

УДК: 621.3

ISSN 1729-4428 (Print)
ISSN 2309-8589 (Online)

Д.Ю. Манько, Є.В. Бесяк, О.М. Бутко, Ю.І. Чегіль, А.В. Панкратова, А.А. Крючин

Аналіз методів виявлення непрозорих дефектів на поверхні модуляційних дисків (огляд)

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна, dmitriy.manko@gmail.com

Дослідження присвячене модуляційним дискам як високоточним оптичним сенсорам для вимірювання кутових положень і швидкостей обертання, що є важливими для промислового та військового застосування. Для формування мікроструктур із високою точністю пропонується впровадження лазерної абляції, що забезпечує прецизійну обробку поверхні, усунення дефектів і видалення залишків хрому. Проведено класифікацію непрозорих дефектів на підкладках дисків, визначено основні причини їх виникнення та труднощі усунення, зокрема ризики пошкодження сусідніх структур під час абляції. Розроблено математичну модель, засновану на рівнянні теплопровідності у циліндричних координатах, що описує поведінку дефектів під впливом лазерного випромінювання, оптимізуючи глибину абляції та мінімізуючи термічне пошкодження. Чисельне моделювання дозволило визначити особливості теплового режиму, розподіл температури та динаміку видалення матеріалу, що стало основою для вибору оптимальних параметрів лазерної обробки. Експериментальні дослідження з використанням імпульсного азотного лазера (337,1 нм, тривалість імпульсу 20 нс) продемонстрували можливість селективного видалення хромових дефектів (5-50 мкм) із мінімальним пошкодженням підкладки. Показано, що наявність неметалевих забруднень не впливає на проведення зазначених процедур, що підтверджує вибірковість методу. Мікροзображення поверхні зразків засвідчили успішне усунення залишків хрому та тонких залишкових металевих плівок за умов налаштування оптимальних параметрів лазерного опромінення.

Ключові слова: модуляційні диски, видалення непрозорих дефектів, лазерна абляція, модель теплопровідності.

Подано до редакції 29.03.2025; прийнято до друку 13.06.2025.

Зміст

Вступ

- I. Перспективні технології видалення дефектів на підкладках модуляційних дисків
- II. Аналіз методів мінімізації непрозорих областей модуляційних дисків
- III. Аналіз процесу видалення дефектів на основі абляції фотомаски
- IV. Математичне моделювання лазерної абляції непрозорих металевих дефектів
- V. Результати експериментальних досліджень з видалення непрозорих дефектів методом лазерного випаровування

Висновки

Вступ

Модуляційні диски, що розглядаються як високоточні оптичні сенсори для вимірювання кутових положень і швидкостей обертання, мають широкий спектр застосувань у промисловості.

Зокрема, вони активно використовуються в автоматизованих виробничих системах [1-5], таких як системи з числовим програмним керуванням (ЧПК), високошвидкісних комунікаційних системах та платформах керування рухом, зокрема в авіаційних і навігаційних комплексах. Особливо важливу роль

модуляційні диски відіграють у військових безпілотних літальних апаратах, де точне визначення положення та орієнтації є критичним для забезпечення стабільності польоту та виконання високоточних маневрів [5]. Виготовлення модуляційних дисків потребує дотримання жорстких технологічних вимог, оскільки якість оптичної системи запису, точність нанесення структури патерну та механічна стійкість поверхні диска безпосередньо впливають на експлуатаційну надійність сенсорів [6]. Однією з важливих проблем є ймовірність виникнення дефектів у процесі виробництва, зокрема, похибок при нанесенні патернів та порушень цілісності поверхні. Однією з критичних вимог до модуляційних дисків є відсутність непрозорих точок або смуг у прозорих зонах робочої області після хімічної обробки. Такі дефекти зазвичай виникають унаслідок селективного травлення хрому через вікна у фоторезистивному шарі, що призводить до появи залишків хромової плівки на поверхні підкладки.

Розмір залишків хрому може варіюватись у межах від 1 мкм до 50 мкм. Наявність таких дефектів негативно впливає на оптичні та функціональні характеристики модуляційних дисків, що підкреслює необхідність точного контролю процесу травлення. Для вирішення цієї проблеми слід удосконалити технологію травлення хромових плівок та впровадити додаткові методи обробки підкладки, які забезпечують повне видалення залишків хрому з робочої області. Крім того, необхідно розробити сучасні методи виявлення та усунення таких дефектів, а також впровадити інноваційні підходи до ефективного усунення непрозорих включень. Характерні мікроструктури з непрозорими дефектами на поверхні підкладки представлена на рис. 1, відповідні зразки «1А» і «1В» містять дефекти різних розмірів. Наведені дані підтверджують, що розмір, положення відносно елементів інформаційної структури та щільність розподілу таких дефектів є критичними факторами, які визначають експлуата-

ційні характеристики модуляційного диска. Усунення непрозорих дефектів на поверхні модуляційних дисків вимагає застосування передових технологій, серед яких лазерна абляція є одним із *найбільш актуальних* рішень. Цей метод, зокрема із використанням фемтосекундних і наносекундних лазерів, забезпечує високу точність та ефективність модифікації поверхні. Взаємодія лазерної енергії зі складовими дефекту дозволяє здійснювати контрольовані зміни морфології поверхні, що є критично важливим для досягнення високих стандартів якості, необхідних для сучасних оптичних пристроїв. У зв'язку з необхідністю дотримання цих жорстких вимог дослідження лазерної абляції набувають особливої актуальності, що робить цей підхід ключовим інструментом для впровадження інноваційних рішень у виробництві модуляційних дисків.

Аналіз наукових досліджень, присвячених питанням застосування процедури лазерної абляції для модифікації поверхні, підкреслює її значний потенціал у вирішенні проблеми непрозорих дефектів на модуляційних дисках. Фемтосекундна лазерна абляція, що характеризується короткою тривалістю імпульсів і високою піковою потужністю, забезпечує нелінійний процес поглинання у діелектричних матеріалах, що дозволяє збуджувати електрони з валентної зони в зону провідності. Це сприяє ефективному видаленню матеріалу з мінімальним тепловим впливом [7]. Можливість контролювати розподіл енергії в таких коротких часових масштабах забезпечує точну абляцію дефектів без негативного впливу на прилеглі ділянки матеріалу. Ця властивість є особливо важливою при усуненні непрозорих дефектів, оскільки зменшує ризик побічного пошкодження, яке часто спостерігається при використанні лазерів із довгими імпульсами [8]. Дослідження також показали, що ефективність лазерної абляції у видаленні дефектів значною мірою залежить від початкового стану поверхні. Модель дефекту вказує на те, що дефекти можуть поглинати лазерне випромінювання, спричиняючи локальне

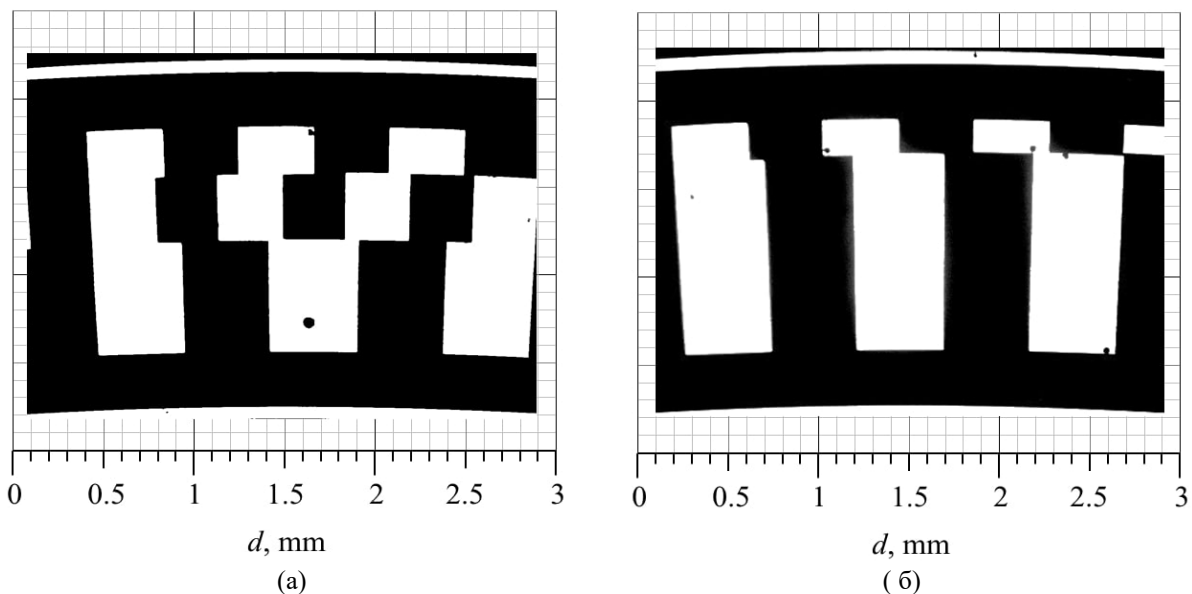


Рис. 1. Мікрображення непрозорих точок на поверхні мікроструктури модуляційного диска: (а) зразок «1А»; (б) зразок «1В».

нагрівання, що підвищує ефективність абляції [9]. Це явище є особливо актуальним для модуляційних дисків, оскільки наявність дефектів може суттєво змінювати взаємодію лазерної енергії з матеріалом, що потенційно призводить до нерівномірної абляції та погіршення якості поверхні. Крім того, оптимізація параметрів лазера, таких як енергія імпульсу, частота повторення та швидкість сканування, є критично важливою для досягнення бажаних результатів у процесі абляції. Дослідження свідчать, що точне налаштування цих параметрів дозволяє покращити шорсткість поверхні та зменшити щільність дефектів [10]. Наприклад, підвищення енергії імпульсу при збереженні відповідної швидкості сканування може прискорити процес абляції, збільшуючи ефективність видалення дефектів [11]. Така оптимізація є вирішальною для забезпечення високої якості поверхонь, необхідних для застосувань, де є критичними показники продуктивності. Гібридні методи лазерної абляції, зокрема лазерно-індукована плазмова абляція (Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation, LIPAA), також досліджувалися для підвищення ефективності цього процесу. Використовуючи поверхнево-адгезійні поглинальні шари, ці методи покращують поглинання лазерної енергії, що сприяє ефективнішому видаленню матеріалу [12]. Такий підхід не лише підвищує ефективність абляції, а й забезпечує кращий контроль над морфологією поверхні, що є критично важливим для застосувань, де текстура поверхні впливає на експлуатаційні характеристики. Післяабляційна обробка поверхні відіграє важливу роль у зміні кінцевих властивостей модуляційних дисків. Такі методи, як гідротермальна обробка, можуть застосовуватися після лазерної абляції для модифікації структури поверхні та покращення її функціональних характеристик, зокрема підвищення стійкості до обмерзання [13]. Цей комплексний підхід (лазерна абляція в поєднанні з подальшою обробкою) сприяє зниженню щільності дефектів і покращенню функціональних властивостей поверхні. Окрім видалення дефектів, лазерна абляція має широкі можливості в інженерії поверхонь, зокрема у створенні ієрархічних наноструктур, які змінюють змочуваність і адгезійні властивості матеріалу [14]. Ці дослідження підкреслюють універсальність лазерної абляції, яка виступає не лише як метод усунення дефектів, а й як потужний інструмент для вдосконалення функціональних характеристик поверхонь.

Невирішеною задачею загального дослідження є висока складність та вартість систем лазерної абляції, а також необхідність інтеграції результатів досліджень. Відповідні системи часто працюють в рамках розрізнених експериментальних досліджень без єдиної методології, що ускладнює розробку практичних застосувань, особливо у сферах, де потрібна висока точність і ефективність. Метою цієї роботи є розробка комплексної методології, яка поєднує математичне моделювання з експериментальними дослідженнями лазерної абляції та формування мікроструктур у модуляційних дисках. Створення цілісної концепції, що пов'язує

математичне моделювання та експериментальні дані, дозволить оптимізувати характеристики поверхні модуляційних дисків, що у підсумку сприятиме розробці більш ефективних і продуктивних систем.

I. Перспективні технології видалення дефектів на підкладках модуляційних дисків

Як було зазначено вище, видалення дефектів на підкладках є критично важливим етапом для забезпечення високої продуктивності та надійності модуляційних дисків. Вибір відповідної технології видалення дефектів відіграє ключову роль у збереженні функціональності оптоелектронного пристрою та його довготривалої роботи. У цьому контексті важливо розробити комплексну методологію видалення дефектів, яка враховує природу дефектів, властивості матеріалів і специфічні вимоги пристрою. З огляду на широкий спектр можливих типів дефектів, класифікація дефектів має першочергове значення при виборі найбільш ефективної методики їх усунення. Точна класифікація гарантує, що кожен метод застосовується до актуальних типів дефектів, що дозволяє оптимізувати точність і ефективність усієї процедури. Перспективні технології для виконання зазначеної мети включають у себе аналіз і впровадження широкого набору відповідних методів (рис. 2):

- технологія лазерної абляції;
- технологія плазмового травлення;
- технологія хіміко-механічного полірування;
- технологія ультразвукового очищення;
- удосконалена технологія вологого травлення;
- методи метрологічного контролю.

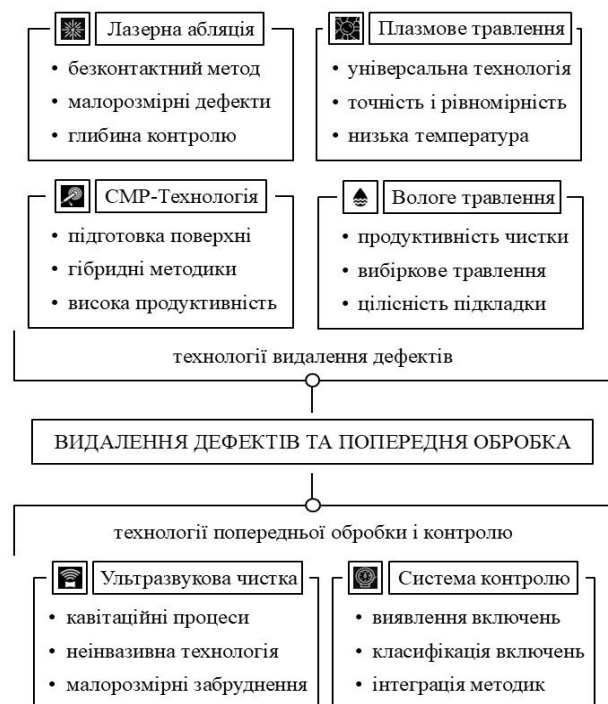


Рис. 2. Класифікація технологій видалення та керування дефектами.

Метод лазерної абляції [7-14] характеризується високою точністю та безконтактністю, що вказує на його високу актуальність для організації процедури видалення дефектів. Завдяки використанню сфокусованих лазерних променів лазерна абляція випаровує складові дефекту із мінімальним тепловим впливом на підкладку, запобігаючи можливому пошкодженню мікрорельєфної структури. Ця технологія особливо ефективна для усунення малих локалізованих дефектів, таких як непрозорі частинки або смуги, які складно видалити традиційними механічними методами. Крім того, лазерна абляція забезпечує високий рівень контролю за глибиною та площею видалення матеріалу, що дозволяє точно керувати процесом усунення дефектів і зберігати цілісність підкладки. У свою чергу, плазмове травлення [15] є висококонтрольованим процесом, у якому іонізований газ вибірково видаляє матеріал з поверхні підкладки. Цей метод також відзначається високою точністю, що дозволяє забезпечити рівномірний процес травлення з мінімальним пошкодженням матеріалу підкладки. Завдяки своїй універсальності плазмове травлення дозволяє усунути різноманітні дефекти, а низькотемпературний режим роботи запобігає термічному пошкодженню, що робить цей метод придатним для обробки чутливих матеріалів. Хіміко-механічне полірування [16] поєднує хімічне травлення та механічну обробку для ефективного згладжування та очищення поверхні підкладки. Ця технологія особливо ефективна для усунення як поверхневих подряпин, так і включень, оскільки хімічне травлення сприяє видаленню забруднень, а механічне полірування забезпечує рівномірну гладку поверхню.

Поєднуючи зазначені процедури, хіміко-механічне полірування (Chemical-Mechanical Polishing; CMP) забезпечує високий рівень згладжування поверхні, що є критично важливим для продуктивності оптоелектронних пристроїв. У основі методу ультразвукового очищення [17] лежить використання високочастотних звукових хвиль у рідкому середовищі для видалення частинок і залишкових забруднень із поверхні підкладки. Кавітаційні ефекти створюють мікробульбашки, які генерують локальний тиск, що ефективно очищує поверхню без механічних пошкоджень. Ультразвукове очищення особливо ефективне для видалення дрібних забруднень, що важко усунути традиційними методами. Удосконалені методи вологого травлення [18] використовують спеціалізовані хімічні компоненти та високоточні контрольовані умови обробки для ретельного видалення небажаних матеріалів, таких як залишки хромової плівки. Ці методи гарантують високу точність усунення дефектів з мінімізацією ризику пошкодження підкладки. Завдяки вибіркоvim властивостям травлення зазначена процедура є особливо корисною для усунення поверхневих забруднень при збереженні цілісності основного матеріалу підкладки. Нарешті, системи метрологічного контролю [19] відіграє ключову роль на етапах ідентифікації та оцінки ефективності процесу усунення дефектів з поверхні підкладки.

Високороздільна візуалізація та актуальний метрологічний інструментарій дозволяють виявляти найбільш дрібні дефекти, які можуть залишитися непоміченими, гарантуючи відповідність процесу видалення дефектів необхідним стандартам продуктивності та надійності. При інтеграції з технологіями видалення дефектів ці системи сприяють загальній ефективності та точності процесу керування дефектами.

Таким чином, проведений аналіз вказує, що лазерна абляція має значні переваги у забезпеченні високих технічних вимог до формування мікрорельєфних структур на модуляційних дисках. Її точність і безконтактність дозволяють ефективно видаляти дрібні дефекти, такі як непрозорі частинки та смуги, без порушення цілісності підкладки. Це робить її оптимальним методом для забезпечення високої продуктивності формування модуляційних дисків, особливо для застосувань, що вимагають складного оптичного структурування. Однак для повного використання потенціалу лазерної абляції необхідно розробити адекватну математичну модель, яка зможе з високою точністю прогнозувати та контролювати процес видалення матеріалу. Крім того, зазначається, що експериментальні дослідження є критично важливими для верифікації зазначених моделей і вдосконалення параметрів процесу. Враховуючи складність поставленого завдання, що охоплює численні змінні та можливі джерела похибок, експериментальні дослідження є незамінними для оптимізації методу лазерної абляції для практичного застосування.

II. Аналіз методів мінімізації непрозорих областей модуляційних дисків

Технології компенсації дефектів набули значного поширення, особливо у рамках завдання зменшення розмірів оптичних елементів. Мініатюризація вимагає точної корекції найменших дефектів у зонах з високою щільністю мікрорельєфної структури. Формування високоякісних оптичних елементів потребує виявлення технічних рішень, які сприятимуть виробництву модуляційних дисків із мінімальною кількістю дефектів. Серед основних типів дефектів саме непрозорі дефекти становлять найбільшу проблему для будь-якого оптичного елемента. Ці дефекти, розміри яких можуть варіюватися від 1 до 50 мкм, можуть проявлятися як локалізовані аномалії або розподілені нерівності по всій поверхні оптичного елемента. Крім того, наявність непрозорих дефектів часто пов'язана з присутністю сторонніх включень, що ускладнює їх усунення [20]. Класифікація дефектів оптичних елементів на жорсткі та м'які дефекти виявилася надзвичайно актуальною та практично корисною для вирішення проблем, пов'язаних з ідентифікацією та усуненням дефектів. Жорсткі дефекти складаються з матеріалів, ідентичних тим, що використовуються у непрозорій масці, що формує патерн на підкладці.

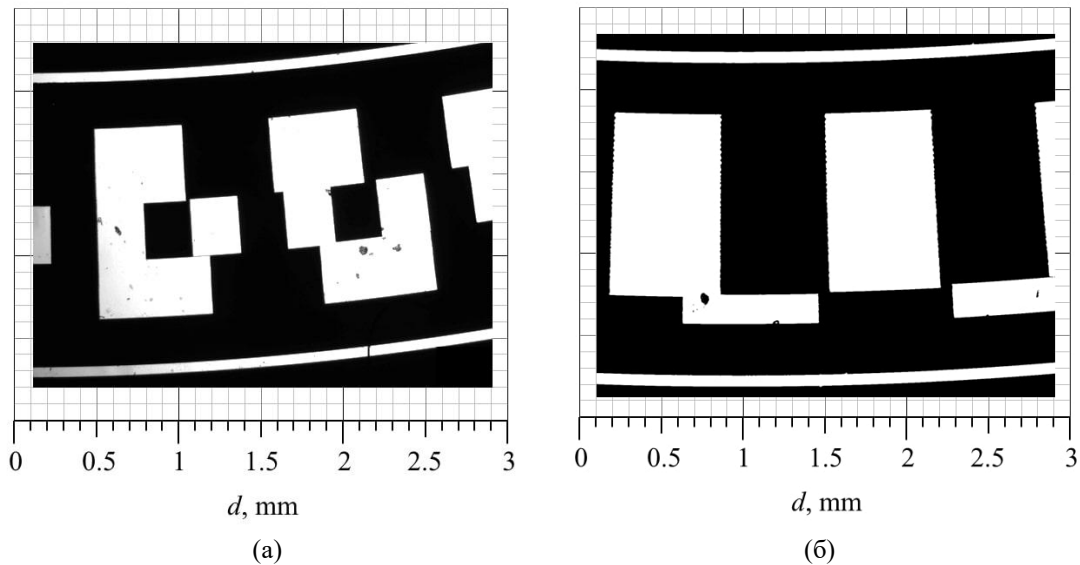


Рис. 3. Мікрображення непрозорих дефектів, що виникають під час виготовлення підкладок модуляційних дисків: (а) зразок «2А»; (б) зразок «2В».

Натомість м'які дефекти, які зазвичай є сторонніми забрудненнями, складаються з матеріалів, відмінних від тих, що використовуються у масці. Такі забруднення зазвичай походять із навколишнього середовища або виробничого процесу. Обидва типи дефектів можуть порушувати патерн на підкладці, проте різна природа вимагає різних підходів до усунення. Зокрема, м'які дефекти потребують видалення за допомогою процесів очищення, що може включати впровадження агресивних агентів залежно від ступеня і стійкості забруднення [21]. Виникнення непрозорих жорстких дефектів на поверхні модуляційних дисків, виготовлених із металевих шарів, пов'язане з низкою факторів:

Утворення повітряних бульбашок під час обробки підкладки. Повітряні бульбашки можуть виникати при зануренні підкладки в розчин проявника або травника. Це перешкоджає рівномірному доступу розчинів до фоторезисту або маскувального шару, що призводить до неповних хімічних реакцій. Ця проблема стає особливо критичною при записі з високою точністю, де рівномірність є ключовою для збереження цілісності оптичного елемента.

Пилові частинки на підкладці з нанесеним фоторезистом. Пил або мікроскопічні частки, що осідають на підкладці перед лазерною експозицією, можуть діяти як бар'єр, перешкоджаючи рівномірному опроміненню фоторезистивної плівки. Це призводить до утворення неповних або спотворених патернів на підкладці, що може вимагати додаткових корекційних заходів або навіть спричинити вибракування дефектного диска. Для мінімізації цієї проблеми необхідно суворо дотримуватися чистих умов виробництва.

Жирові забруднення. Відбитки пальців, плями або залишки від контакту з підкладкою створюють локальні області забруднення. Такі забруднення порушують адгезію фоторезистивного шару та порушують хімічні процеси, утворюючи дефекти, що важко усунути. Впровадження превентивних заходів, таких як автоматизовані системи обробки, є критично важливим для зменшення цих ризиків.

Механічні частки у нефільтрованих робочих розчинах. Нефільтровані розчини, що використовуються під час обробки, можуть містити дрібні механічні частки, які випадково осідають на підкладці. Ці частки можуть спричинити локалізовані області металізації або інші дефекти. Регулярна фільтрація та контроль якості робочих розчинів необхідні для запобігання такому виду забруднень.

Під час виробництва фотошаблонів для модуляційних дисків часто виникають непрозорі дефекти, не пов'язані з хімічним забрудненням. Ці дефекти зазвичай впливають на металізоване покриття і з'являються у області патерну у вигляді плям, розширення проміжків або появи перемичок між елементами інформаційної структури. Подібні аномалії порушують функціональність модуляційних дисків і потребують точних методів інспекції для їх виявлення та усунення [22].

На рис. 3 демонструється мікрображення зразків «2А» та «2В», які відображають найпоширеніші непрозорі дефекти, що виникають у процесі виробництва модуляційних дисків. Серед таких дефектів виділяють ізольовані непрозорі плями, які зазвичай виглядають як невеликі локалізовані дефекти, непрозорі лінії, що найчастіше є наслідком небажаного осадження матеріалу або помилок у процесі обробки, а також непрозорі перемички між хромовими лініями, які порушують структуру заданого візерунка та негативно впливають на функціональність модуляційного диска.

Таким чином, процес виготовлення закодованих підкладок дисків характеризується появою непрозорих дефектів, що можуть суттєво впливати на функціональність і якість кінцевого виробу. Ефективне усунення дефектів вимагає визначення джерел забруднення, покращення контролю процесів та вдосконалення виробничих методик. Проте, оскільки роздільна здатність лазерних систем для видалення дефектів обмежена, застосування лазерної абляції несе ризик пошкодження сусідніх ліній, що підкреслює необхідність точного контролю та використання альтернативних методів видалення

дефектів для забезпечення оптимальної продуктивності підкладки.

III. Аналіз процесу видалення дефектів на основі абляції фотомаски

Лазерна абляція є високоефективним і технологічно передовим методом усунення непрозорих дефектів, що виникають під час виготовлення модуляційних дисків. Завдяки використанню лазерів, цей підхід дозволяє точно та ефективно видаляти такі дефекти з фотомасок у процесі абляції, забезпечуючи цілісність мікроструктурного патерну. Сучасні досягнення в області лазерної абляції значно підвищили її ефективність, зокрема завдяки впровадженню ультрафіолетових (УФ) лазерів. УФ-лазерам надається перевага в оптичних системах призначених для видалення дефектів завдяки їхній високій роздільній здатності та високому поглинанню хрому у відповідному спектральному діапазоні, що сприяє точному видаленню матеріалу. Наприклад, фемтосекундні імпульсні лазери з довжинами хвиль 206 нм, 337 нм та 357 нм є одними з найбільш передових рішень, доступних сьогодні [23]. Таким чином, відповідні лазери найбільш підходять для лазерної абляції завдяки їх здатності досягати високої точності та сумісності з вимогами сучасних оптичних систем.

Принцип лазерної абляції полягає у фокусуванні лазерного променя на дефекті та його усуненні за допомогою коротких імпульсів лазерного випромінювання, тривалість яких варіюється від десятків наносекунд до сотень фемтосекунд. У тому випадку, коли потужність лазерного імпульсу достатньо висока, температура області поверхні підкладки перевищує поріг випаровування T_E при нормальному атмосферному тиску, з урахуванням показника плавлення L_M і випаровування L_E , що призводить до випаровування тонкої плівки. Включення, що знаходяться на межі між підкладкою та металевою плівкою, відіграють критичну роль у лазерній абляції тонких плівок. Відповідні включення зменшують адгезію тонкої плівки, що полегшує видалення дефектів. Крім того, швидке лазерне нагрівання за допомогою коротких імпульсів викликає надмірний тиск на межі, спричинений термічною десорбцією молекул газу, адсорбованих на ділянках дефектів. Цей тиск виникає через термічну десорбцію молекул газу на відповідних ділянках, що додатково підвищує ефективність видалення матеріалу. Для підкладок з більш низькою температурою плавлення або випаровування термічне розкладання нагрітої поверхні підкладки може сприяти утворенню високого тиску пари під тонкою плівкою. Це створює достатній тиск, щоб відокремити та видалити плівку. Коли температура тонкої плівки T_{TF} залишається нижче її температури плавлення T_M , відбувається термічне розширення як тонкої плівки, так і підкладки. Локальне нагрівання та термічне розширення створюють термічні напружки, які можуть призвести до тріщин у тонкій плівці або підкладці під

час лазерного нагріву. Відповідна механічна напруга може стати достатньо сильною, щоб відірвати частину плівки або, в деяких випадках, всю плівку з поверхні підкладки. Для дефектів, що перевищують діаметр сфокусованого лазерного променя, необхідно сканувати промінь через дефект, щоб забезпечити його повне видалення. Зважаючи на випадковий розподіл та різні розміри дефектів, фемтосекундні лазери, які працюють у діапазоні глибокого ультрафіолету (Deep Ultraviolet; DUV), часто використовуються для видалення дефектів з фотомасок та оптичних елементів. Зазначений підхід зарекомендував себе як надійний підхід організації оптичної системи довгострокового застосування.

Під час лазерної абляції для видалення дефектів значна кількість теплової енергії передається лазерним променем на підкладку, покриту хромовою плівкою. Ця енергія не тільки випаровує металевий дефект, але також може спричинити пошкодження матеріалу підкладки під дефектом або поблизу нього, що призводить до росту показника шорсткості поверхні [24]. Експериментальні дослідження показують, що перевищення порогової енергії імпульсів фемтосекундного лазера під час видалення непрозорих дефектів може призвести до локальних пошкоджень поверхні скляної підкладки модуляційного диска, як показано на рис. 4. Щоб запобігти таким пошкодженням, необхідно ретельно вибирати параметри обробки, що мінімізують ризик пошкодження поверхні скляної підкладки в точках впливу імпульсного лазерного випромінювання. Крім того, у процесі абляції має бути забезпечено такі умови, при яких залишковий матеріал металевої маски не розсіюється по підкладці, що може знизити прозорість ділянок модуляційного диска, що неприпустимо для збереження оптичної якості та функціональності.

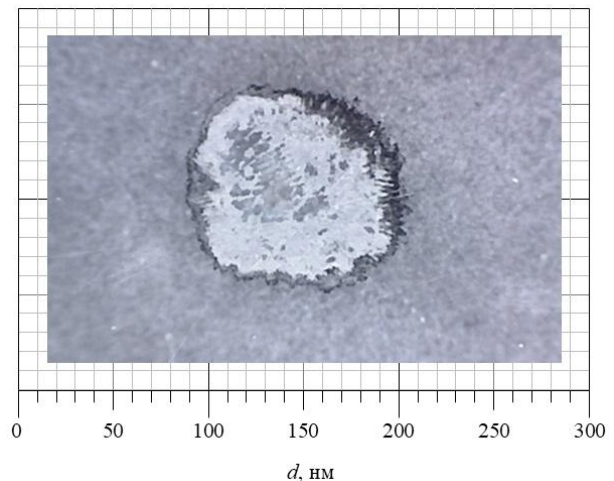


Рис. 4. Мікробірозраження області пошкодження поверхні підкладки модуляційного диска, спричиненої сфокусованим імпульсом фемтосекундного лазера.

Наразі лазерні імпульси короткої тривалості широко використовуються для абляції металевих плівок з метою зменшення теплового пошкодження підкладки та покращення роздільної здатності при

видаленні поглинаючих дефектів [25]. Пікосекундні лазерні імпульси дозволяють абсорбувати енергію світла, що супроводжується локальним нагрівом і видаленням матеріалу через випаровування без значного впливу на матеріал підкладки. Цей підхід мінімізує надмірне накопичення енергії поза зоною лазерного опромінення, покращуючи точність. Абляція ультрашвидкими лазерами є особливо ефективною для мінімізації зони теплового впливу на різні матеріали [25]. Використання ультракоротких фемтосекундних імпульсів у діапазоні DUV продемонструвало виняткову ефективність у відновленні фотомасок під час формування відповідної мікроструктури. Цей метод дозволяє вибірково видаляти дефекти з поверхні маски за допомогою холодної абляції, забезпечуючи збереження цілісності оптично прозорої підкладки [26].

IV. Математичне моделювання лазерної абляції непрозорих металевих дефектів

Лазерна абляція є складним фізичним процесом, який включає точну взаємодію лазерної енергії з матеріалами, що призводить до локального нагріву, фазових переходів та видалення матеріалу. Математичне моделювання цього процесу є важливим для розуміння та оптимізації видалення непрозорих металевих дефектів на модуляційних дисках, де необхідний точний контроль глибини абляції та теплових ефектів. Розроблена модель включає динаміку теплопередачі, поглинання лазерної енергії, явища фазових переходів та аналіз напруги, що дозволяє описати поведінку матеріалу дефекту під дією лазерного опромінення. Враховуючи взаємодію теплових і механічних ефектів, ця модель дає можливість отримати нові дані про процес абляції, відкриваючи шлях до вдосконалення стратегій усунення дефектів і підвищення точності виробництва.

Рівняння теплопередачі відіграє ключову роль у моделюванні розподілу температури $T(x, y, z, t)$ у матеріалі дефекту та підкладці під час лазерного опромінення. Це рівняння враховує теплопровідність, поглинання лазерної енергії та часову залежність температурного поля. Зазначене рівняння записується у наступній формі:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q(x, y, z, t)}{\rho \cdot c_p}, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, c_p – питома теплоємність, k – теплопровідність, Q – джерело тепла, що представляє поглинену лазерну енергію. Рівняння теплопередачі є критично важливим для розуміння того, як лазерна енергія поширюється через матеріал дефекту та його підкладку. Точні розв'язки цього рівняння дозволяють передбачити градієнти температури, що є ключовими для визначення моменту фазових переходів, процесу абляції

матеріалу та потенційних теплових пошкоджень. Отримані результати допомагають у виборі оптимальних параметрів лазерного випромінювання для ефективної абляції, мінімізуючи небажані ефекти, такі як перегрів або розтріскування підкладки.

Термін джерела тепла $Q(x, y, z, t)$ описує розподіл лазерної енергії, що поглинається матеріалом дефекту під час опромінення. Цей параметр є ключовим для розуміння взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом та його внеску у локалізоване нагрівання. Джерело тепла на математичному рівні моделюється як:

$$Q(x, y, z, t) = \alpha \cdot I(x, y, t) \cdot e^{-\alpha z}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт поглинання, I – розподіл інтенсивності лазерного випромінювання. Для гаусового лазерного пучка:

$$I(x, y, t) = \frac{2P}{\pi \cdot r^2} \cdot e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{r^2}}, \quad (3)$$

де P – потужність лазерного джерела, r – радіус пучка. Гаусівський профіль відображає розподіл інтенсивності лазерного випромінювання, при якому максимальна інтенсивність спостерігається в центрі пучка і поступово зменшується до його країв. Поєднання рівнянь (2) і (3) забезпечує точний опис процесу поглинання лазерної енергії матеріалом. Ця модель дозволяє розрахувати просторовий і часовий розподіл поглинутої енергії, що безпосередньо впливає на температурні градієнти та подальшу динаміку абляції.

Абляція матеріалу під час лазерного опромінення відбувається, коли температура поверхні дефектного матеріалу досягає або перевищує його температуру випаровування T_E . У цей момент матеріал зазнає фазового переходу з твердого (або рідкого) стану в пароподібний, що вимагає певної кількості енергії. Ця енергія, відома як питома теплота випаровування, визначається за формулою:

$$Q_{PH} = \rho \cdot L_E, \quad (4)$$

де L_E – питома теплота випаровування.

Глибина абляції поверхні δz за один лазерний імпульс оцінюється за формулою:

$$\delta z = \frac{1}{\rho} \cdot \int_0^{T_{LP}} \frac{Q}{L_E} dt, \quad (5)$$

де T_{LP} – тривалість лазерного імпульсу. Це рівняння враховує енергетичне надходження за часом для розрахунку глибини видаленого матеріалу. Умова фазового переходу є ключовою для визначення ефективності та точності процесу лазерної абляції. Контролюючи параметри, такі як енергія імпульсу, його тривалість і частота повторення, можна оптимізувати глибину абляції, мінімізуючи термічні пошкодження навколишніх областей. Запропонована модель слугує основою для прогнозування швидкості видалення матеріалу та забезпечення стабільної абляції на поверхні дефекту, підкреслюючи

важливість збалансованої подачі енергії відповідно до властивостей матеріалу, таких як ρ та L_E .

Щоб точно змоделювати розподіл температури та передачу енергії під час лазерної абляції, необхідно задати відповідні граничні умови для модуляційного диска та проміжку між підкладкою і дефектом. Ці умови враховують механізми теплообміну, забезпечуючи реалістичне відображення фізичних процесів. На поверхні модуляційного диска ($z = 0$):

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = h \cdot (T - T_\infty) + \sigma \epsilon \cdot (T^4 - T_\infty^4), \quad (6)$$

де σ – стала Стефана-Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), h – коефіцієнт конвективного теплообміну, ϵ – випромінювальна здатність, T_∞ – температура навколишнього середовища.

Для області підкладки-дефект, у свою чергу можна визначити:

$$\begin{cases} T_D = T_S \\ k_D \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = k_S \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases}, \quad (7)$$

де T_D і k_D – температура та теплопровідність ділянки дефекту, T_S і k_S – температура та теплопровідність поверхні модуляційного диска. Перше рівняння забезпечує безперервність температури через відповідний проміжок, тоді як друге рівняння враховує збереження теплового потоку, враховуючи різниці в теплопровідності між дефектом і підкладкою. Інтегруючи як конвекційні, так і радіаційні ефекти, а також умови безперервності, модель описує складну теплову динаміку, що виникає під час лазерної абляції.

Швидке нагрівання та охолодження під час лазерної абляції викликають термічні напруги в матеріалі, що може суттєво вплинути на структурну цілісність модуляційного диска. Термічні напруги обчислюються за наступним співвідношенням:

$$\sigma = E \alpha_T \cdot (T - T_\infty), \quad (8)$$

де E – модуль Юнга, α_T – коефіцієнт термічного розширення. Надмірна напруга може призвести до тріщин або відшарування тонкої плівки. Розуміння розвитку та наслідків термічних напруг є важливим для прогнозування механічної стабільності модуляційного диска під час лазерної абляції. Точно розраховуючи рівні напруг, можна мінімізувати ризик пошкодження матеріалу, а також оптимізувати параметри процесу, такі як інтенсивність лазера та тривалість імпульсу, для забезпечення контрольованої абляції.

Теоретична основа, викладена вище, забезпечує базу для розуміння теплових та механічних динамік лазерної абляції. Однак ефективність та точність процесу також значною мірою залежать від часових характеристик використовуваних лазерних імпульсів. Різні тривалості імпульсів (наносекундні, пікосекундні та фемтосекундні імпульси) суттєво змінюють механізми взаємодії, дифузію тепла та ступінь пошкодження матеріалу. Наносекундні

імпульси призводять до значної дифузії тепла, що викликає велику зону впливу тепла та теплове випаровування як основний механізм абляції. Поріг енергії на одиницю площі (поріг флюенсу) для абляції в цьому режимі відносно високий і, зазвичай, обирається у межах 1 до 10 Дж/см². У свою чергу, пікосекундні імпульси демонструють більш локалізовану дифузію тепла, при цьому абляція відбувається за рахунок поєднання теплового випаровування та фотомеханічних ефектів. Зона пошкодження в цьому випадку мінімальна, а поріг флюенсу знаходиться в діапазоні від 0,1 до 1 Дж/см². Фемтосекундні імпульси, з іншого боку, майже повністю мінімізують дифузію тепла, що призводить до переважно фотомеханічного процесу абляції. Це забезпечує мінімальні пошкодження матеріалу та значно нижчий поріг флюенсу, зазвичай у діапазоні від 0,01 до 0,1 Дж/см². Ці варіації в тривалості імпульсів і їх відповідні ефекти є критичними для налаштування параметрів лазерної системи під конкретні застосування, такі як видалення дефектів на модуляційних дисках, де точність та мінімізація пошкоджень є найбільш важливими.

З метою подальшого моделювання процесів динаміки лазерної абляції, було розроблено математичний апарат, що базується на рівнянні теплопровідності у циліндричних координатах. У основі математичної моделі лежить теплова відповідь матеріалу, що відображає розподіл температури $T(r, z, t)$ в області дефекту. Використовуючи симетрію лазерного імпульсу та його взаємодію з матеріалом, модель передбачає відсутність кутової залежності, що спрощує аналіз до радіальної та глибинної складових. Основне рівняння теплопровідності виражається як:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (9)$$

де $\alpha = k / (\rho \cdot c)$ – тепловий дифузійний коефіцієнт (де c – теплоємність), r – радіальна відстань, а z – глибина.

Для точного представлення взаємодії лазерного променя з матеріалом під час абляції, застосовуються наступні граничні та початкові умови:

Умова Неймана на поверхні ($z = 0$). Поглинутий тепловий потік на поверхні, $Q'(r, t)$, визначає зміну температури:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = Q'(r, t), \quad (10)$$

де $Q'(r, t)$ визначається як:

$$Q'(r, t) = \frac{A \cdot P \cdot e^{-\frac{r^2}{2R^2}}}{4\pi\tau \cdot R^2}, \quad (11)$$

де A – абсорбція матеріалу, P – енергія лазерного імпульсу, τ – тривалість імпульсу, а R – фокусна радіус

Термічно ізольовані межі. Межі у центрі $r = 0$ та на глибині $z = L_z$ вважаються термічно ізольованими:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ при } r = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ при } z = L_z \end{cases} \quad (12)$$

Початкові умови. На початковий момент часу ($t = 0$) матеріал має температуру навколишнього середовища T_{IN} :

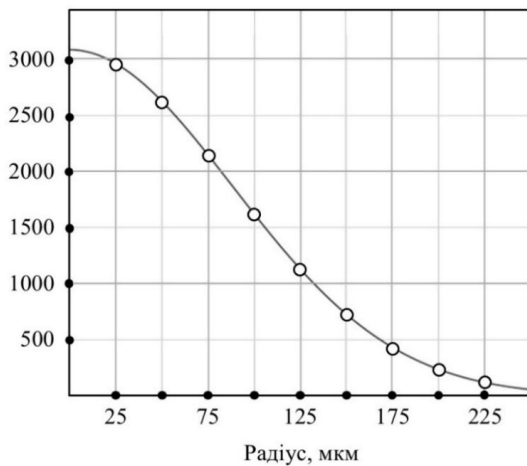
$$T(r, z, t) = T_{IN} \text{ для } t = 0. \quad (13)$$

Відповідна математична модель описує просторову та часову зміну температури у відповідь на лазерне випромінювання. Інтегруючи профіль енергії, властивості матеріалу та граничні умови, модель дозволяє точно передбачити теплову поведінку під час абляції. Ці результати є критично важливими для оптимізації параметрів лазера, забезпечуючи контрольоване видалення матеріалу при мінімізації небажаних ефектів, таких як термічні пошкодження чи залишкові напруги.

На основі запропонованої математичної моделі були проведені числові симуляції процесів

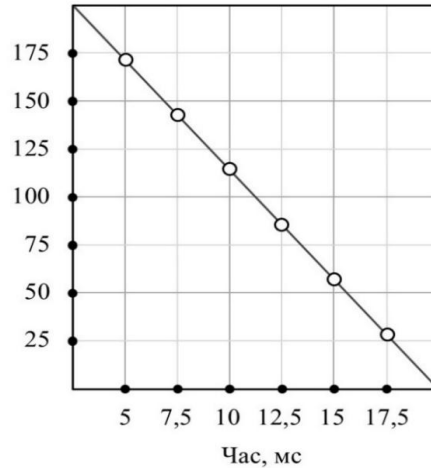
теплопередачі під час лазерної абляції матеріалів. Результати моделювання дозволяють глибше зрозуміти теплові процеси при лазерній абляції, що є важливим для оптимізації технологічних параметрів, таких як енергія імпульсу, тривалість та фокусна відстань. Це, у свою чергу, дає змогу точно передбачити результати взаємодії лазера з матеріалом у різних технологічних процесах, включаючи створення високоточних оптичних елементів. Результати показують розподіли температури та еволюцію товщини матеріального шару з часом, виявляючи основні тенденції в динаміці лазерної абляції. Радіальний розподіл температури в зоні впливу лазерного променя (рис. 5-а) показує максимальну температуру 3000 К в центрі плями, яка поступово зменшується з радіусом, наближаючись до нуля на межі зони впливу. Залежність товщини залишкового матеріалу від тривалості лазерного впливу (рис. 5-б) вказує на лінійне зменшення товщини шару зі збільшенням часу, що відповідає сталому рівню абляції. Крім того, двовимірний розподіл температури в зоні впливу лазера (рис. 5-в) демонструє симетричне температурне поле, з

Розподіл температури в області лазерної плями, К



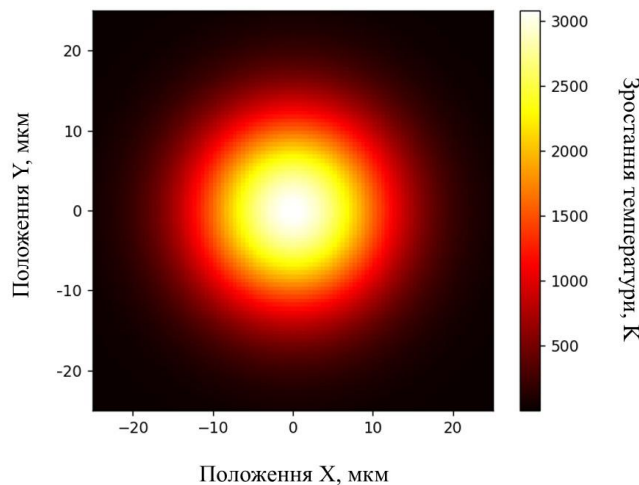
(а)

Товщина залишкового шару, нм



(б)

2D Розподіл температури в області лазерної плями



(в)

Рис. 5. Результати числового моделювання лазерної абляції: (а) радіальний розподіл температури, (б) залишкова товщина шару, (в) двовимірний розподіл температури.

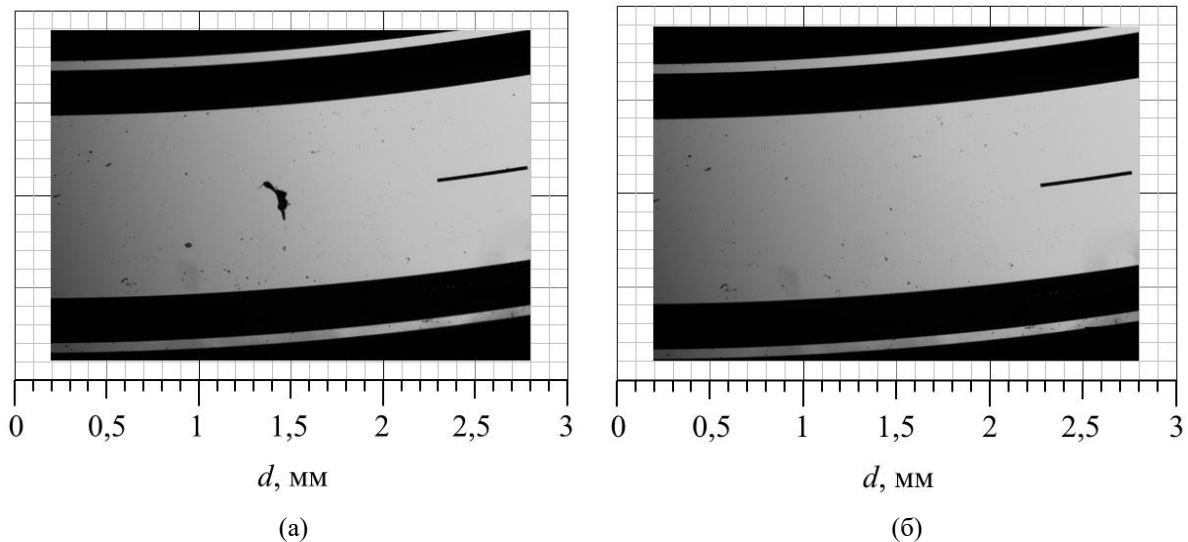


Рис. 6. Зображення поверхні зразка з мікрорельєфною структурою до (а) і після (б) видалення залишків металевої плівки сфокусованим лазерним випромінюванням.

інтенсивністю нагріву, що збільшується при наближенні до центру плями.

Наведені результати надають важливу інформацію про теплову динаміку лазерної абляції, дозволяючи точніше прогнозувати поведінку матеріалу під впливом лазерного випромінювання та сприяючи оптимізації параметрів процесу для різних промислових застосувань.

V. Результати експериментальних досліджень з видалення непрозорих дефектів методом лазерного випаровування

Дослідження з видалення непрозорих дефектів (частинок хрому) проводилося за допомогою системи лазерного опромінення, оснащеної імпульсним азотним лазером із довжиною хвилі 337,1 нм і тривалістю імпульсу 20 нс. Лазерний промінь був сфокусований для отримання зони опромінення діаметром 20 мкм, що забезпечувало точне фокусування на дефектах. Експерименти були спрямовані на селективне видалення непрозорих дефектів із мінімальним пошкодженням навколишнього матеріалу та збереженням мікрорельєфної структури підкладки. Імпульсне лазерне випромінювання дозволило ефективно видалити залишки хрому розміром від 5 до 50 мкм, а для більших дефектів процес видалення передбачав сканування лазерним променем області дефекту з перекриттям зон опромінення, що забезпечувало повне випаровування. Було встановлено, що неметалеві непрозорі дефекти, такі як забруднення чи інші частинки, не випаровуються під впливом лазерних імпульсів, що підтверджує селективність методу для металевих дефектів. Мікрозображення поверхні з мікрорельєфною структурою до (рис. 6-а) і після (рис. 6-б) видалення залишків металевої плівки за допомогою сфокусованого лазерного

випромінювання демонструють ефективність методу. Зображення свідчать про успішне усунення залишків хрому при збереженні мікрорельєфної структури диска. Процес видалення також показав наявність тонкої металевої плівки, що залишалася після селективного травлення хромової плівки, яка була повністю випарувана за оптимальних умов налаштування лазерного опромінення, залишаючи чисту поверхню.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили високу точність і селективність методу з застосуванням імпульсного азотного лазера для видалення непрозорих металевих дефектів, забезпечуючи мінімальне пошкодження мікрорельєфної структури. Отримані результати підкреслюють ефективність цього методу для контрольованої абляції з чітко визначеною зоною обробки поверхні, що робить його найбільш придатним для високоточних застосувань. Крім того, зазначені параметри лазерної системи свідчать про значний потенціал для промислового використання у сфері очищення поверхонь і корекції дефектів, особливо для підкладок зі складними мікрорельєфними структурами, де традиційні методи можуть бути недостатньо точними або призводити до пошкодження мікрорельєфної структури.

Висновки

Актуальність лазерної абляції для усунення дефектів у модуляційних дисках зумовлена необхідністю відповідати технологічним вимогам до високоточних оптичних сенсорів, що застосовуються в промисловості та військовій сфері. Проведене дослідження показало важливість використання точних методів видалення дефектів для забезпечення надійності та точності цих критично важливих компонентів.

Основні результати дослідження:

Запропоновано математичну модель на основі

рівняння теплопровідності в циліндричних координатах для моделювання взаємодії лазера з матеріалом. Модель враховує теплопередачу, фазові переходи та аналіз напружень, що дозволяє дослідити просторово-часову зміну температури, тепловий потік і динаміку видалення шарів.

Проведене математичне моделювання процесу дозволило виявити ключові термічні особливості, зокрема радіальні профілі температури та зміну товщини залишкового шару, що дозволяє точно оптимізувати параметри лазера (енергію імпульсу, тривалість та фокусну відстань).

Експериментальне дослідження підтвердило можливість селективного видалення залишків хрому (5–50 мкм) за допомогою імпульсного азотного лазера з довжиною хвилі 337,1 нм і тривалістю імпульсу 20 нс. Лазерна система забезпечила високу точність обробки з діаметром зони опромінення 20 мкм, зберігаючи мікроструктуру та мінімізуючи пошкодження навколишнього матеріалу.

Дослідження підтвердило високу точність і селективність імпульсної лазерної абляції для видалення металевих дефектів, зокрема залишків

хрому, без локальних пошкоджень. Запропонована математична модель та результати експериментів демонструють перспективність лазерної абляції для вдосконалення мікроструктур модуляційних дисків, що відкриває можливості для розвитку технологій виробництва високоточних оптичних елементів.

Конфлікт інтересів

Немає конфлікту інтересів

Подяка

Автори висловлюють глибоку подяку Національному фонду досліджень України за фінансову підтримку у рамках проєкту №2023.04/0004.

Манько Д.Ю. – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник;
Беляк Є.В. – к.т.н., старший науковий співробітник;
Бутко О.М. – науковий співробітник;
Чегіль Ю.І. – науковий співробітник;
Панкратова А.В. – старший науковий співробітник;
Крючин А.А. – д.т.н, професор.

- [1] M. Hossain, J. K. Rakshit, & M. Pal Singh, *Numerical Analysis of all-optical silicon microring resonator-based cyclic redundancy check encoder*, Journal of Nanophotonics, 16 (03), 036007-1 (2022); <https://doi.org/10.1117/1.jnp.16.036007>.
- [2] Y. Liu, W. Gu, Z. Mei, D. Sun, *Efficient FPGA-based LDPC encoder implementation for Optical Communication Systems*, 2023 21st International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), 1–3 (2023); <https://doi.org/10.1109/icocn.59242.2023.10236181>.
- [3] C. Patruno, V. Renò, M. Nitti, G. Pernisco, N. Mosca, *Optical encoder neural network: A CNN-based optical encoder for robot localization*, Optical Engineering, 62(04), 041402-1 (2022); <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.4.041402>.
- [4] R. K. Megalingam, S. A. Anil, J. M. Varghese, *FPGA based navigation platform for fixed path navigation with distance estimation using rotation encoder*, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 3134 (2016); <https://doi.org/10.1109/iceeot.2016.7755279>.
- [5] B. Ali, R. N. Sadekov, V. V. Tsodokova, *A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on Computer Vision Systems, Gyroscopy and Navigation*, 13 (4), 241 (2022); <https://doi.org/10.1134/s2075108722040022>.
- [6] I.V. Kosyak, D.Yu. Manko, Ie.V. Beliak, A.A. Kryuchyn, *Methodology for transforming code sequences according to the modulation disk coordinate system*, Electronic Modeling, 46(5), 35 (2024); <https://doi.org/10.15407/emodel.46.05.035>.
- [7] K. Eberhardt, S. Esser, H. Haider, *Abstract feature codes: The building blocks of the implicit learning system*, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 43(7), 1275 (2017); <https://doi.org/10.1037/xhp0000380>.
- [8] P.K. Panigrahi, S.K. Bisoy, *Localization strategies for autonomous mobile robots: a review*, J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci., 34 (8B), 6019 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.015>.
- [9] J. Seybold, A. Büla, K. P. Fritz, A. Frank, C. Scherjon, J. Burghartz, A. Zimmermann, *Miniaturized optical encoder with micro-structured encoder disc*, Applied Sciences, 9(3), 452 (2019); <https://doi.org/10.3390/app9030452>.
- [10] S. Liu, H. C. Zhang, L. Zhang, Q. L. Yang, Q. Xu, J. Gu, Y. Yang, X. Y. Zhou, J. Han, Q. Cheng, W. Zhang, T. J. Cui, *Full-state controls of terahertz waves using tensor coding metasurfaces*. ACS Applied Materials & Interfaces, 9 (25), 21503 (2017); <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02789>.
- [11] S. Liu, T. J. Cui, *Flexible controls of terahertz waves using coding and programmable metasurfaces*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 23 (4), 1 (2017); <https://doi.org/10.1109/jstqe.2016.2599273>.
- [12] M. Hossain, J. K. Rakshit, M. Pal Singh, *Numerical Analysis of all-optical silicon micro-ring resonator-based cyclic redundancy check encoder*. Journal of Nanophotonics, 16(03). 036007-1 (2022); <https://doi.org/10.1117/1.jnp.16.036007>.
- [13] R. K. Megalingam, S. A. Anil, J. M. Varghese, *FPGA based navigation platform for fixed path navigation with distance estimation using rotation encoder*, 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 3134–3138. <https://doi.org/10.1109/iceeot.2016.7755279>.

- [14] B. Ali, R. N. Sadekov, V. V. Tsodokova, *A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on Computer Vision Systems*. Gyroscopy and Navigation, 13(4), 241 (2022); <https://doi.org/10.1134/s2075108722040022>.
- [15] M. Darnon, *Plasma etching in Microelectronics*, Plasma Etching Processes for CMOS Devices Realization 23 (2017); <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-096-6.50002-x>.
- [16] F. Tian, T. Wang, X. Lu, *Endpoint detection based on optical method in chemical mechanical polishing*, Micromachines, 14 (11), 2053 (2023); <https://doi.org/10.3390/mi14112053>.
- [17] T. Ding, Y. Xie, Z. Shen, X. Cheng, Z. Wang, *Ultrasonic cleaning optimization research for ultrasmooth optical substrate with artificial micron/submicron silica spheres*, Optical Engineering, 53(12), 122514 (2014); <https://doi.org/10.1117/1.oe.53.12.122514>.
- [18] B. Tang, K. Sato, *Advanced surfactant-modified wet anisotropic etching* (Microelectromechanical Systems and Devices, 2012); <https://doi.org/10.5772/26901>.
- [19] Y. Zhou, L. Zhao, Y. Tang, Q. Deng, S. Hu, *Dimensional Metrology of micro structure based on modulation depth in Scanning Broadband Light Interferometry*, Applied Optical Metrology II, 10373(38), 103730G-1 (2017); <https://doi.org/10.1117/12.2280001>.
- [20] M. R. Schmidt, P. Flanigan, D. Thibault, *Photomask repair using an advanced laser-based repair system (MARS2)*, SPIE Proceedings, 4889, 1023 (2002); <https://doi.org/10.1117/12.467505>.
- [21] T.E. Robinson, J.Le Claire, *Advanced Laser repair of EUV photomasks*. Photomask Japan 2019: XXVI Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology, 10; 111780K01 (2019); <https://doi.org/10.1117/12.2534759>.
- [22] T.E. Robinson, J.Le Claire, *Update on the performance of photomask repair and clean with DUV femtosecond laser processes*, Photomask Japan 2018: XXV Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology, 10807091 (2018); <https://doi.org/10.1117/12.2325009>.
- [23] D. Stonyte, V. Jukna, D. Paipulas, *Direct laser ablation of glasses with low surface roughness using femtosecond UV laser pulses*, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 17(2), 121 (2022); <https://doi.org/10.2961/jlmn.2022.02.2008>.
- [24] B. Kim, H. K. Nam, Y. J. Kim, S. W. Kim, *Lift-off ablation of metal thin films for micropatterning using ultrashort laser pulses*, Metals, 11 (10), 1586 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11101586>.
- [25] S. Brose, *Stand-alone EUV setups for photomask related inspection tasks*, Photomask Japan 2022: XXVIII Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology, 49 (2022); <https://doi.org/10.1117/12.2656141>.
- [26] T. Robinson, D. Yi, R. White, R. Bozak, M. Archuletta, D. Lee, *Nanomachining of non-orthogonal mask patterns*. SPIE Proceedings, 77481H1 (2010); <https://doi.org/10.1117/12.865198>.

D.Yu. Manko, Ie.V. Beliak, O.M. Butok, Yu.I. Chehil, A.V. Pankratova, A.A. Kryuchyn

Analysis of methods for detecting opaque defects on the surface of modulation disks (review)

Institute for information recording, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, dmitriy.manko@gmail.com

The study explores modulation disks as high-precision optical sensors for measuring angular positions and rotational velocities, crucial for industrial and military use. Laser ablation is employed to refine microstructure formation, ensuring precise etching, defect elimination, and chromium residue removal. A classification of opaque defects on disk substrates identifies key causes and mitigation challenges, including risks of damaging adjacent structures during ablation. A mathematical model based on the heat conduction equation in cylindrical coordinates describes defect behavior under laser irradiation, optimizing ablation depth and minimizing thermal damage. Numerical simulations reveal thermal behavior, temperature distribution, and material removal dynamics, guiding laser parameter optimization. Experiments using a pulsed nitrogen laser (337.1 nm, 20 ns pulse) demonstrated selective chromium defect removal (5–50 μm) with minimal substrate damage. Non-metallic contaminants remained unaffected, confirming method selectivity. Microimages of the sample surface revealed the successful elimination of chromium residues and thin residual metal films under optimal laser conditions.

Keywords: modulation disks, opaque defects removal, laser ablation, heat conduction model.