створену 3D топологію провідників ДП 40×40 мм, перенесли на фольгований склотекстоліт (марки СФ ДСТУ 10316-78) та протравили в розчинні хлорного заліза (FeCl_3) (рис. 4).

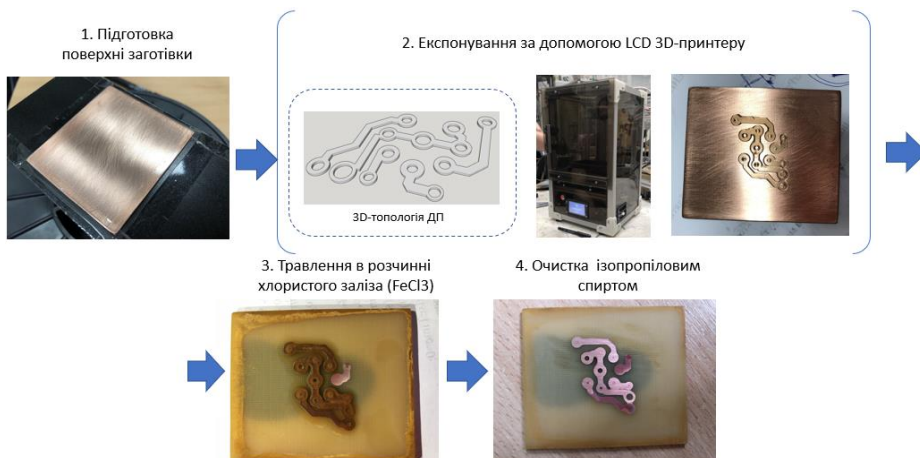


Рис.4. Виготовлення топології ДП за допомогою LCD принтеру

Для виготовлення зразка була використана фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic Orange Transparent, яку було обрано через її високі механічні і технологічні параметри: малий час експонування; мінімальна товщина шару; відсутність шкідливого впливу на персонал; малої усадки при полімеризації; високої стійкості впливу хімічних реактивів.

У першому експерименті була перевірена адгезія фотополімерної смоли до фольгованої заготовки. Результат показує стійкість фотополімерної смоли до

впливу хлористого заліза та гарну адгезію до поверхні, але спостерігається відхилення на $\pm 0,06$ мм при базовому розмірі провідника 2 мм.

Це пов'язано з великою тривалістю засвічування фотополімера в першому експерименті – 17 секунд. Отриманий результат дозволив зробити наступні припущення:

1) існує лінійна залежність тривалості засвічування на геометричний розмір провідника. Чим більше час засвічування, тим більше відхилення розміру в більшу сторону, відповідно при меншому часі засвічування – відхилення менше;

2) при низькій інтенсивності світлового потоку фотополімерна смола може не достатньо полімеризуватись, через неповну прозорість екрану-маски, яка приймає на себе частину випромінювання, це зменшує вплив ультрафіолету на смолу та скорочує термін служби екрану. Таким чином, недолік випромінювання ультрафіолету може привести до слабкої адгезії з заготовкою, в результаті цього при перенесенні топології на заготовку залишиться недозасвічений полімер в напівполімеризованому стані на плівці, що зменшить термін служби плівки, через збільшення переломлення світла на її поверхні, що призведе до збільшення часу засвічування. Недолік інтенсивності світла при слабкій адгезії шару до заготовки може призвести до протравлювання провідників і відхилення розмірів в меншу сторону від початкового;

3) чим більше висота базового шару фотополімерної маски, тим більше зазор між екраном і заготовкою, що може привести до більшої дифракції світлового потоку, відповідно більшого паразитного засвічування провідників.

Для перевірки даних припущень були проведені 40 вимірювань відхилення отриманих розмірів від вихідних геометричних та побудована модель лінійної регресії з урахуванням наступних параметрів:

– тривалість засвічування смоли – від 7 до 16 секунд;

– інтенсивність випромінювання: максимальна – 2800 лм та мінімальна – 1600 лм;

– товщина базового шару – 20 мкм та 50 мкм.

Результати вимірювання відхилень отриманих розмірів від вихідних геометричних розмірів, для побудови моделі лінійної регресії, наведені в таблиці.

Таблиця

Відхилення геометричних розмірів

Товщина шару, 20 мкм										
Інтенсивність світлового потоку, 1600 лм										
Час полімеризації, с	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Відхилення, мм	0,008	0,010	0,011	0,012	0,014	0,017	0,026	0,032	0,046	0,052
Товщина шару, 20 мкм										
Інтенсивність світлового потоку, 2800 лм										
Час полімеризації, с	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Відхилення, мм	0,009	0,01	0,012	0,013	0,015	0,021	0,028	0,035	0,048	0,057
Товщина шару, 50 мкм										
Інтенсивність світлового потоку, 1600 лм										
Час полімеризації, с	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Відхилення, мм	0,009	0,011	0,012	0,012	0,016	0,022	0,029	0,036	0,052	0,061
Товщина шару, 50 мкм										
Інтенсивність світлового потоку, 2800 лм										
Час полімеризації, с	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Відхилення, мм	0,01	0,013	0,015	0,018	0,024	0,03	0,037	0,055	0,063	0,067

Видимо отримані дані, для проведення базового лінійного регресійного аналізу параметрів експонування, в програму *IBM SPSS Statistics* [10]. На рисунку 5,

в графічному вигляді наведена залежність відхилення базових розмірів провідників ДП від часу експонування.

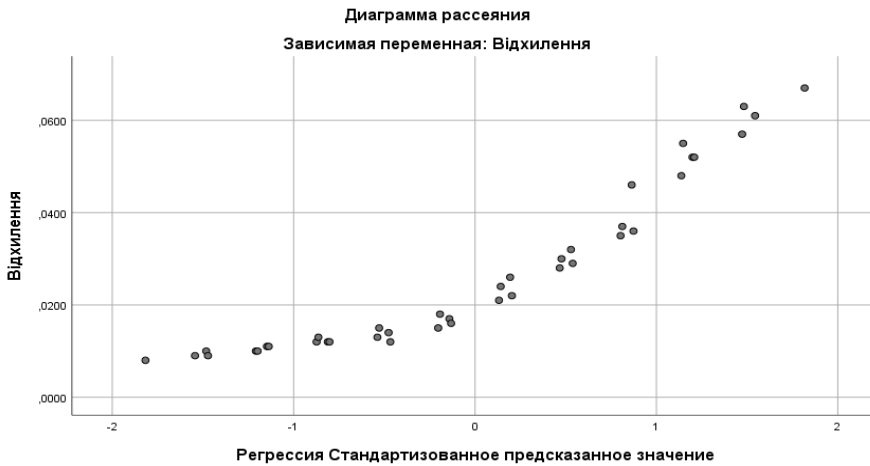


Рис.5. Результати відхилень геометричних розмірів ДП при збільшенні значень параметрів

Використовуючи розрахунки «Зведення для моделі», ми отримує значення коефіцієнта детермінації « R » – 0,936. Це показник є відповідністю розрахованих моделлю значень (ленної регресії) та отриманих експериментальних результатів.

Для більшої точності перевірки отриманий результат перераховуємо на моделі з не стандартизованими передбаченими значеннями (рис. 6, а) та розраховуємо кореляцію параметрів відхилення від стандартизованих значень (розрахованих відхилень) (рис. 6,б).

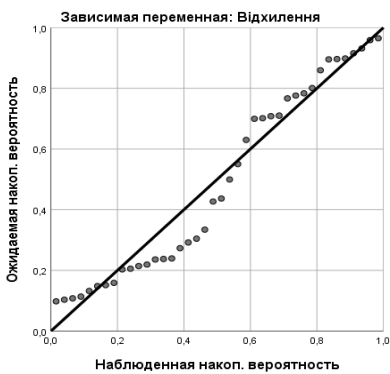
Сводка для модели

Модель	R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	Стандартная ошибка оценки	Изменение R квадрат	Статистика изменений			Знач. Изменение F
						Изменение F	ст.св.1	ст.св.2	
1	,936 ^a	,877	,867	,0065548	,877	85,585	3	36	,000

а. Предикторы: (константа), Интенсивность, Толщина, Час

а

Нормальный P-P график регрессии Стандартизованный остаток



Корреляции

		Відхилення	Unstandardized Predicted Value
Відхилення	Корреляция Пирсона	1	,936**
	Знач. (двухсторонняя)		,000
	N	40	40
Unstandardized Predicted Value	Корреляция Пирсона	,936**	1
	Знач. (двухсторонняя)	,000	
	N	40	40

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).

б

Рис. 6. Результаты расчетов коэффициентов: а – зведені моделі; б – кореляція значень

Значення « R » при повторному розрахунку дорівнює 0,936, який доводить, що кореляція отриманих та передбачених значень існує.

Коефіцієнт множинної детермінації « R^2 » дорівнює 0,877. Це означає, що включені в систему параметри, на 87,7% впливають на результат. Скоригований коефіцієнт « R^2 » дорівнює 0,867 або 86,7%. Стандартна помилка оцінки становить 0,0065548.

За таблицею ANOVA (рис. 7) перевіряємо гіпотезу про рівність « R^2 » = 0. Так як рівень «Значимість» < 0,05, то підтверджуватися вірність попередніх результатів.

Модель		Сумма квадратів	ст.св.	Средний квадрат	F	Значимість
1	Регрессия	,011	3	,004	85,585	,000 ^b
	Остаток	,002	36	,000		
	Всего	,013	39			

a. Зависимая переменная: Відхилення

b. Предикторы: (константа), Інтенсивність, Товщина, Час

Рис. 7. Результати розрахунків значимості

Для визначення ваги кожної змінної використовуємо «*Beta-коефіцієнт*», який показують на скільки змінюється значення параметра від збільшення на одиницю одного з факторів. Для пошуку «*Beta-коефіцієнтів*» розрахунок буде проводитися за допомогою стандартизованих значень «*Z-балів*».

Це необхідно для того, щоб перекоонатися, що стандартизовані значення і нестандартизовані збігаються (рис. 8).

Модель		Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованые коэффициенты	t	Значимость	Корреляции		
		B	Стандартная ошибка				Нулевого порядка	Частично	Компонент
1	(Константа)	2,468E-16	,058		,000	1,000			
	Zscore(Час)	,913	,058	,913	15,621	,000	,913	,934	,913
	Zscore(Товщина)	,164	,058	,164	2,798	,008	,164	,423	,164
	Zscore(Интенсивность)	,130	,058	,130	2,219	,033	,130	,347	,130

a. Зависимая переменная: Zscore(Відхилення)

Рис. 8. Результати розрахунків «*Beta-коефіцієнтів*»

Виходячи з рівня значущості коефіцієнтів можна порівняти, чи відрізнятися «*Beta-коефіцієнт*» даного фактору від нуля. В даному випадку все значення «*Значущості*» менше ніж 0,05, що доводить що всі фактори, які включені в модель вірні.

Результати кореляцій Пірсона факторів на відгук наведені на рис. 9.

		Відхилення	Час	Товщина	Інтенсивність
Відхилення	Корреляция Пирсона	1	,913**	,164	,130
	Знач. (двухсторонняя)		,000	,313	,425
	N	40	40	40	40
Час	Корреляция Пирсона	,913**	1	,000	,000
	Знач. (двухсторонняя)	,000		1,000	1,000
	N	40	40	40	40
Товщина	Корреляция Пирсона	,164	,000	1	,000
	Знач. (двухсторонняя)	,313	1,000		1,000
	N	40	40	40	40
Інтенсивність	Корреляция Пирсона	,130	,000	,000	1
	Знач. (двухсторонняя)	,425	1,000	1,000	
	N	40	40	40	40

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).

Рис. 9. Результати розрахунків кореляцій Пірсона

Висновки. Проведенні експерименти показують, що при використанні тех-

нології фотополімерного 3D-друку, можливо переносити зображення топології на ДП, об'єднавши процеси нанесення фоторезисту та експонування топології одночасно в одній установці. В ході проведення експериментів та побудови лінійної регресійної моделі, на відміну від результатів застосування класичних фоторезистивних плівок, спостерігалася добра адгезія полімеризованого фотополімера до поверхні заготовки ДП, в результаті чого при хімічному травленні вдалося уникнути підтравлювання торців доріжок (рис 10).

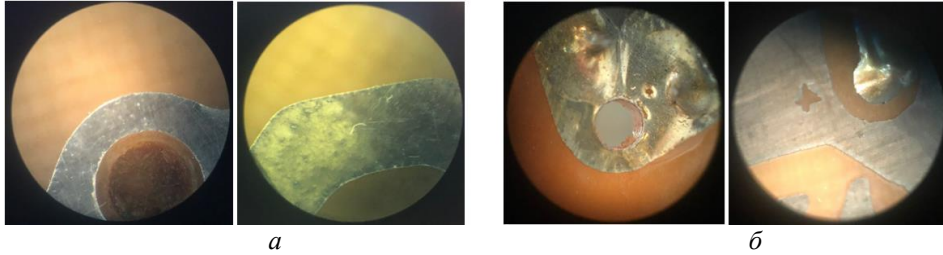


Рис. 10. Порівняння результатів торців доріжок після травлення ДП:
 а – торці доріжок провідників з використанням фотополімерної маски;
 б – торці доріжок провідників з використанням фоторезистивної плівки

Виходячи з отриманих значень «Beta-коефіцієнтів» можливо зробити висновки:

- збільшення на одну одиницю часу впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,931;
- збільшення на одну одиницю інтенсивності випромінювання впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,130;
- збільшення на 30 одиниць товщини впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,164;

Це доводить що найбільш вагомим фактором при 3D-експонуванні є час. Тобто рівняння регресії виглядає таким чином:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 0,11 + 0,931x_1 + 0,130x_2 + 0,164x_3; \quad (1)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

x_1, x_2, x_3 – параметри впливу на фактор.

Але при подальших дослідженнях можливо буде включити в модель додаткові фактори та побудувати більш точнішу регресійну модель, яку можливо буде застосувати при розробці програмного забезпечення для 3D-експонування ДП.

Графіки залежності впливу технологічних параметрів на геометричні розміри топології провідників наведені на рис. 11.

Таким чином використання адитивних технологій 3D-друку дозволяє:

- значно спростити і здешевити виготовлення ДП, виключивши з виробничого процесу етап нанесення фоторезисту на заготовку;
- ефективніше використовувати виробничі площі;
- адаптувати вихідну топологію ДП, враховуючи вплив технологічних факторів (при наявності відповідного програмного забезпечення);
- досягти високої точності виготовлення провідників.

Подальший розвиток запропонованої технології дозволить виготовляти жорсткі та гнучкі ДП повністю, зі струмопровідними доріжками, діелектричною основою, радіоелектронними елементами, які можуть застосовуватися в різних пристроях.

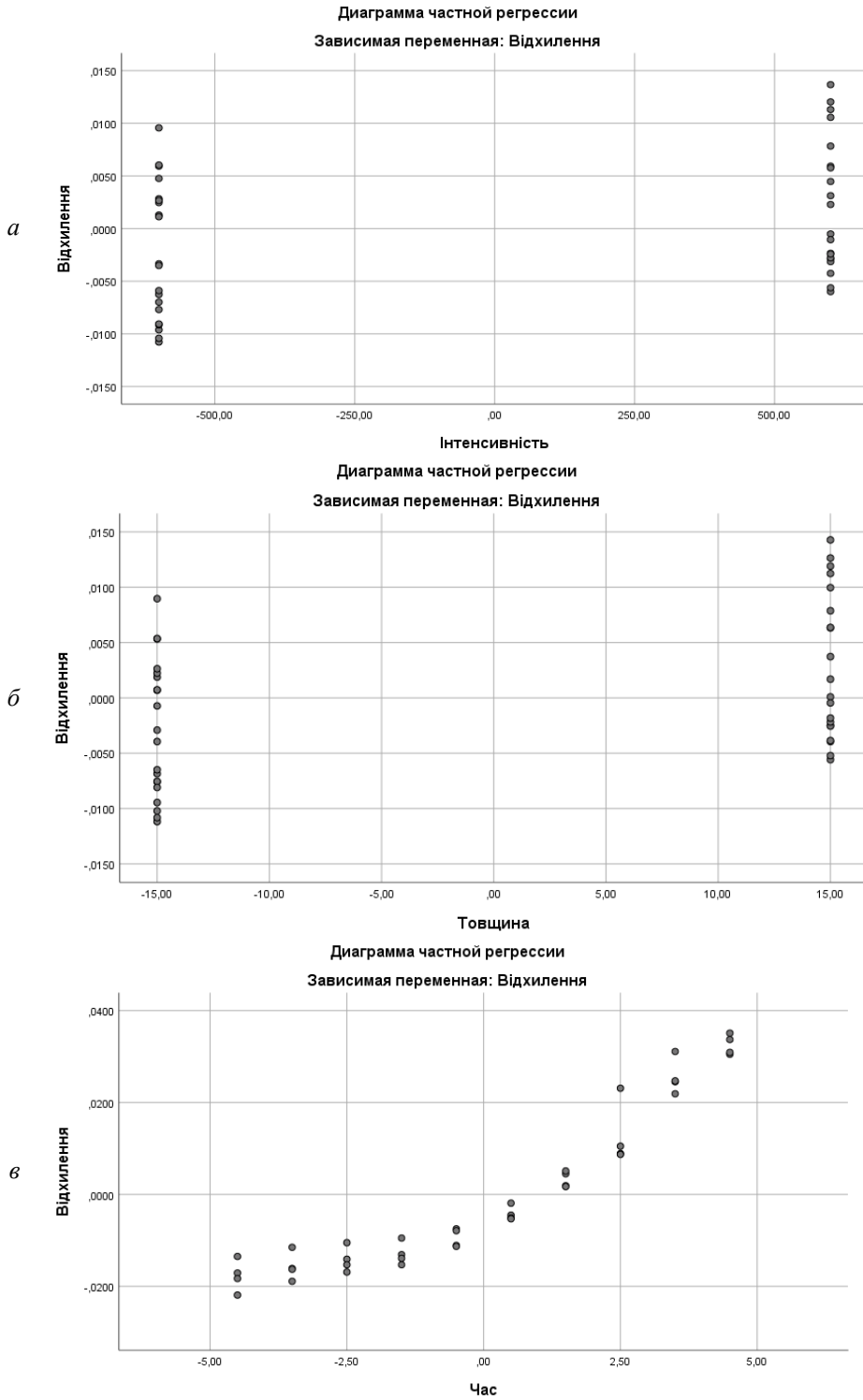


Рис. 11. Відхилення розмірів топології ДП при збільшенні значень факторів: *a* – відхилення при максимальних та мінімальних значень інтенсивності випромінювання; *б* – відхилення при різних значеннях товщини слою; *в* – відхилення від збільшення часу експонування

Список літератури

1. Невлюдов, І., Разумов-Фризюк, С. А., Невлюдова, В., Демська, Н. (2016). Оцінка впливу механічних дій на гнучкі друковані плати. *Проблеми тертя та зношування*, (1 (70)), 143-149. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(70\).10402](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(70).10402)
2. Невлюдов, І. Ш., Тимчук, І. Т., Проценко, М. А., Демська, Н. П. (2018). Новітні конструктивно-технологічні рішення надлегких детекторних модулів для фізичних експериментів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (3 (5)), 67-78. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.5.067>.
3. Vaezi, M., Seitz, H., Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1721-1754. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2>
4. Kumar, S., Bhushan, P., Pandey, M., Bhattacharya, S. (2019). Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS). *Journal of Micromanufacturing*, 2(2), 175-197. <https://doi.org/10.1177/2516598419843688>
5. SL/SLA (стереолитографія) [Електронний ресурс]: Режим доступу : <https://www.jetcom-3d.ru/technology/stereolithography>. (дата звернення: 03.11.2020).
6. Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(9), 1600553. <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
7. DLP (Digital Light Processing) [Електронний ресурс]: Режим доступу : <https://www.jetcom-3d.ru/technology/digital-light-processing>. (дата звернення: 03.11.2020).
8. Jacobsen, A., Jorgensen, T., Tafford, Ø., Kirkhorn, E. (2015). Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads. In *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII* (Vol. 9376, p. 937605). *International Society for Optics and Photonics*. <https://doi.org/10.1117/12.2084962>
9. Современные фотополимерные принтеры 3D-принтеры: лазерные, DLP, LCD [Електронний ресурс]: Режим доступу : <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/modern-photopolymer-3d-printersprinters-laser-dlp-lcd>. (дата звернення: 05.11.2020).
10. Дубнов П.Ю. Обработка статистической информации с помощью SPSS. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 221 с.

Стаття надійшла до редакції 09.02.2021.

Невлюдов Ігор Шакирович – д-р тех. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, igor.nevliudov@nure.ua.

Разумов-Фризюк Євгеній Анатолійович – канд. тех. наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки ievgenii.razumov-fryziuk@nure.ua.

Нікітін Дмитро Олександрович – асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, dmytro.nikitin@nure.ua.

Близнюк Данило Сергійович – старший лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, danylo.blyzniuk@nure.ua.

Стрілець Роман Євгенійович – лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, roman.strilets@nure.ua.

I. NEVLIUDOV, E. RAZUMOV-FRIZYUK, D. NIKITIN, D. BLIZNYUK, R. STRELETS

CREATION OF TOPOLOGY OF PRINTED BOARDS USING PHOTOPOLYMER ADDITIVE TECHNOLOGIES OF 3D PRINTING

The process of boards making using photolithography technology is time consuming and the creation of stencils requires additional costs of materials and equipment, which does not allow quickly adjust production to create new products and the lack of such flexibility is a significant disadvantage. One of the ways to solve these problems is to develop methods for adapting and optimizing the technological parameters of topology exposure the PCB without resistive films. The research object is the process of exposing topological images of printed circuit boards. The research subject is the technological parameters of SLA and DLP for exposing the topology of printed circuit boards. This work purpose is to develop methods for adapting and optimizing the PCB topology exposure technological parameters without resistive films, by using additive technologies of 3D printing. To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks: to assess the possibilities of traditional technologies for the production of printed circuit boards; to analyze modern methods of 3D printing with photopolymer resins; to conduct experimental studies and on their basis to build a correlation-regression model of the influence of technological parameters of printing on the preservation of the initial geometric dimensions of the topology of printed conductors. In solving the problems, the methodology of conducting basic linear regression analysis of exposure parameters in the IBM SPSS Statistics program was used. Conclusions: experiments show that when using the technology of photopolymer 3D printing, it is possible to transfer the image of the topology to the PCB, combining the processes of photoresist and exposure of the topology simultaneously in one installation. During the experiment, in contrast to the results of the use of classical photoresist films, good polymerized photopolymer adhesion to the surface of the PCB workpiece was observed, as a result of which etching of the track ends was avoided during chemical etching. In further research, it will be possible to include additional factors in the model and build a more accurate regression model, which can be used in the development of software for 3D-exonization of PCB.

Key words: photolithography, exposure, additive technologies, DLP, SLA, LCD, photo masks, production.

References

1. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, Ye. A., Nevliudova, V., Demska, N. (2016). Otsinka vplyvu mekhanichnykh dii na hnuchki drukovani platy. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, (1 (70)), 143-149. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(70\).10402](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(70).10402)
2. Nevliudov, I. Sh., Tymchuk, I. T., Protsenko, M. A., Demska, N. P. (2018). Novitni konstruktyvno-tekhnologichni rishennia nadlehykhyh detektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti*, (3 (5)), 67-78. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.5.067>.
3. Vaezi, M., Seitz, H., Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1721-1754. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2>
4. Kumar, S., Bhushan, P., Pandey, M., Bhattacharya, S. (2019). Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS). *Journal of Micromanufacturing*, 2(2), 175-197. <https://doi.org/10.1177/2516598419843688>
5. SL/SLA (stereolithography) [SL/SLA (stereolytohrafiya)] available at: <https://www.jetcom-3d.ru/technology/stereolithography> (last accessed 03.11.2020).
6. Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 302(9), 1600553. <https://doi.org/10.1002/mame.201600553>
7. DLP (Digital Light Processing) [DLP (Digital Light Processing)], available at: <https://www.jetcom-3d.ru/technology/digital-light-processing> (last accessed 03.11.2020).

8. Jacobsen, A., Jorgensen, T., Tafford, Ø., Kirkhorn, E. (2015). Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads. In Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII (Vol. 9376, p. 937605). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2084962>

9. Modern photopolymer printers 3D printers: laser, DLP, LCD [Современные фотополимерные принтеры 3D-принтеры: лазерные, DLP, LCD] available at: <https://3dtoday.ru/blogs/pl32/modern-photopolymer-3d-printersprinters-laser-dlp-lcd> (last accessed 05.11.2020).

10. Dubnov P.Yu. Processing statistical information using SPSS [Обработка статистической информации с помощью SPSS]. – М.: NT Press, 2004. – 221 с.