

УДК 621.373.826:535.015.3:678.675
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.31](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.31)

MECHANISMS OF APPLICATION OF CO₂ LASER MICROMACHINING FOR CONNECTIONS ON PRINTED CIRCUIT BOARDS

МЕХАНІЗМИ ЗАСТОСУВАННЯ СО₂-ЛАЗЕРНОЇ МІКРООБРОБКИ ДЛЯ З'ЄДНАНЬ НА ДРУКОВАНИХ ПЛАТАХ

Dmytro V. Chasnyk
georgpion@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3608-3122

Д. В. Часник,
провідний науковий співробітник

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise, Security Service of Ukraine, Kyiv
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України, м. Київ

Abstract. Purpose. The purpose of this work is to experimentally study the process of forming polymer optical waveguides by laser ablation using an infrared continuous CO₂ laser with a wavelength of 10.6 μm for connections on printed circuit boards. The purpose of the work was to experimentally substantiate the possibility of using this technology to form waveguide structures in photopolymers compatible with the technological cycles of manufacturing printed circuit boards (PCBs), and to determine the optimal laser processing parameters taking into account the requirements for accuracy, depth and quality of microchannels.

Method. The work uses the laser ablation method, chosen as one of the most promising due to its high productivity, non-contact nature of the impact and compatibility with existing technologies of microelectronic production. For micromachining of polymer optical waveguides, an infrared CO₂ laser was used, the choice of which was due to its high energy efficiency, reliability, ease of control and economic feasibility compared to short-wavelength lasers (excimer or Nd: YAG).

Results. The experimental results showed that the ablation depth increases linearly with increasing SED, while the channel width increases logarithmically, which is due to the Gaussian distribution of the laser beam intensity. At SED ≈ 50 mJ / mm, an ablation depth of about 60 μm was observed, which is sufficient for complete removal of the core layer and partial penetration into the lower cladding of the waveguide. The obtained parameter values are consistent with theoretical models of thermal effects and demonstrate the stability of the process during repetition.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in the experimental confirmation of the effectiveness of using a continuous CO₂ laser to form polymer optical waveguides in printed circuit board structures, as well as in establishing the patterns of the influence of the surface energy density of laser radiation on the geometric parameters of microchannels.

Practical importance. Given the simplicity of implementation, reproducibility of results and high accuracy of geometry, the investigated technology of CO₂ laser ablation of polymers can be used as a low-cost alternative to photolithographic methods for the manufacture of optical interconnects. It provides the possibility of integrating waveguide channels directly into the structure of the printed circuit board, which opens up prospects for the creation of hybrid electro-optical systems of a new generation.

Key words: CO₂ laser; laser ablation; optical waveguide; polymer; scanning energy density; optical losses; micromachining.

Анотація. Мета. Метою даної роботи є експериментальне дослідження процесу формування полімерних оптичних хвильоводів методом лазерної абляції з використанням інфрачервоного безперервного СО₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм для з'єднання на друкованих платах. Метою роботи було експериментальне обґрунтування можливості застосування цієї технології для формування хвильоводних структур у фотополімерах, сумісних із технологічними циклами виготовлення друкованих плат (ПХД), та визначення оптимальних параметрів лазерної обробки з урахуванням вимог до точності, глибини та якості мікроканалів.

Методика. У роботі застосовано метод лазерної абляції, обраний як один із найбільш перспективних через його високу продуктивність, неконтактний характер впливу та сумісність із існуючими технологіями мікроелектронного виробництва. Для мікрообробки полімерних оптичних хвильоводів використано інфрачервоний

CO₂-лазер, вибір якого зумовлений високою енергетичною ефективністю, надійністю, простотою керування та економічною доцільністю у порівнянні з короткохвильовими лазерами (ексимерними або Nd: YAG).

Результати. Результати експериментів показали, що глибина абляції лінійно зростає зі збільшенням SED, тоді як ширина каналів зростає логарифмічно, що зумовлено гаусівським розподілом інтенсивності лазерного променя. При SED ≈ 50 мДж/мм спостерігалася глибина абляції близько 60 мкм, чого достатньо для повного видалення шару серцевини та часткового проникнення в нижню оболонку хвилеводу. Отримані значення параметрів узгоджуються з теоретичними моделями теплового впливу та демонструють стабільність процесу при повторюванні.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в експериментальному підтвердженні ефективності застосування безперервного CO₂-лазера для формування полімерних оптичних хвилеводів у структурах друкованих плат, а також у встановленні закономірностей впливу щільності поверхневої енергії лазерного випромінювання на геометричні параметри мікроканалів.

Практична значимість. З огляду на простоту реалізації, відтворюваність результатів і високу точність геометрії, досліджена технологія CO₂-лазерної абляції полімерів може бути застосована як низьковартісна альтернатива фотолітографічним методам для виготовлення оптичних інтерконектів. Вона забезпечує можливість інтеграції хвилеводних каналів безпосередньо у структуру друкованої плати, що відкриває перспективи створення гібридних електрооптичних систем нового покоління.

Ключові слова: CO₂-лазер; лазерна абляція; оптичний хвилевід; полімер; щільність енергії сканування; оптичні втрати; мікрообробка.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні тенденції розвитку інформаційно-комунікаційних систем характеризуються постійним зростанням обсягів передавання даних, що потребує підвищення швидкодії та пропускної здатності апаратних засобів міжкомпонентних з'єднань. У зв'язку з цим інтеграція оптичних хвилеводних інтерконектів у структуру друкованих плат (ПХД) розглядається як перспективний напрям підвищення продуктивності електронних систем. Таке рішення дозволяє замінити традиційні електричні провідники оптичними каналами, що забезпечують значно менші втрати сигналу, відсутність електромагнітних завад і можливість паралельної передачі великого обсягу даних.

Одним із найбільш привабливих підходів до реалізації цієї концепції є застосування оптичних полімерних матеріалів для формування багатомодових хвилеводів. Ці матеріали характеризуються сумісністю з існуючими процесами виробництва ПХД, низькою вартістю, гнучкістю технологічного налаштування та можливістю локальної модифікації оптичних властивостей. У такій структурі серцевина хвилеводу та оболонка виготовляються з полімерів із різними показниками заломлення, що забезпечує повне внутрішнє відбиття (TIR) і локалізацію оптичного сигналу всередині серцевини.

У світовій практиці активно досліджуються різні матеріали для виготовлення полімерних хвилеводів – силікони [1,2], ORMOCER [3], епоксидні смоли [4], акрилати [5]. Вони, як правило, подаються у рідкому стані, полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання, а процес формування мікроструктур здійснюється за допомогою фотолітографії, лазерного прямого запису, струменевого друку або лазерної абляції [6]. Саме лазерна абляція сьогодні розглядається як один із найбільш гнучких і технологічно

сумісних методів для створення хвилеводів у межах ПХД, що і визначає актуальність даного дослідження.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

І ПУБЛІКАЦІЙ

Такими дослідниками як С. Хуан, Л. Фенг та К. Чжан [7] проведено систематичний огляд методів лазерної абляції полімерів для створення мікроструктур у фотонних і оптичних пристроях. Автори детально порівнюють типи лазерів (CO₂, Nd: YAG, ексимерні, фемтосекундні) за параметрами глибини проникнення, термічної дії, точності та шорсткості поверхні. Зокрема, CO₂-лазери розглядаються як ефективний інструмент для теплової мікрообробки полімерів із низьким енергетичним бар'єром, що дозволяє формувати мікроканали без значного пошкодження матеріалу. Визначено ключові параметри – щільність енергії, швидкість сканування та частота імпульсів, що формують мікрорельєф поверхні.

К. Ван, З. Ху та Т. Ван [8] запропонували комплексний огляд CO₂-лазерних технологій обробки полімерів і композитів, що використовуються в електроніці, оптоелектроніці та фотоніці. Автори розглядають енергетичну ефективність CO₂-лазерів, описують термічні ефекти у поверхневих шарах матеріалу, дифузію тепла та вплив структури полімерної матриці на профіль абляції. Особливу увагу приділено оптимізації технологічних параметрів: потужності, тривалості імпульсу, швидкості сканування, фокусної глибини. Показано, що оптимальний діапазон щільності енергії 20–60 мДж/мм забезпечує стабільне формування мікроканалів глибиною до 60–70 мкм без вуглецювання поверхні. Робота наголошує на економічній доцільності CO₂-лазерів у порівнянні з ексимерними системами для масового виробництва, що підтверджує їх придатність до низьковартісної інтеграції оптичних інтерконектів у ПХД.

Дослідження А. Сінгха та П. Рани [9] присвячене оптимізації параметрів лазерного сканування для виготовлення полімерних оптичних хвильоводів із мінімальними оптичними втратами. Автори застосували експериментально-аналітичний підхід на основі моделі енергетичного балансу та чисельного моделювання поширення тепла у полімерному шарі. Визначено, що зменшення оптичних втрат до 0,9 дБ/см досягається при оптимальному співвідношенні потужності до швидкості сканування (аналог SED) у межах 25–40 мДж/мм. Окрім експериментів, запропоновано емпіричну модель прогнозування втрат, яка враховує ширину каналу, залишкову шорсткість і термопружні деформації. Праця є вагомим внеском у розвиток методології параметричної оптимізації CO₂-та UV-лазерних процесів для створення інтегрованих хвильоводних структур.

У документації Exxelis Ltd. [10] представлено детальні характеристики оптичних фотополімерів Truemode™, що застосовуються як серцевинний і оболонковий матеріали для багатомодових хвильоводів. В документації наведено показники заломлення (1,5560 та 1,5265 при $\lambda = 850$ нм), коефіцієнти поглинання ($< 0,04$ дБ/см) та термічну стабільність матеріалу до 260 °C, що дозволяє використовувати його у процесах ламінування ПХД. Крім того, зазначено хімічний склад – акрилатно-метакрилатна матриця з фотополімерними ініціаторами. Це джерело є базовим для вибору матеріалу у практичній реалізації технології лазерного формування хвильоводів, адже визначає фізико-оптичні параметри та технологічну сумісність з CO₂-лазерною мікрообробкою.

Л. Чжан, Ю. Као та Д. Лі [11] узагальнили сучасний стан полімерної фотоніки для високопродуктивних обчислювальних систем (HPC). Основна увага приділена інтеграції хвильоводів у багатошарові друковані плати, а також гібридним інтегральним рішенням (оптика-електроніка).

Авторами проаналізовано тенденції переходу від традиційних оптоволоконних з'єднань до вбудованих полімерних інтерконектів, сумісних із CMOS-технологією. Особливий акцент зроблено на мініатюризації, термостійкості та автоматизованому лазерному записі каналів. Згадуються перспективи застосування CO₂ та UV-лазерів у серійному виробництві фотонних плат. Робота демонструє стратегічне значення лазерних полімерних технологій у контексті переходу до оптичних систем передавання даних у межах обчислювальних модулів нового покоління.

Математичну модель абляції полімерів під дією CO₂-лазерного випромінювання для прогнозування параметрів глибини, шорсткості та зони термічного впливу розроблено такими дослідниками як Р. Чень, Х. Сюй та Дж. Донг [12]. Ці автори поєднали метод скінченних елементів (FEM) із моделлю термодинаміки фазових переходів, що дозволило точно описати

процеси нагріву, плавлення та сублімації в мікромасштабі. Експериментальна валідація підтвердила, що глибина абляції пропорційна щільності енергії (SED) до порогу ~ 60 мДж/мм, після чого настає насичення через теплову дифузію. Висновки роботи мають практичне значення для оптимізації режимів обробки фотополімерів у технологіях виготовлення оптичних хвильоводів і мікрофотонних пристроїв.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Не дивлячись на досягнення у сфері формування полімерних оптичних хвильоводів, залишається низка невіршених технологічних і фізичних проблем, що обмежують їх практичне застосування. Основні з них пов'язані з вибором джерела випромінювання, режимів обробки та контролюваністю мікрогеометрії сформованих каналів.

Використання CO₂-лазера ($\lambda = 10.6$ мкм) як інструмента мікрооброблення полімерів становить особливий інтерес завдяки його високій енергоефективності, невисокій вартості, простоті експлуатації та вже наявному застосуванню в галузі виготовлення друкованих плат (наприклад, для створення мікрівіа-отворів). Проте більшість попередніх досліджень із застосування CO₂-лазера для хвильоводних структур зосереджувалися на модифікації показника заломлення, а не на прямому формуванні геометрії хвильоводу шляхом лазерної абляції.

Недостатньо досліджено вплив потужності лазера, швидкості сканування та відповідної щільності енергії сканування (SED) на глибину та ширину абляційних каналів, а також на оптичні втрати (insertion loss, propagation loss) у сформованих хвильоводах. Відсутність систематизованих даних щодо цих залежностей ускладнює оптимізацію параметрів процесу для досягнення мінімальних втрат сигналу.

Таким чином, незважаючи на масштабність наукових досліджень, питання застосування CO₂-лазерної мікрообробки для оптичних полімерів залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є експериментальне дослідження процесу формування полімерних оптичних хвильоводів методом лазерної абляції з використанням інфрачервоного CO₂-лазера для з'єднання на друкованих платах.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес формування полімерних оптичних хвильоводів у структурах друкованих плат із використанням лазерних технологій мікрообробки.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Закономірності впливу параметрів інфрачервоного CO₂-лазерного випромінювання (зокрема щільності поверхневої енергії, режимів сканування та теплового впливу) на геометричні характеристики, якість

і відтворюваність мікроканалів полімерних оптичних хвилеводів, сформованих методом лазерної абляції.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження, а саме: 1) експериментальні методи – лазерна абляція полімерних матеріалів із застосуванням безперервного CO₂-лазера, вимірювання геометричних параметрів мікроканалів (глибини та ширини абляції); 2) фізичні методи аналізу – аналіз теплової взаємодії лазерного випромінювання з полімерними матеріалами, урахування гаусівського розподілу інтенсивності лазерного променя; 3) методи математичної обробки даних – статистичний аналіз експериментальних результатів, побудова залежностей геометричних параметрів мікроканалів від щільності поверхневої енергії (SED); 4) порівняльний аналіз – зіставлення отриманих експериментальних даних із відомими теоретичними моделями лазерної абляції та теплового впливу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

CO₂-лазер належить до першого покоління комерційних газових лазерів [7, 8] і на сьогодні залишається одним із найпоширеніших інструментів для високоточної термічної обробки матеріалів. У промислових застосуваннях він використовується переважно в режимі безперервного випромінювання (CW), хоча останніми роками активно впроваджуються й імпульсні режими роботи, що розширюють можливості мікрообробки. Такі лазери характеризуються високою енергоефективністю, стабільністю параметрів випромінювання, відносно низькою вартістю експлуатації та високою швидкістю обробки матеріалів [7, 8].

Вихідна потужність CO₂-лазерів може змінюватися в широкому діапазоні – від кількох ват до десятків кіловат, що зумовлює їх використання у різноманітних технологічних процесах: зварюванні, паянні, свердлінні, різанні та термічній обробці [7–10]. Робоча довжина хвилі випромінювання (~10,6 мкм) належить до середнього інфрачервоного діапазону, де основним механізмом взаємодії з матеріалом є теплова дія. Завдяки цьому CO₂-лазери є ефективним джерелом тепла в технологіях, де термічний вплив не лише допустимий, а й бажаний – зокрема, у процесах термообробки та мікроабляції [11].

На відміну від традиційних механічних методів, лазерна обробка CO₂-лазером є безконтактною, що мінімізує механічні напруження та залежить переважно від термічних, оптичних і хімічних властивостей матеріалу-мішені [10]. Наявні публікації [10–12] демонструють можливість застосування CO₂-лазерів для формування оптичних хвилеводів за рахунок зміни показника заломлення полімерних матеріалів. У таких дослідженнях показано, що під дією лазерного випромінювання показник заломлення області, прилеглої до місця абляції, зменшується на величину,

співставну з різницею між серцевиною та оболонкою в оптичному хвилеводі. Таким чином, теплова зона навколо місця опромінення (heat affected zone, HAZ) фактично виконує роль оптичної оболонки, забезпечуючи умови повного внутрішнього відбиття (ПВВ).

Механізм зміни показника заломлення у полімерних структурах має термічну природу й суттєво залежить від типу матеріалу. Як показано у роботі [10], бензоциклобутен (BCB) демонструє зменшення показника заломлення при густині енергії випромінювання 100–180 мДж/мм², тоді як епоксидна смола OPTOCAST 3505 не виявляє жодних змін у зазначеному діапазоні. Отже, випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм не гарантує модифікації оптичних властивостей полімерів, що підтверджує матеріальну специфічність процесу лазерно-індукованих змін.

З фізичної точки зору, механізм взаємодії CO₂-випромінювання з полімером зумовлений тим, що енергія фотонів (~0,1 еВ) є на порядок нижчою за енергію хімічних зв'язків у полімерній матриці (3–8 еВ). Відтак, основним чинником обробки є фототермічний ефект – нагрів, плавлення та сублімація матеріалу, на відміну від фотохімічного руйнування зв'язків, характерного для короткохвильових лазерів.

CO₂- і Nd: YAG-лазери широко застосовуються у виробництві друкованих плат, зокрема для формування міжшарових переходів (microvias) [10]. Це зумовлює технологічну привабливість використання CO₂-лазера і для мікрообробки фотополімерів, що забезпечує повну сумісність з існуючими виробничими процесами PCB.

У дослідженні застосовувалося комерційне джерело інфрачервоного випромінювання CO₂-лазер SYNRAD серії 48, оснащене системою повітряного охолодження. Основна довжина хвилі випромінювання становила 10,6 мкм, а максимальна вихідна потужність – 10 Вт. Лазер функціонував у режимі безперервного випромінювання (CW) з гаусівським просторовим профілем TEM₀₀. Діаметр фокусної плями на рівні інтенсивності 1 / e² становив приблизно 250 мкм, що забезпечувало стабільну концентрацію енергії в зоні обробки.

Керування технологічними параметрами, зокрема вихідною потужністю випромінювання та швидкістю сканування, здійснювалося за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення WinMark Pro. Максимальна досяжна швидкість переміщення променя становила 3000 мм/с, що дозволяло реалізувати широкий діапазон режимів оброблення – від низькоенергетичного термічного впливу до високошвидкісної мікроабляції.

Під час експериментів зразки залишалися нерухомими, тоді як лазерне випромінювання переміщувалося по їхній поверхні за допомогою дзеркальної сканувальної системи, інтегрованої у тракт подачі випромінювання. Такий підхід забезпечував високу

точність позиціонування променя та сталі умови енергетичної дії на об'єкт дослідження.

У ході дослідження у якості базового матеріалу для формування хвелеводних структур використовувався фотополімер Truemode™ (виробництва Exxelis Ltd, Единбург, Велика Британія). Матеріал являє собою ультрафіолетово-затвердну суміш акрилатних і метакрилатних мономерів, доповнену ініціаторами полімеризації та прискорювачами, що забезпечують стабільне тверднення при кімнатній температурі. Така комбінація компонентів забезпечує високу однорідність структури після затвердіння та низький рівень внутрішніх оптичних дефектів.

Визначальною перевагою фотополімеру Truemode™ є надзвичайно низький коефіцієнт оптичного поглинання, який у фотолітографічно виготовлених хвелеводах становить менше ніж 0,04 дБ/см при довжині хвилі 850 нм. Крім того, матеріал характеризується високою термічною стабільністю, що дозволяє використовувати його у стандартних процесах виготовлення друкованих плат, включно з ламінуванням під високим тиском і паянням при підвищених температурах. Завдяки цим властивостям Truemode™ вважається оптимальним матеріалом для оптичних інтерконектів і полімерних хвелеводів, сумісних з технологічними циклами РСВ-виробництва.

Етапи виготовлення одношарового полімерного хвелеводу методом лазерної абляції, використані у цьому дослідженні, наведено на рис. 1.

Підготовка зразків розпочиналася з очищення та висушування підкладок із матеріалу FR4, які використовувалися як базовий носій для нанесення оптичних

шарів. Після цього здійснювалося нанесення фотополімеру Truemode™ методом центрифугування (spin coating) зі швидкістю обертання близько 350 об/хв протягом 30 с. Такий режим забезпечував утворення шару серцевини товщиною 30–50 мкм, що відповідає типовим значенням для багатомодових оптичних хвелеводів.

Формування структури здійснювалося послідовно: спочатку наносився шар нижньої оболонки, який проходив попереднє затвердіння, після чого накладався шар серцевини. Обидва шари полімеру затверджувалися шляхом ультрафіолетового опромінення протягом 3–4 хвилин у азотному середовищі, що забезпечувало процес зшивання полімерної структури та усувало інгібування, викликане наявністю кисню.

Заключним етапом підготовки було термічне відпікання (annealing) полімерних шарів у термошафі при температурі 100 °C протягом 60 хвилин, що сприяло стабілізації структури матеріалу, зменшенню внутрішніх напружень і забезпеченню оптичної однорідності хвелеводного шару.

Для експериментів використовувалися зразки тришарової структури: підкладка FR4, нижня оболонка та шар серцевини (конфігурація FR4 – Lower Cladding-Core). Лазерне випромінювання спрямовувалося уздовж поверхні для утворення лінійних абляційних каналів, причому потужність лазера змінювалася в діапазоні 1–9 Вт, а швидкість сканування – від 20 до 500 мм/с.

Під час обробки за високих потужностей і низьких швидкостей спостерігалися термічні ефекти у вигляді

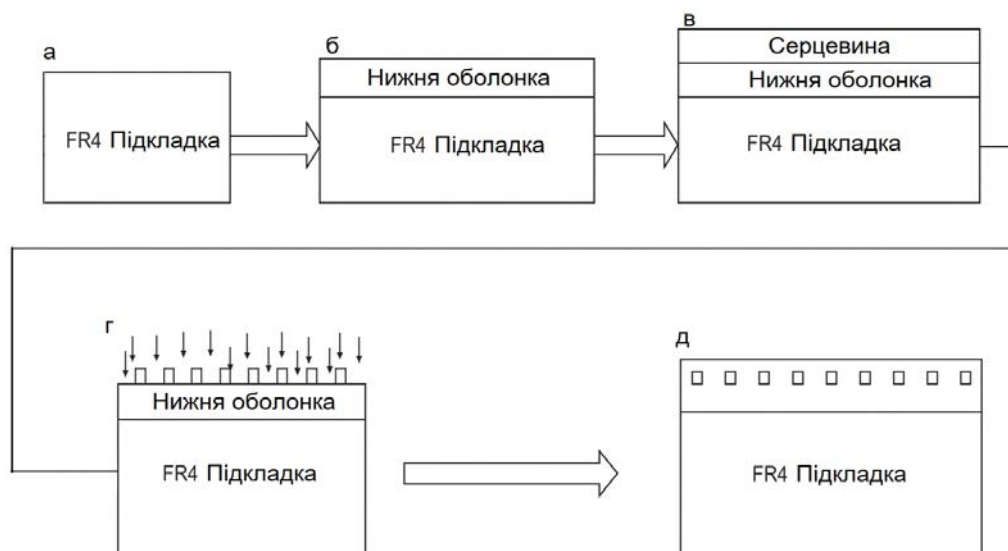


Рис. 1. Схематична діаграма (вид збоку) трьох основних етапів виготовлення оптичних хвелеводів методом лазерної абляції: а) Очищена підкладка з FR4, б) нанесення центрифугуючого покриття на нижню оболонку з подальшим УФ-затвердінням, в) нанесення центрифугуючого покриття на серцевину з подальшим УФ-затвердінням, г) лазерна абляція оптичного шару від серцевини до шару оболонки та д) нанесення верхньої оболонки

локального обуглення поверхні та появи димового шлейфу, що є характерною ознакою теплової природи процесу абляції. Водночас при зменшенні потужності випромінювання та підвищенні швидкості сканування вдалося досягти стабільного формування доріжок без ознак перегріву матеріалу.

Відомо, що процес інфрачервоної лазерної абляції для полімерів має переважно термічний характер [9, 10]. Отже, можна стверджувати, що еквівалентний ефект обробки може бути досягнутий при різних комбінаціях параметрів потужності та швидкості, якщо відношення потужності до швидкості залишається сталим. Наприклад, режими 100 мм/с при 1 Вт і 200 мм/с при 2 Вт забезпечують подібну інтенсивність енергетичного впливу.

На цій основі введено узагальнений параметр – щільність енергії сканування (Scanning Energy Density, SED), який визначається як відношення потужності лазера (P) до швидкості сканування (v), тобто:

$$SED = \frac{P}{v}, \text{ [Дж/мм]} \quad (1)$$

Використання параметра SED дозволило узагальнити результати та побудувати графічні залежності

ширини та глибини абляційних каналів від енергетичної густини, що наведено на рис. 2а, б.

Як показано на рис. 2а, ширина сформованих каналів зростає зі збільшенням SED, однак темп приросту поступово зменшується при вищих значеннях цього параметра. Така поведінка пояснюється гаусівським розподілом інтенсивності променя: зі збільшенням енергетичної густини підвищується інтенсивність випромінювання на периферії плями, що призводить до розширення області абляції поблизу її меж. Відповідно, профіль і глибина каналу залежать від положення енергетичного порогу абляції, який визначається як функція потужності лазера та швидкості сканування.

Як видно з графіка (рис. 2б), між глибиною абляції та щільністю енергії сканування існує практично лінійна залежність. Крім того, порівняння експериментальних точок для різних режимів показало, що зразки, оброблені при параметрах 2 Вт і 50 мм/с та 9 Вт і 200 мм/с (із близькими значеннями SED), мали подібну ширину доріжок і глибину абляції. Це підтверджує, що параметр SED є адекватним інтегральним критерієм для опису процесу CO₂-лазерної абляції полімерів у безперервному режимі (CW).

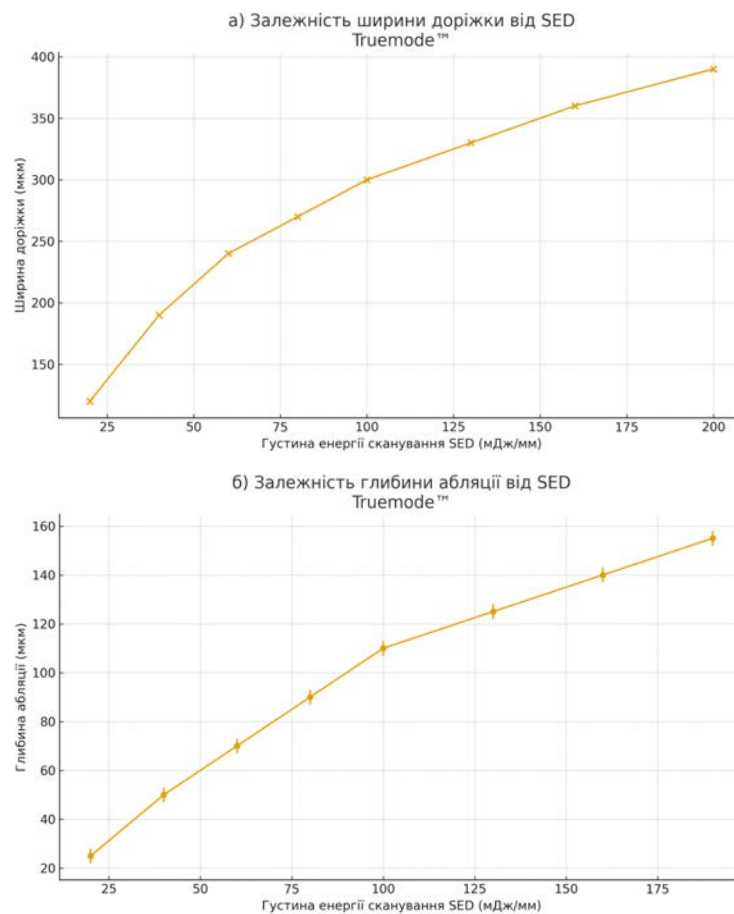


Рис. 2. Графіки мікрообробки, виконаної на оптичному полімері TrueModeTM, що показують зв'язок між: (а) густиною енергії сканування (SED) та результуючою шириною абляційної доріжки, та (б) густиною енергії сканування та глибиною абляції

Таким чином, є можливість стверджувати, що підтримка густини енергії (або SED) у діапазоні 30–50 мДж/мм² створює відповідні структури, необхідні для формування структури багатомодових хвильоводів, оскільки цього було б достатньо для травлення крізь Z30 мм серцевинного шару. Тому можна стверджувати, що значення SED, які поєднують вплив двох змінних параметрів, що використовуються в системі, можуть бути використані як орієнтир для безперервної лазерної абляції полімерних хвильоводів при $l = 10,6$ мм.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто процес мікрообробки оптичного полімеру Truemode™ за допомогою інфрачервоного безперервного CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм, що застосовувався для формування хвильоводних структур. Метод лазерної абляції було обрано серед альтернативних технологій через його практичне поширення у виробництві друкованих плат (зокрема для створення мікроотворів), а також високу продуктивність та точність формування мікроструктур.

Вибір саме CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм зумовлено його технологічною ефективністю, стабільністю енергетичних характеристик і економічною доцільністю у порівнянні з ексімерними лазерами. Це забезпечує спрощення інтеграції оптичних інтерконектів у традиційні технологічні лінії виготовлення ПХД, що є ключовим для зниження вартості оптичних з'єднань.

Під час експериментів вивчалися різні комбінації потужності лазера та швидкості сканування, що

дозволило встановити узагальнений параметр – щільність енергії сканування (Scanning Energy Density, SED), визначену як відношення потужності до швидкості сканування. Показано, що параметр SED адекватно відображає комбінований вплив цих величин на процес мікрообробки, дозволяючи порівнювати режими незалежно від конкретних налаштувань системи.

Отримані результати засвідчили майже лінійну залежність глибини абляції від SED, причому при SED ≈ 50 мДж/мм спостерігалася глибина абляції близько 60 мкм. Такі параметри є достатніми для повного видалення шару серцевини та часткового проникнення в нижню оболонку у типових структурах багатомодових хвильоводів.

Крім того, встановлено, що ширина абляційних каналів змінюється зі збільшенням SED, що пояснюється нерівномірним розподілом інтенсивності гаусівського профілю променя та наявністю порогового рівня абляції. Це свідчить про чутливість геометрії мікроструктур до енергетичних параметрів лазерного випромінювання, що є критично важливим для забезпечення стабільних оптичних характеристик сформованих хвильоводів.

Перспективами майбутніх досліджень є спроби зменшення оптичних втрат за рахунок подальшого вдосконалення процесів полірування торців, застосування оптичних покриттів для узгодження показників заломлення, а також постпроцесингового термічного згладжування поверхонь.

REFERENCES

- [1] Kim, J., Kim, Y., & Lee, J. (2021). Recent advances in polymer optical waveguides for high-speed optical interconnects. *Optical Materials Express*, no. 11(9), pp. 2796–2812. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.424731>
- [2] Zhang, H., Yu, J., & Li, S. (2022). Advances in low-loss polymer optical waveguides for on-board optical interconnects. *Micromachines*, no. 13(5), Article 1145. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13071145>
- [3] Wu, C., Liu, Y., & Zhao, K. (2023). Fabrication and characterization of multimode polymer waveguides by laser direct writing. *Applied Optics*, no. 62(7), pp. 1853–1861. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.482921>
- [4] Li, J., Qian, Y., & Chen, H. (2021). Laser micromachining of optical polymer materials for integrated photonic circuits. *Optics and Laser Technology*, no. 139, Article 106983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106983>
- [5] Tienpont, H., Van Erps, J., & Van Steenberge, G. (2020). Polymer photonic integration for board-level optical interconnects: Recent progress and challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, no. 26(2), Article 8300612. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2944585>
- [6] Sato, T., Takahashi, M., & Nagai, M. (2021). Development of CO₂ laser-based micromachining techniques for optical polymer waveguides. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, no. 31(12), Article 125007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac2c9a>
- [7] Huang, X., Feng, L., & Zhang, Q. (2022). Advances in laser ablation processing of polymers for optical and photonic applications. *Polymers*, no. 14(8), Article 1652. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14081652>
- [8] Wang, C., Hu, Z., & Wang, T. (2023). CO₂ laser processing of composite and polymeric materials: A comprehensive review. *Optics and Lasers in Engineering*, no. 165, Article 107666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107666>
- [9] Singh, A., & Rana, P. (2022). Optimization of laser scanning parameters for low-loss polymer optical interconnects. *Journal of Lightwave Technology*, no. 40(18), pp. 5918–5928. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3172653>
- [10] Exxelis Ltd. (2023). *Truemode™ optical polymer: Technical datasheet (EXX-core 37E / EXX-clad 277)*. Exxelis Ltd.
- [11] Zhang, L., Cao, Y., & Li, D. (2024). Recent developments in polymer photonics and optical interconnects for high-performance computing. *Frontiers of Optoelectronics*, no. 17, pp. 220–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12200-023-01058-9>
- [12] Chen, R., Xu, H., & Dong, J. (2023). Modeling of CO₂ laser ablation on polymer materials for photonic device fabrication. *Applied Surface Science Advances*, no. 16, Article 100435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100435>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kim, J., Kim, Y., & Lee, J. (2021). Recent advances in polymer optical waveguides for high-speed optical interconnects. *Optical Materials Express*, no. 11(9), pp. 2796–2812. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.424731>
- [2] Zhang, H., Yu, J., & Li, S. (2022). Advances in low-loss polymer optical waveguides for on-board optical interconnects. *Micromachines*, no. 13(5), Article 1145. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13071145>
- [3] Wu, C., Liu, Y., & Zhao, K. (2023). Fabrication and characterization of multimode polymer waveguides by laser direct writing. *Applied Optics*, no. 62(7), pp. 1853–1861. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.482921>
- [4] Li, J., Qian, Y., & Chen, H. (2021). Laser micromachining of optical polymer materials for integrated photonic circuits. *Optics and Laser Technology*, no. 139, Article 106983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106983>
- [5] Tienpont, H., Van Erps, J., & Van Steenberge, G. (2020). Polymer photonic integration for board-level optical interconnects: Recent progress and challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, no. 26(2), Article 8300612. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2944585>
- [6] Sato, T., Takahashi, M., & Nagai, M. (2021). Development of CO₂ laser-based micromachining techniques for optical polymer waveguides. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, no. 31(12), Article 125007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac2c9a>
- [7] Huang, X., Feng, L., & Zhang, Q. (2022). Advances in laser ablation processing of polymers for optical and photonic applications. *Polymers*, no. 14(8), Article 1652. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14081652>
- [8] Wang, C., Hu, Z., & Wang, T. (2023). CO₂ laser processing of composite and polymeric materials: A comprehensive review. *Optics and Lasers in Engineering*, no. 165, Article 107666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107666>
- [9] Singh, A., & Rana, P. (2022). Optimization of laser scanning parameters for low-loss polymer optical interconnects. *Journal of Lightwave Technology*, no. 40(18), pp. 5918–5928. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3172653>
- [10] Exxelis Ltd. (2023). *Truemode™ optical polymer: Technical datasheet (EXX-core 37E / EXX-clad 277)*. Exxelis Ltd.
- [11] Zhang, L., Cao, Y., & Li, D. (2024). Recent developments in polymer photonics and optical interconnects for high-performance computing. *Frontiers of Optoelectronics*, no. 17, pp. 220–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12200-023-01058-9>
- [12] Chen, R., Xu, H., & Dong, J. (2023). Modeling of CO₂ laser ablation on polymer materials for photonic device fabrication. *Applied Surface Science Advances*, no. 16, Article 100435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100435>

© Часник Д. В.

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)