

DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2026.28.2.363130>

УДК 621.9.048:535.317

Ю. І. Чегіль, О. М. Буток, Є. В. Беляк, А. А. Крючин

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. М. Шпака 2, 03113 Київ, Україна

e-mail: y.chehil@gmail.com

Технологія прямого лазерного запису мікрорельєфних металевих структур на тонких плівках хрому

Досліджено технологію прямого лазерного запису мікрорельєфних металевих структур на тонких плівках хрому як інструмент формування дифракційних та кодових оптичних елементів. Проаналізовано фізичні механізми взаємодії імпульсного лазерного випромінювання з металевими плівками в наносекундному та фемтосекундному діапазонах, зокрема процеси абляції, теплового накопичення та плазмового екранування. Визначено вплив тривалості імпульсу, частоти повторення, щільності енергії і швидкості сканування на морфологію поверхні, глибину мікроструктур і якість сформованого рельєфу. Встановлено режими експонування, що забезпечують формування висококонтрастних структур із мікронною точністю без термічного руйнування скляної підкладки. Показано можливість формування функціональних елементів без використання фотошаблонів і багатостадійних процесів хімічного травлення, що скорочує технологічний цикл виготовлення.

Ключові слова: *прямий лазерний запис, лазерна абляція, мікрорельєфні структури, тонкі плівки хрому, дифракційні оптичні елементи, імпульсне лазерне випромінювання, мікрообробка матеріалів.*

Вступ

Сучасний розвиток фотоніки та мікрооптичних технологій зумовлює необхідність у високоточному формуванні мікрорельєфних структур на тонких металевих плівках [1]. Методи прямого лазерного запису (Direct Laser Writing; DLW) розглядаються як ефективна безмаскова альтернатива традиційній фотолітографії завдяки високій просторовій роздільній здатності та можливості локальної модифікації матеріалу [2, 11]. У роботах, присвячених лазерній мікрообробці металів, встановлено визначальний вплив тривалості імпульсу, довжини хвилі та щільності енергії на поріг абляції, глибину видалення матеріалу та морфологію сформованої поверхні [2–5, 12]. Показано, що при фемтосекундному опроміненні домінують нелінійні

© Ю. І. Чегіль, О. М. Буток, Є. В. Беляк, А. А. Крючин

процеси багатифотонного поглинання з мінімальною зоною термічного впливу, тоді як наносекундні режими характеризуються розвитком теплопровідності, плавленням і можливим плазмовим екрануванням [5, 7]. Дослідження також підтверджують, що частота повторення імпульсів і швидкість сканування визначають ступінь теплового накопичення та стабільність формування мікроструктур. При підвищених частотах спостерігається кумулятивний ефект, що може призводити до деформації підкладки та погіршення геометричної точності елементів [4–7]. Особливу увагу приділено застосуванню DLW для формування дифракційних і кодових структур, де критичною є відтворюваність мікронних розмірів і контроль глибини рельєфу [1, 13].

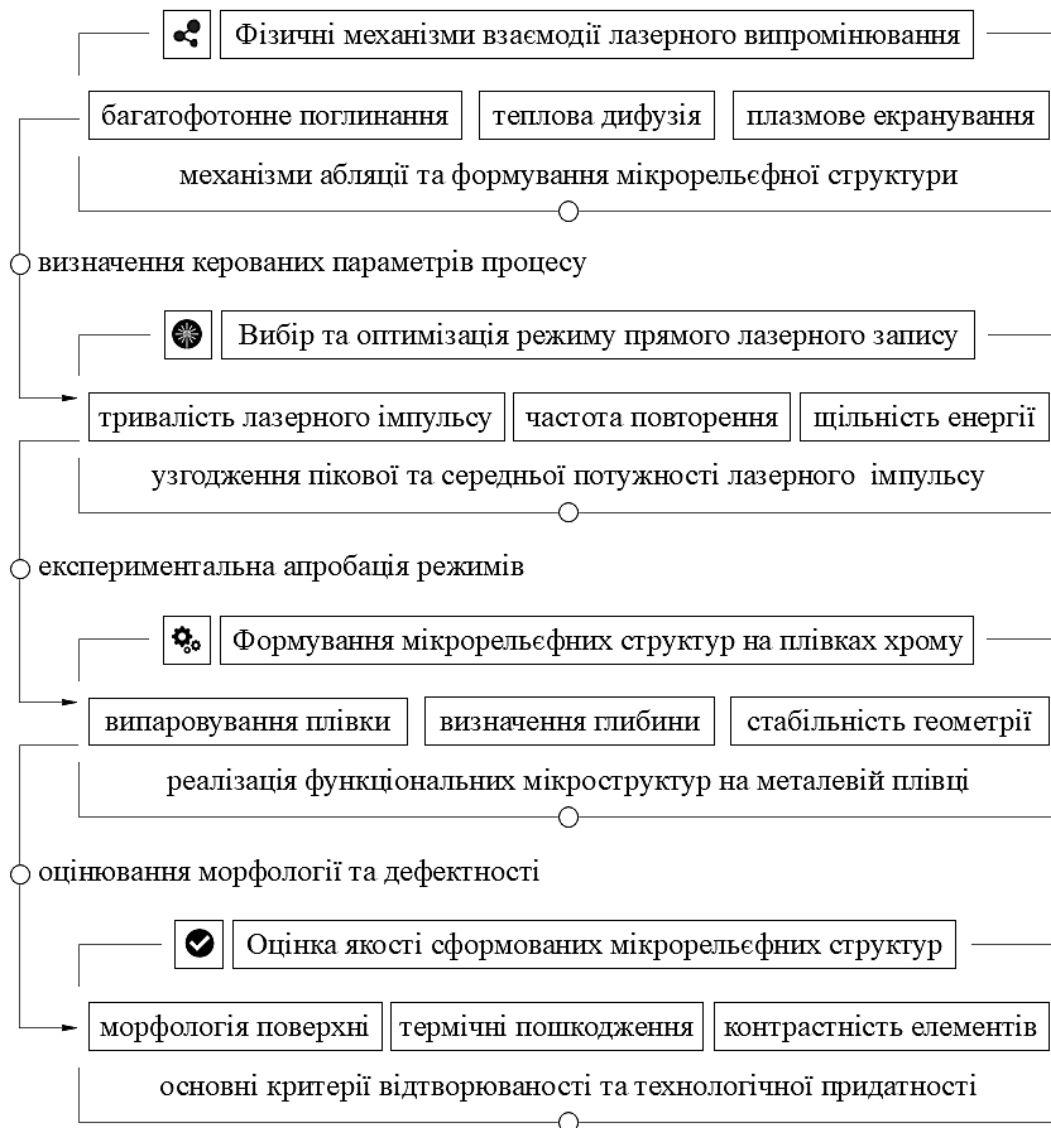


Рис. 1. Структурно-логічна схема дослідження технології прямого лазерного запису мікрорельєфних структур на тонких плівках хрому

Разом із тим питання оптимізації режимів DLW на тонких плівках хрому з метою отримання функціональних оптичних елементів без термічного руйнування скляної підкладки залишається недостатньо дослідженим, що визначає актуальність даної роботи.

Таким чином, **метою роботи** є дослідження технології прямого лазерного запису мікрорельєфних металевих структур на тонких плівках хрому та визначення оптимальних режимів імпульсного опромінення, що забезпечують формування функціональних дифракційних елементів без термічного руйнування підкладки. Для досягнення поставленої мети має бути проведено аналіз фізичних механізмів взаємодії лазерного випромінювання з металевими плівками, обґрунтовано вибір технологічних параметрів експонування та виконано експериментальну апробацію режимів мікрообробки з подальшим оцінюванням якості сформованих структур, як це показано на рис. 1.

Фізичні механізми взаємодії імпульсного лазерного випромінювання з металевими плівками

Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з тонкими металевими плівками визначається сукупністю нелінійних оптичних і теплових процесів, що залежать від тривалості імпульсу, щільності енергії та оптичних властивостей матеріалу. У фемтосекундному, пікосекундному та наносекундному діапазонах реалізуються механізми абляції, пов'язані з багатофотонним поглинанням, лавинною іонізацією, тепловою дифузією і плазмовим екрануванням поверхні [2–5, 12]. Ключовими характеристиками процесу є поріг абляції, глибина видалення матеріалу та морфологія сформованого кратера, які визначають точність формування мікрорельєфних структур. Розуміння цих фізичних механізмів є необхідною передумовою для обґрунтованого вибору режимів DLW і забезпечення стабільності геометричних параметрів сформованих елементів.

Проведений аналіз фізичних механізмів взаємодії імпульсного лазерного випромінювання з металевими плівками свідчить, що ефективно керування процесом DLW потребує формалізації ключових взаємопов'язаних явищ, які визначають енергопоглинання, видалення матеріалу та морфологію сформованої поверхні [7, 12]. З урахуванням особливостей імпульсної дії випромінювання та вимог до точності формування мікрорельєфу доцільно розглядати наступні базові процеси.

1. Моделювання процесу абляції [5, 12] залежно від тривалості лазерного імпульсу. Відповідно до задач дослідження доцільно розглянути наносекундні, пікосекундні та фемтосекундні імпульси, для яких характерні різні механізми енергопередачі та видалення матеріалу, як то термічно зумовлені плавлення й випаровування, ультрашвидке нелінійне руйнування поверхневого шару тощо.

2. Багатофотонне поглинання та лавинна іонізація [10, 12]. При високих інтенсивностях випромінювання реалізуються нелінійні механізми збудження електронної підсистеми, що забезпечують швидке формування електронної плазми та локалізацію енергії в об'ємі взаємодії без значного нагрівання ґратки, сприяючи високоточному формуванню мікрорельєфу.

3. Теплові процеси та кумулятивне нагрівання [4–7]. У режимах із довшими імпульсами істотну роль відіграють плавлення, теплопровідність, конвекція розплаву та теплове накопичення при високих частотах повторення імпульсів, що впли-

вають на глибину абляції, морфологію поверхні та ризик термічного пошкодження підкладки.

4. Плазмове екранування [5, 7] та взаємодія випромінювання з продуктами абляції. Утворення плазмового факела та шлейфу частинок призводить до поглинання й розсіювання енергії наступних імпульсів, що може знижувати ефективність видалення матеріалу та змінювати енергетичний баланс процесу.

5. Поріг абляції як критерій ініціювання видалення матеріалу [5, 12]. Визначення мінімальної густини енергії, необхідної для руйнування поверхневого шару, є ключовим для вибору робочих режимів, що забезпечують точне формування структур без оплавлення та утворення мікротріщин.

6. Формування кратера абляції і морфологія поверхні [5, 7]. Геометрія кратера, зона теплового впливу, повторне осадження матеріалу та шорсткість поверхні визначають відтворюваність і функціональні характеристики мікрорельєфних структур.

Взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з тонкими металевими плівками визначається сукупністю нелінійних оптичних і теплових процесів, характер яких істотно залежить від тривалості імпульсу та енергетичних параметрів опромінення [4–7, 10]. У фемтосекундному режимі енергія передається електронній підсистемі швидше, ніж відбувається теплове розсіювання, що забезпечує локалізоване видалення матеріалу з мінімальною зоною термічного впливу. Для піко-секундних і наносекундних імпульсів тривалість взаємодії порівнянна або перевищує час релаксації енергії, що призводить до плавлення, випаровування та гідродинамічного переміщення матеріалу. У цих режимах фронт випаровування просувається вглиб матеріалу протягом дії імпульсу, що зумовлює збільшення об'єму видаленого матеріалу та розширення зони термічного впливу. За умов ультракороткого імпульсного опромінення ключову роль відіграють нелінійні процеси поглинання енергії [10, 12]. Висока інтенсивність випромінювання спричиняє багатофотонне поглинання та лавинну іонізацію, що приводить до швидкого формування електронної плазми без значного нагрівання кристалічної ґратки. Такий механізм забезпечує високу локалізацію енергії та стабільність структурних змін матеріалу, що дозволяє формувати мікро- і нанорельєф із підвищеною точністю та мінімізувати теплові деформації поверхні. Із переходом до довших імпульсів істотно зростає роль теплових процесів [4–7]. У зоні взаємодії реалізуються плавлення, конвекційні потоки розплаву, випаровування та дифузія тепла в підкладку. При високих частотах повторення імпульсів інтервал між ними може бути недостатнім для повного охолодження матеріалу, що спричиняє накопичення залишкового тепла. Кумулятивні теплові ефекти впливають на морфологію поверхні, сприяють деформації структури та можуть призводити до появи термічних дефектів, особливо при обробці тонких плівок на скляних підкладках

Важливим фактором, що впливає на ефективність абляції, є утворення плазмового факела та шлейфу продуктів випаровування [5, 7]. У процесі опромінення щільна приповерхнева плазма здатна поглинати та розсіювати енергію наступних імпульсів. Поглинання енергії плазмою відбувається переважно за рахунок оберненого гальмівного випромінювання та фотоіонізаційних процесів, інтенсивність яких залежить від електронної густини та довжини хвилі лазера. Для пікосекундних імпульсів, де щільність плазми є підвищеною, екранування може знижувати ефек-

тивність абляції, тоді як у фемтосекундному режимі взаємодія з плазмою є менш вираженою.

Кількісною характеристикою початку видалення матеріалу є поріг абляції, що визначає мінімальну густину енергії, необхідну для ініціювання випаровування або руйнування поверхневого шару [5, 12]. Порогове значення залежить від тривалості імпульсу, довжини хвилі, теплофізичних властивостей матеріалу та умов тепловідведення. Робота поблизу порогових значень забезпечує високу точність формування мікрорельєфу, тоді як перевищення порогового значення може призводити до локального перегрівання, появи мікротріщин і пошкодження підкладки. Абляція металевих плівок супроводжується утворенням кратера, геометрія та морфологія якого визначаються механізмами видалення матеріалу та енергетичними параметрами імпульсу [5, 12]. У фемтосекундному режимі формуються кратери з чітко окресленими межами та мінімальною зоною теплового впливу, тоді як при довших імпульсах спостерігаються розширення зони плавлення, повторне осадження матеріалу та підвищення шорсткості поверхні. Контроль геометрії кратера є критично важливим для забезпечення відтворюваності мікрорельєфних структур.

Таким чином, взаємодія імпульсного лазерного випромінювання з металевими плівками визначається взаємопов'язаними нелінійними оптичними, тепловими та плазовими процесами, що залежать від часових і енергетичних параметрів опромінення. Розуміння цих механізмів створює фізичне підґрунтя для обґрунтованого вибору режимів DLW та забезпечення стабільного формування мікрорельєфних структур.

Вибір та оптимізація режиму прямого лазерного запису

Ефективність прямого лазерного запису мікрорельєфних структур визначається узгодженням часових і енергетичних параметрів імпульсного випромінювання з теплофізичними властивостями матеріалу та умовами тепловідведення. Тривалість імпульсу визначає механізм енергопередачі та глибину зони теплового впливу, тоді як частота повторення імпульсів впливає на теплове накопичення та стабільність формування мікроструктур [4, 7]. Ключовими параметрами є пікова та середня потужності випромінювання, співвідношення яких визначає енергію імпульсу та ефективність абляції. За фіксованої середньої потужності підвищення частоти повторення імпульсів супроводжується зменшенням енергії одного імпульсу та пікової потужності, що може знижувати інтенсивність видалення матеріалу, але водночас сприяти більш рівномірному тепловому режиму обробки. Навпаки, зменшення частоти призводить до зростання пікової потужності й ефективності абляції, проте підвищує ризик локального перегрівання та пошкодження підкладки. Важливим чинником є кумулятивне теплове накопичення, що виникає при недостатньому охолодженні матеріалу між імпульсами та впливає на морфологію поверхні і точність формування структур. У зв'язку з цим оптимізація режимів запису передбачає компроміс між енергією імпульсу, частотою повторення та швидкістю сканування, що забезпечує стабільне формування мікрорельєфу без термічних дефектів.

Дослідження процесів мікрогравірування були спрямовані на оптимізацію режимів лазерної обробки з метою забезпечення контрольованого формування мікрорельєфу та підвищення ефективності видалення матеріалу. У режимах обробки з

низькою щільністю енергії застосовувалося фемтосекундне лазерне випромінювання з високою частотою повторення імпульсів, що забезпечує локалізовану взаємодію з матеріалом та мінімізацію зони термічного впливу [9, 10]. Змінними параметрами обробки виступали щільність енергії лазерного випромінювання, відстань між імпульсами, що відповідає кроку сканування, та поляризація лазерного променя. Ефективність процесу оцінювали за глибиною абляції, швидкістю видалення матеріалу, шорсткістю поверхні та продуктивністю обробки. Додатково досліджувався вплив напрямку поляризації променя на формування кута стінок мікроструктур, що має значення для отримання функціональних профілів.

Як показав проведений аналіз, частота повторення імпульсів є одним із визначальних параметрів, які впливають на ефективність і якість лазерної мікрообробки. Зміна часових інтервалів між послідовними фемтосекундними імпульсами може спричинити два протилежні ефекти:

— теплове накопичення, при якому залишкове тепло сприяє інтенсифікації абляції і підвищенню швидкості видалення матеріалу [4, 7];

— екранування продуктами абляції, де наявність плазми та частинок у зоні обробки призводить до розсіювання енергії лазерного випромінювання та зниження ефективності процесу [5, 7].

Поєднання високочастотних лазерних джерел із швидкодіючими системами відхилення променя дозволяє суттєво підвищити продуктивність мікрообробки, скорочуючи тривалість технологічного циклу. Наприклад, при частоті лазерних імпульсів 1 кГц на поверхню подається близько 10^3 імпульсів за секунду, тоді як при 50 кГц — 5×10^4 імпульсів, що істотно прискорює формування мікроструктур [3–6]. Разом із тим зі збільшенням частоти повторення імпульсів зменшується інтервал між ними, внаслідок чого тепло не встигає розсіюватися, а продукти абляції лишаються в робочій зоні. Це спричиняє накопичення енергії в матеріалі, виникнення термічних спотворень і часткове екранування наступних імпульсів плазмою та конденсованими частинками. Як наслідок, глибина мікроотворів перестає збільшуватися або набуває нерівномірного профілю, що негативно впливає на точність і якість мікрообробки. Таким чином, при ультракороткоімпульсному опроміненні оптимальний вибір частоти повторення є критично важливим для забезпечення стабільної морфології, контрольованої глибини та високої ефективності процесів мікрогравірування і формування тривимірних структур.

В імпульсних лазерах із модуляцією добротності (Q-switching) підвищення частоти повторення імпульсів супроводжується зменшенням енергії окремого імпульсу E_p , а отже — зниженням пікової потужності та ефективності абляції. Це пояснюється тим, що середня потужність випромінювання P_{avg} розподіляється між більшою кількістю імпульсів за одиницю часу. Пікова потужність імпульсу визначається співвідношенням $P_{peak} = E_p / t_p$, де t_p — тривалість імпульсу. Енергія імпульсу, своєю чергою, пов'язана із середньою потужністю та частотою повторення $E_p = P_{avg} / f$. Зі зростанням частоти імпульсів середня потужність розподіляється на більшу їх кількість, що призводить до зменшення пікової потужності. Це співвідношення визначає компроміс між продуктивністю процесу та точністю мікрообробки і є ключовим при налаштуванні технологічних параметрів для створення мікрота наноструктур у MEMS-пристроях [2, 12]. На рис. 2 схематично показано взаємозв'язок між піковою потужністю, середньою потужністю, тривалістю імпульсу

Δt та періодом повторення $T = 1/R$. Із підвищенням частоти повторення пікова потужність зменшується, що безпосередньо впливає на ефективність процесів лазерної абляції і формування рельєфних мікроструктур.

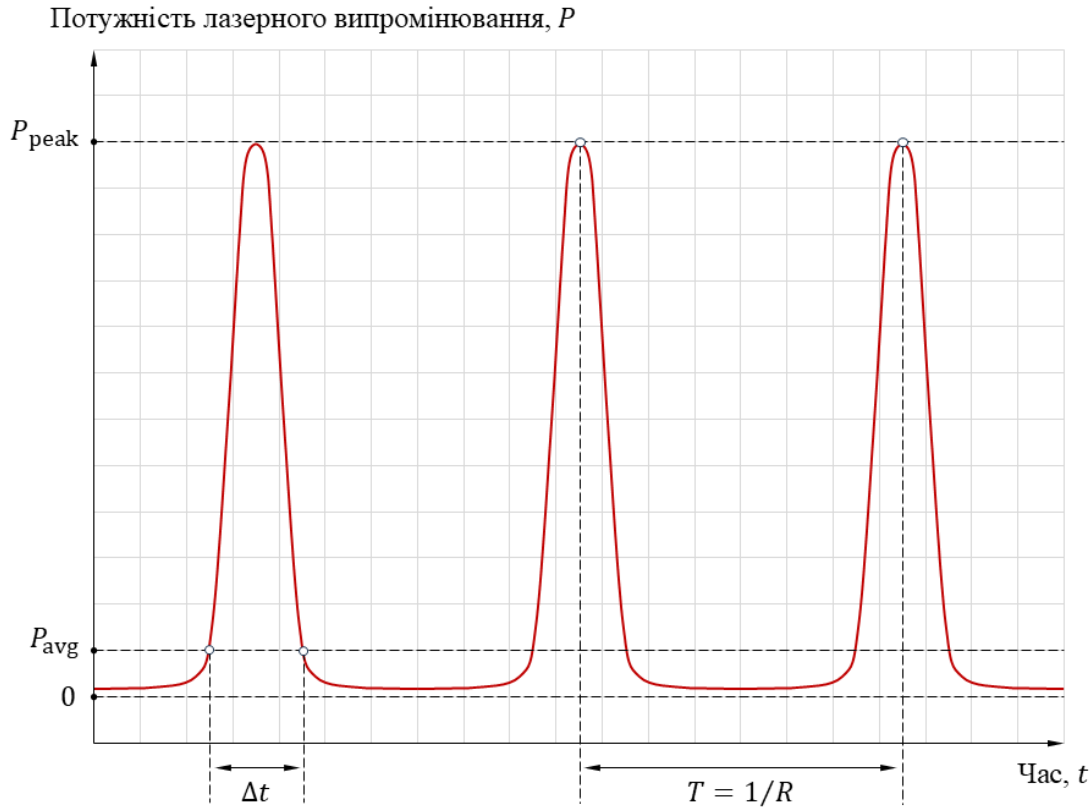


Рис. 2. Часова структура імпульсного лазерного випромінювання та співвідношення пікової і середньої потужностей [6]

Значною перевагою лазерної мікрообробки є можливість формування рельєфних структур з мікрометричною точністю за умови використання оптимально узгоджених параметрів опромінення, при яких теплові ефекти залишаються мінімальними. Водночас невідповідне поєднання високої щільності енергії, підвищеної частоти повторення імпульсів та низької швидкості сканування може призводити до накопичення залишкового тепла у приповерхневих шарах, що спричиняє термічні пошкодження та погіршення функціональних властивостей сформованих структур [7]. Ступінь теплового впливу визначається як параметрами обробки, так і теплофізичними характеристиками матеріалу. За умов, коли матеріал встигає охолоджуватися між імпульсами, що є характерним для відносно низьких частот, щільність потужності випромінювання стає визначальним параметром, оскільки саме вона задає механізм абляції і, відповідно, морфологію та властивості обробленої поверхні. При роботі на високих частотах повторення імпульсів реалізуються кумулятивні теплові ефекти, оскільки характерні часи теплопровідності, що становлять мікросекунди, не забезпечують повного охолодження матеріалу. Додатковим фактором є екранування наступних імпульсів продуктами абляції і плазмовим шлейфом, які залишаються поблизу поверхні протягом наносекундно-мікросекундних інтервалів і таким чином можуть знижувати ефективність поглинання енергії.

Отже, оптимізація режимів DLW передбачає компроміс між щільністю енергії, частотою повторення імпульсів і швидкістю сканування, що дозволяє мінімізувати теплові спотворення, уникнути екранування випромінювання та забезпечити стабільне формування мікрорельєфних структур із заданими геометричними параметрами.

Дослідження результатів формування мікрорельєфних структур на плівках хрому

Експериментальне дослідження формування мікрорельєфних структур на тонких плівках хрому має бути спрямоване на оцінювання технологічних можливостей методу DLW і визначення умов, за яких забезпечується стабільне відтворення заданої геометрії мікроелементів. У процесі обробки мають варіюватися енергетичні та кінематичні параметри випромінювання з метою узгодження режимів абляції з теплофізичними властивостями плівки та підкладки, що дозволяє мінімізувати термічні спотворення і забезпечити контрольоване формування рельєфу [7, 12]. Оцінювання результатів при цьому здійснюється за критеріями геометричної точності, рівномірності рельєфу, стабільності відтворення мікроструктур та загальної якості поверхні після обробки. Отримані зразки включають тестові елементи, калібрувальні мітки та функціональні мікрорельєфні структури різної конфігурації, що дозволяє комплексно оцінити можливості технології щодо формування регулярних і складних топологій.

У безмаскових методах літографії, що набули широкого застосування під час виготовлення дифракційних та мікрооптичних елементів, технологія прямого лазерного запису на фоторезистах із подальшим вибірковою травленням вважається однією з найефективніших завдяки високій просторовій роздільній здатності та відтворюваності результатів [1, 9–11]. Вона забезпечує формування мікроструктур із характерними розмірами елементів на рівні сотень нанометрів без використання фотошаблонів, що істотно спрощує технологічний цикл і зменшує ризик дефектів, пов'язаних із багатостадійною обробкою. Зазначається, що формування мікрорельєфних структур безпосередньо під час лазерного опромінення металевих плівок дозволяє виключити фотолітографічні та травильні операції. Таким чином, методи лазерного мікрогравірування привертають значну увагу завдяки своїй технологічності, гнучкості налаштування та можливості прямого формування функціональних елементів. Як було зазначено вище, завдяки точному контролю параметрів експонування забезпечується відтворення як простих геометричних елементів, так і складних растрових зображень з мікронною деталізацією. Такий підхід дозволяє безпосередньо формувати функціональні компоненти оптичних носіїв, дифракційних структур і кодових елементів без додаткових етапів обробки.

Приклади мікроструктур, сформованих методом DLW на плівках хрому, наведено на рис. 1. Зокрема, на рис. 1,а показано спіральний мікроелемент, сформований із високою точністю позиціонування променя; рис. 1,б демонструє тестові мікроелементи з кодовими комірками та калібрувальними мітками; на рис. 1,в представлено ділянку з'єднання мікроканалів у зоні фокусування лазерного випромінювання; загальний вигляд сформованих структур після серії записів наведено на рис. 1,г. Отримані результати підтверджують високу точність відтворення елементів, стабільність геометрії і рівномірність формування мікроструктур по всій площі запису.

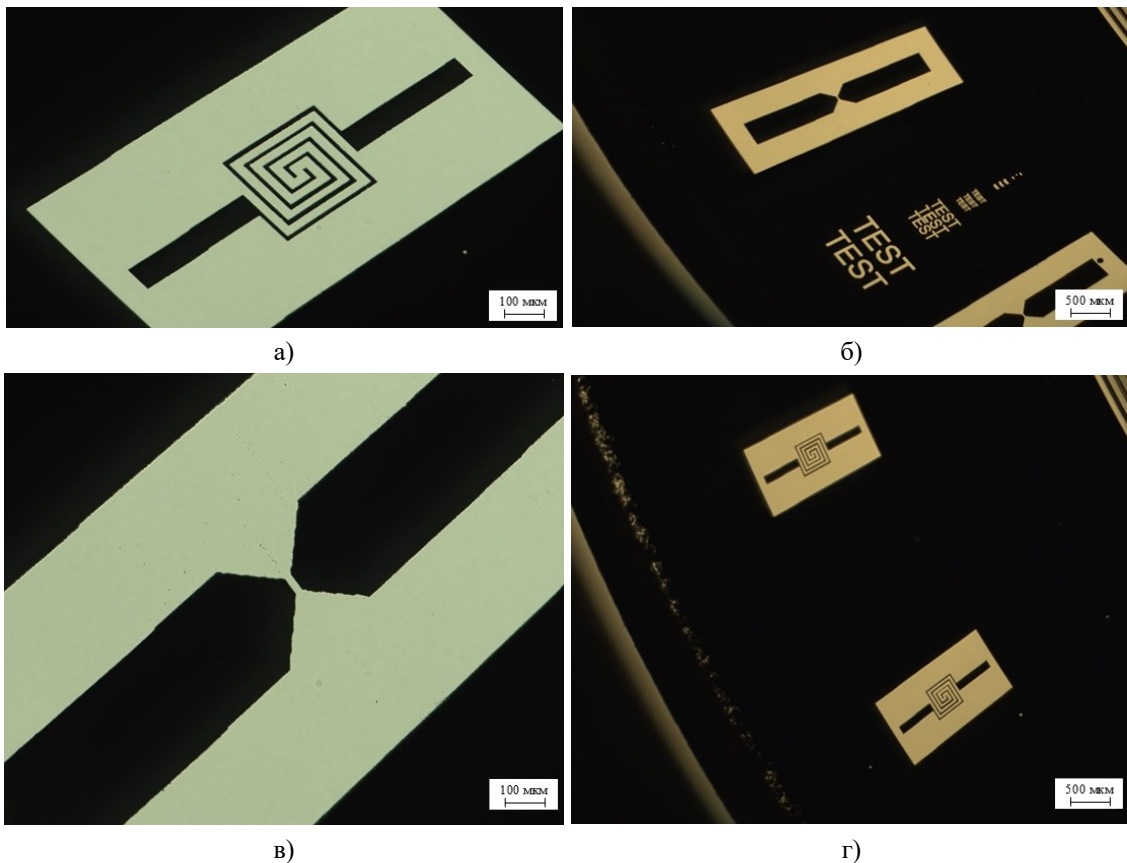


Рис. 3. Мікрофотографії структур, сформованих методом DLW на плівках хрому: а) фрагмент спірального елемента; б) тестові мікроелементи з кодовими комірками; в) з'єднання мікроканалів; г) структури на підкладці після серії записів [2–4]

Взаємодія фемтосекундного лазерного випромінювання з матеріалами має принципово відмінний характер порівняно з довгоімпульсними режимами і визначається нелінійними процесами багатопотонного поглинання. За високої інтенсивності сфокусованого променя енергія передається електронній підсистемі матеріалу протягом короткого часу, ініціюючи лавинну іонізацію до того, як відбувається істотна теплопередача до кристалічної ґратки. Унаслідок цього формуються стабільні структурні зміни з мінімальною зоною термічного впливу, що є ключовою передумовою високоточного мікроструктурування. Фемтосекундний прямий лазерний запис (Femtosecond Direct Laser Writing, FDLW) широко використовується для створення мікро- та наноструктур із високою просторовою роздільною здатністю [8–12]. Морфологія сформованих структур істотно залежить від параметрів випромінювання та режимів обробки, зокрема профілю променя, швидкості сканування, частоти повторення імпульсів, поляризації та середньої потужності. Хоча просторову роздільну здатність лазерного мікроструктурування обмежують дифракційна межа та теплові процеси, використання короткохвильового фемтосекундного випромінювання дозволяє значною мірою подолати ці обмеження та реалізувати формування структур із субмікронними розмірами. Застосування ультракоротких імпульсів суттєво розширило можливості прецизійного формування мікроелементів у нанофотоніці, сенсорних платформах, фотонних кристалах і мікроелектроніці. Особливого значення набуває мікрообробка металевих плівок на підкладках, яка

використовується для створення фотоелектричних перетворювачів, тонкоплівкових кодових структур, прозорих провідних шарів для дисплеїв та мікросенсорних елементів. У таких технологічних процесах застосовуються як наносекундні, так і фемтосекундні лазери: перші забезпечують ефективне видалення матеріалу, тоді як другі дозволяють мінімізувати теплову дифузію та отримувати рельєф із топологічною точністю на рівні десятків нанометрів. Під час наносекундної абляції переважають термічні процеси, такі як плавлення, випаровування, кипіння та конвекційні явища, що істотно впливають на морфологію поверхні. Натомість фемтосекундна обробка забезпечує локалізоване випаровування матеріалу та формування чітких контурів мікрорельєфу з мінімальною шорсткістю. Завдяки цьому фемтосекундна лазерна обробка тонкоплівкових структур стала ефективною технологією виготовлення оптичних елементів і мікропристроїв, що знаходять застосування у сенсорних системах, фотоніці, візуалізаційній техніці, електроніці, медицині та мікроелектромеханічних системах (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS). Особливо важливу роль фемтосекундні імпульси відіграють при абляції металевих плівок, оскільки забезпечують надвисоку точність локального видалення матеріалу, відтворення складних растрових структур і мінімальну зону термічного впливу [7]. Такий підхід відкриває можливість прямого формування функціональних мікрорельєфних елементів без застосування фотолітографічних або хімічних процесів, що істотно скорочує технологічний цикл і підвищує відтворюваність результатів.

Аналіз якості мікрорельєфних металевих структур, сформованих методами лазерного запису

Для оцінювання якості сформованих мікрорельєфних структур та визначення граничних режимів обробки було проведено експериментальні дослідження прямого лазерного запису на тонких плівках хрому, нанесених на прозорі підкладки. Метою зазначених досліджень було встановлення впливу параметрів лазерного опромінення на морфологію поверхні, цілісність підкладки та відтворюваність мікроелементів. Особливу увагу приділено аналізу дефектів, що виникають при перевищенні порогових енергетичних режимів, а також визначенню умов стабільного формування структур без термічного пошкодження матеріалу. У межах дослідження проаналізовано характерні ознаки поверхневої морфології, мікропошкоджень та зон локальної деформації, що виникають у процесі абляції. Окремо розглянуто вплив параметрів експонування на формування дефектів, шорсткість поверхні та точність відтворення геометрії елементів. Отримані результати дозволяють визначити граничні режими обробки та встановити параметри, за яких забезпечується стабільне формування мікрорельєфу, що є критично важливим для виготовлення дифракційних оптичних елементів, кодових дисків та інших функціональних структур.

У ході експериментальних досліджень формування мікрорельєфних структур здійснювалося на тонких хромових плівках товщиною 180–200 нм, нанесених на прозору підкладку, з оптичною щільністю 2,3–2,5 на довжині хвилі 1,06 мкм. Обробка виконувалася методом прямого лазерного запису шляхом локального випаровування матеріалу сфокусованими імпульсами лазерного випромінювання, що дозволило формувати графічні структури без застосування додаткових фотолітографічних або хімічних операцій. Для реалізації процесу використовувався інфра-

червоний лазерний гравер «Raycus 30W RA20», який забезпечує стабільне енергетичне навантаження у режимі імпульсної генерації. Запис структур здійснювався за швидкості сканування лазерного променя 300 мм/с, вихідної потужності 3 Вт і частоти повторення імпульсів 40 кГц. Зазначені параметри забезпечили формування чітких висококонтрастних зображень із точним відтворенням меж елементів та рівномірною глибиною абляції. Результати експерименту наведено на рис. 4, де продемонстровано приклади сформованих растрових структур, що підтверджують ефективність прямого лазерного запису для створення мікрорельєфних кодових і дифракційних елементів [13, 14]. Мікрозображення на рис. 4,а демонструє мікроструктури лінійного типу, що отримані при скануванні сфокусованого лазерного променя, який характеризується рівномірною шириною та стабільною геометрією по всій довжині елементів, у той час як на рис. 4,б представлено тестові лінійні елементи, які ілюструють однорідність абляції та високу чіткість меж сформованих структур.

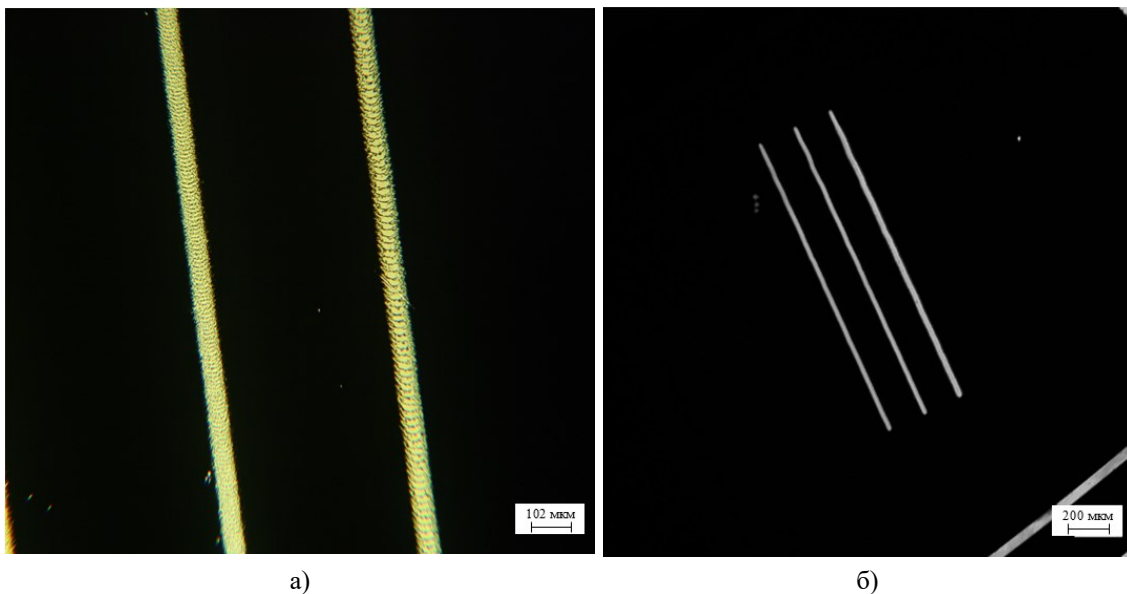


Рис. 4. Мікрозображення, сформовані методом прямого лазерного випаровування хромових плівок за допомогою інфрачервоного гравера «Raycus 30W RA20»: а) мікроструктури лінійного типу; б) тестові лінійні елементи [13, 14]

При виборі оптимального режиму абляції для лазерної мікрообробки металевих плівок необхідно враховувати компроміс між високою швидкістю видалення матеріалу та збереженням цілісності оброблюваної поверхні. Відомо, що тривалість імпульсу та енергетичні параметри випромінювання істотно впливають на мікроструктуру матеріалу та якість поверхні після абляції [15]. Точність формування мікрорельєфних структур методом DLW значною мірою визначається коректним вибором параметрів експонування, зокрема узгодженням потужності випромінювання, швидкості сканування та частоти повторення імпульсів. Перевищення енергетичної щільності лазерного потоку призводить до локального перегрівання підкладки, що може спричинити часткове плавлення матеріалу, утворення мікротріщин і деформацій у зоні впливу. Такі явища погіршують геометрію сформованих елементів і знижують якість отриманих зображень, особливо при роботі з тонкими ша-

рами хрому та оксидних матеріалів. У ході експериментальних досліджень зафіксовано випадки перевищення порогової потужності, за яких процес випаровування переходив у режим руйнування поверхневого шару підкладки. Це супроводжувалося утворенням мікробибін, локальним оплавленням і зростанням шорсткості поверхні, що свідчить про високу чутливість процесу до параметрів енергетичного навантаження та умов фокусування. Зображення, отримані при прямому випаровуванні плівок хрому сфокусованим лазерним випромінюванням на інфрачервоному гравері «Raucus 30W RA20», демонструють характерні ознаки перевищення енергетичного порогу та пошкодження підкладки. Відповідні приклади наведено на рис. 5, де спостерігаються типові форми мікрodefектів і зони локальної деформації, що виникають при надлишковій енергії імпульсу. На рис. 5,а спостерігаються мікрodefекти поверхні та тріщини, що виникають унаслідок локального перегрівання підкладки. Збільшене зображення (рис. 5,б) демонструє зони руйнування та деформації матеріалу, включаючи оплавлення та структурні порушення у зоні лазерного впливу.

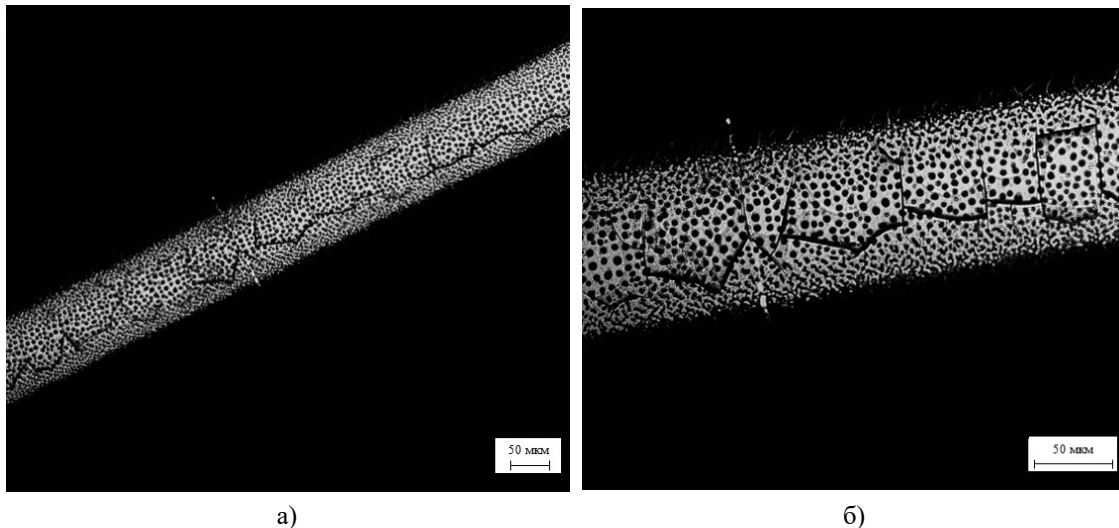


Рис. 5. Зображення, що отримані методом прямого лазерного випаровування хромових плівок за допомогою інфрачервоного гравера «Raucus 30W RA20» з пошкодженням підкладки: а) мікрodefекти поверхні; б) зони руйнування та деформації

Такі ефекти свідчать про перехід процесу абляції у режим надлишкового енергетичного навантаження та підтверджують необхідність оптимізації параметрів опромінення для забезпечення стабільної якості мікрорельєфних структур.

Метод прямого лазерного запису на плівках хрому продемонстрував високу ефективність при формуванні складних графічних структур із чітко визначеними контурами та високою контрастністю зображення. Отримані результати свідчать про стабільність форми елементів і рівномірність глибини абляції по всій площі запису, що є важливим для створення функціональних мікрорельєфних структур. Завдяки точному контролю параметрів експонування, як то потужності випромінювання, швидкості сканування і умов фокусування, забезпечується відтворення як простих геометричних елементів, так і складних растрових зображень з мікронною деталізацією. Такий підхід дозволяє безпосередньо формувати функціональні

елементи оптичних носіїв, дифракційних структур, маркерів та кодових елементів без застосування фотолітографічних або травильних операцій, що спрощує технологічний процес і підвищує відтворюваність результатів. Додаткові можливості обробки тонкоплівкових структур демонструє застосування імпульсного ультрафіолетового (УФ) випромінювання, яке забезпечує селективне видалення плівки без істотного впливу на підкладку. Приклади сформованих графічних структур і ділянок з вилученою плівкою хрому наведено на рис. 6.

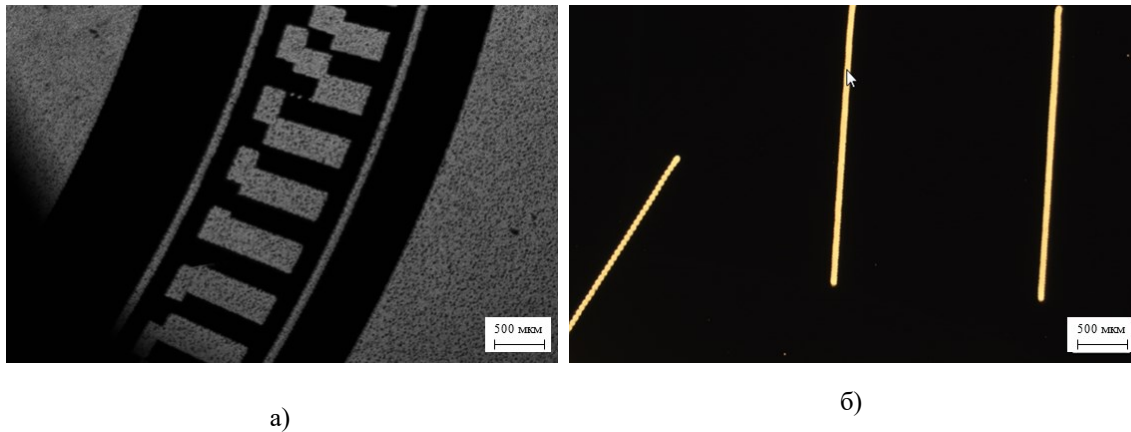


Рис. 6. Формування структур на плівках хрому лазерним випромінюванням: а) лазерна абляція; б) селективне вилучення плівки УФ-випромінюванням

На рис. 6,а наведено приклад кодової послідовності, сформованої методом лазерної абляції на плівці хрому. Отримана структура характеризується чіткістю контурів, високою контрастністю та рівномірністю глибини абляції, що свідчить про стабільність енергетичних параметрів процесу та точність позиціонування лазерного променя під час сканування. Відтворення елементів зі змінною геометрією підтверджує можливість формування функціональних мікрорельєфних структур, придатних для використання у кодових та дифракційних оптичних елементах. На рис. 6,б показано ділянки підкладки після селективного вилучення плівки хрому під дією імпульсного УФ випромінювання. Спостерігається чисте видалення металевого шару з мінімальним термічним впливом на підкладку, що підтверджує ефективність УФ-обробки для локального структуроутворення. Такий підхід може застосовуватися для формування провідних доріжок, мікроканалів та інших функціональних елементів мікроелектронних і сенсорних систем.

Нарешті, отримані результати УФ лазерної абляції (рис. 7) демонструють суттєву залежність морфології сформованих структур від енергетичних параметрів опромінення. На рис. 7,а показано приклад формування мікроелемента на хромованій поверхні без пошкодження скляної підкладки. Видалення металеві плівки відбувається рівномірно, з чітко окресленими межами та мінімальною зоною теплового впливу, що свідчить про переважання фотонно-індукованих процесів абляції та ефективну локалізацію енергії у поверхневому шарі.

Мікрофотографія краю структури (рис. 7,б) підтверджує стабільність процесу видалення матеріалу та відсутність оплавлення або тріщиноутворення у прилеглий області. Така морфологія є критично важливою для формування функціональних

мікрорельєфних елементів дифракційної оптики та оптичних кодових структур. Контрольні дослідження ділянок без хромового покриття (рис. 7,в) показали, що за оптимальних режимів УФ опромінення вплив на скляну підкладку є мінімальним, що підтверджує можливість селективного видалення металевої плівки без деградації основи. Водночас перевищення порогової густини енергії призводить до термічного руйнування підкладки (рис. 7,г), що проявляється у вигляді мікротріщин, локального плавлення та структурної деградації поверхні. Це свідчить про необхідність точного узгодження параметрів експонування з теплофізичними властивостями матеріалу для забезпечення стабільності геометрії мікроструктур.

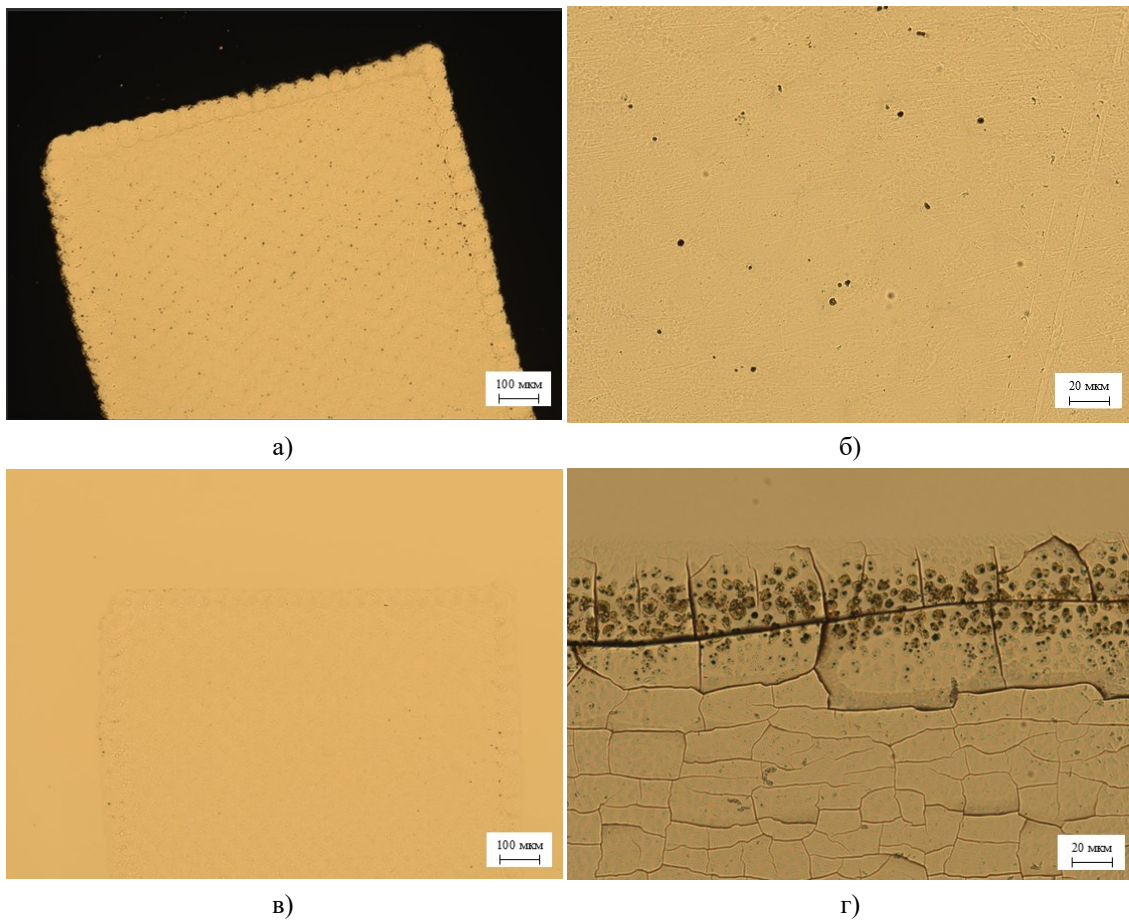


Рис. 7. Результати УФ лазерної абляції тонких хромових плівок на скляній підкладці: а) структура без пошкодження підкладки; б) морфологія краю після видалення плівки; в) ділянка скла без хромового покриття; г) руйнування підкладки при перевищенні енергетичного порогу

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність технології DLW як інструменту формування мікрорельєфних структур на тонких металевих плівках із високою просторовою роздільною здатністю та відтворюваністю геометричних параметрів. Встановлено, що якість сформованих елементів визначається узгодженим вибором енергетичних і кінематичних параметрів обробки, зокрема потужності випромінювання, частоти повторення імпульсів, швидкості сканування, діаметра фокусної плями і умов фокусування. Показано, що перевищення

порогових значень густини енергії призводить до локальних термічних пошкоджень підкладки, мікротріщиноутворення та деградації морфології структур, тоді як оптимальні режими забезпечують формування елементів із чіткими контурами, мінімальною шорсткістю поверхні та стабільною глибиною абляції. Результати досліджень також продемонстрували суттєву роль спектрального діапазону випромінювання в механізмах взаємодії з матеріалом. Зокрема, УФ-абляція забезпечує більш локалізоване енергопоглинання та селективне видалення металевих шару без пошкодження скляної підкладки за умови дотримання оптимальних режимів опромінення. Мікрофотографічний аналіз показав рівномірність видалення хрому та стабільність формування країв структур, що свідчить про мінімальну зону теплового впливу та відсутність оплавлення прилеглих ділянок. Водночас при перевищенні енергетичного порогу спостерігаються процеси термомеханічної деградації підкладки, що проявляються у вигляді мікротріщин і локального плавлення, підтверджуючи необхідність точного узгодження параметрів експонування з теплофізичними властивостями матеріала.

Висновки

Проведено комплексне дослідження фізичних механізмів і технологічних режимів лазерної мікрообробки металевих плівок з метою формування мікрорельєфних структур, придатних для виготовлення дифракційних оптичних елементів і кодових структур високої точності. Розглянуто процеси прямого лазерного запису, мікрогравірування та абляції, а також встановлено взаємозв'язок між параметрами імпульсного випромінювання та морфологією сформованих структур. У результаті проведеного дослідження отримано такі науково-практичні висновки:

— встановлено особливості взаємодії імпульсного лазерного випромінювання з металевими плівками, зокрема роль багатофотонного поглинання, теплових процесів і плазмового екранування у формуванні абляційного кратера та визначенні порогу видалення матеріалу;

— показано, що тривалість імпульсу та частота їхнього повторення визначають співвідношення між піковою і середньою потужністю випромінювання та суттєво впливають на ефективність абляції, стабільність процесу та зону термічного впливу;

— встановлено, що зі зростанням частоти повторення імпульсів можливі ефекти теплового накопичення та плазмового екранування, які призводять до погіршення морфології поверхні та зниження якості мікроструктур;

— експериментально підтверджено, що прямий лазерний запис на плівках хрому забезпечує формування висококонтрастних графічних структур із чіткими контурами та мікронною точністю без використання фотошаблонів і додаткових хімічних процесів;

— визначено, що перевищення порогової енергетичної щільності випромінювання спричиняє локальне оплавлення, мікротріщини та руйнування підкладки, що зумовлює необхідність точного узгодження параметрів експонування;

— встановлено, що стабілізовані режими лазерної обробки (потужність 3 Вт, частота 40 кГц, швидкість сканування 300 мм/с) забезпечують рівномірне енергетичне навантаження та відтворюване формування мікрорельєфних структур;

— показано можливість формування складних графічних і функціональних елементів, придатних для використання в дифракційній оптиці, кодових дисках, оптичних енкодерах і сенсорних системах;

— встановлено, що застосування УФ імпульсного випромінювання забезпечує селективне вилучення плівки хрому з мінімальною зоною термічного впливу та без пошкодження скляної підкладки за оптимальних режимів опромінення, тоді як перевищення енергетичного порогу призводить до термомеханічної деградації поверхні, що підтверджує високу чутливість процесу до параметрів експонування.

Отримані результати підтверджують, що оптимізація параметрів імпульсного лазерного випромінювання та режимів DLW забезпечує кероване формування мікрорельєфу з високою просторовою роздільною здатністю та мінімальною зоною термічного впливу. Це створює технологічне підґрунтя для впровадження методів лазерної мікрообробки у виробництво дифракційних оптичних елементів і високоточних інформаційно-оптичних компонентів.

Подяка

Автори висловлюють глибоку вдячність співробітникам Інституту проблем реєстрації інформації НАН України та Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України за участь у підготовці зразків, експериментальних дослідженнях і науковому обговоренні результатів.

1. Kryuchyn A.A., Petrov V.V., Kosyak I.V., Shanoilo S.M., Belyak Ie.V., Kostyukevich S.A., Lytvyn P. M., Boltovets M. S., Strelchuk V.V., Svezhentsova K.V., Kolesnikov O.M., Korchovy A.A., & Dzhagan V.M. Prospects for the creation of the technology of maskless photolithography based on direct laser recording. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2025. Vol. 28, No. 1. P. 93–101. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.01.093>.

2. Cheng J., Liu C., Shang S., Liu D., Perrie W., Dearden G., & Watkins K. A review of ultrafast laser materials micromachining. *Optics & Laser Technology*. 2013. Vol. 46. P. 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.037>.

3. Mishra S., & Yadava V. Laser beam micromachining (LBMM) — A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. Vol. 73. P. 89–122. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.04.006>.

4. Schille J., Schneider L., Loeschner U., Ebert R., Scully P., Goddard N., Steiger B., & Exner H. Micro processing of metals using a high repetition rate femtosecond laser: From laser process parameter study to machining examples. Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2011). 2011. <https://doi.org/10.2351/1.5062326>.

5. Semerok A., Chaléard C., Detalle V., Lacour J.-L., Mauchien P., Meynadier P., Nouvellon C., Sallé B., Perdrix M., & Petite G. Experimental investigations of laser ablation efficiency of pure metals with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses. *Applied Surface Science*. 1999. Vol. 138–139. P. 311–314. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00411-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00411-5).

6. Schille J., Loeschner U., Ebert R., Scully P., Goddard N., & Exner H. Laser micro processing using a high repetition rate femtosecond laser. *Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. 2010. <https://doi.org/10.2351/1.5062008>.

7. Canguero L., Ramos-de-Campos J.A., & Bruneel D. Prediction of thermal damage upon ultrafast laser ablation of metals. *Molecules*. 2021. Vol. 26, No. 21. 6327. <https://doi.org/10.3390/molecules26216327>.

8. Salmanul F., & Govindan P. Investigation and analysis of laser beam machining. *International Journal of Management, Information Technology and Engineering* (BEST: IJMITE). 2014. Vol. 2, No. 3. P. 87–94.

9. Choi J., & Schwarz C. Advances in femtosecond laser processing of optical materials for device applications. *International Journal of Applied Glass Science*. 2020. Vol. 11. <https://doi.org/10.1111/ijag.14979>.
10. Juodkazis S., Matsuo S., Misawa H., Mizeikis V., Marcinkevičius A., Sun H.-B., Tokuda Y., Takahashi M., Yoko T., & Nishii J. Application of femtosecond laser pulses for microfabrication of transparent media. *Applied Surface Science*. 2002. Vol. 197–198. P. 705–709. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00397-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00397-5).
11. Sarkar S., Tomlinson N., Lei J., Zhu X., Smith P., Ku N., Vargas-Gonzalez L., Bordia R., Tong J., Liu S., Huang L., Xiao H., & Peng F. Direct-laser writing of transparent silica and silica-titania glasses. *Additive Manufacturing*. 2025. Vol. 110. 104934. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104934>.
12. Ahmmed K.M.T., Grambow C., & Kietzig A.-M. Fabrication of micro/nano structures on metals by femtosecond laser micromachining. *Micromachines*. 2014. Vol. 5. P. 1219–1253. <https://doi.org/10.3390/mi5041219>.
13. Чегіль Ю.І., Буток О.М., Манько Д.Ю., Антонов С.С., Джаган В.М., Корчовий А.А. Особливості безмаскового лазерного запису графічних зображень на тонких металевих плівках. Матеріали 10-ї Української наукової конференції з фізики напівпровідників. Ужгород: ТОВ «РІК-У». 2025. С. 294.
14. Крючин А.А., Петров В.В., Беляк С.В., Косяк І.В. Аналіз можливостей прямого лазерного запису зі створення структур із субмікронними розмірами. Матеріали 10-ї Української наукової конференції з фізики напівпровідників. Ужгород: ТОВ «РІК-У». 2025. С. 335.
15. Petkov P., Dimov S., Minev R., & Pham D. Laser milling: Pulse duration effects on surface integrity. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*. 2008. Vol. 222. P. 35–45. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM840>.

Надійшла до редакції 15.02.2026

Прийнята до друку 19.05.2026

Опублікована 17.06.2026