

В.В. Петров, А.А. Крючин, Є.В. Беляк, Д.Ю. Манько, І.В. Косяк, О.Г. Мельник

Преваги прямого лазерного запису для збільшення роздільної здатності процесу виготовлення дифракційних оптичних елементів

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна, beliak1312@gmail.com

Розроблено та впроваджено технологію прямого лазерного запису кодових послідовностей на модуляційних дисках з забезпеченням високої точності і надійності процесу формування структурних елементів. Показано основні переваги застосування прямого лазерного запису у порівнянні з методом контактної літографії при формуванні елементів субмікронного розміру. Запропонована технологія характеризується високою роздільною здатністю і гнучкістю у налаштуванні параметрів системи оптичного запису, що робить її придатною для широкого спектра застосувань у галузі мікрооптики. Прямий оптичний запис як перспективний підхід збільшення роздільної здатності оптичних систем, що застосовуються при записі дифракційних оптичних елементів субмікронного розміру, оскільки відповідна технологія забезпечує можливість створення складних оптичних структур. У процесі роботи також було проведено детальну класифікацію актуальних підходів, що можуть бути використані для подальшого збільшення роздільної здатності системи оптичного запису, таких як нанесення на поверхню fotocутливого шару насиченого поглинача, використання лазерного пучка з інтенсивністю, що моделюється функцією Бесселя, а також синтез fotocутливих матеріалів з оптимізованою експозиційною характеристикою, що забезпечує високу ефективність та точність у процесі прямого лазерного запису.

Ключові слова: дифракційні оптичні елементи, модуляційні диски, роздільна здатність, прямий лазерний запис, субмікронні структури, халькогенідні напівпровідники, тепловий режим експонування.

Подано до редакції 03.08.2024; прийнято до редакції 16.09.2024.

Вступ

На сьогоднішній день однією з найбільш перспективних технологій у галузі створення дифракційних оптичних елементів вважається технологія прямого лазерного запису [1-3]. Основною проблемою при створенні дифракційних оптичних елементів (Diffractive Optical Element; DOE), у тому числі перспективного класу зазначених структур на основі метаповерхонь [3, 4], що виготовлені зі світлочутливих матеріалів, є формування субмікронних структур. З розвитком субхвильових оптичних пристроїв, таких як дифракційні решітки, фотонні сита і метапристрої [4, 5], актуальність задачі формування мікророзмірних та нанорозмірних структур на прозорих підкладках дедалі зростає.

Розмір складових елементів відповідних пристроїв, а також крок і період елементів матриці паттерну в багатьох випадках є меншим за довжину хвилі оптичної головки. Таким чином, оптичні системи прямого лазерного запису, розмірність яких відповідає дифракційній межі, можна використовувати лише у галузі високошвидкісної літографії паттернів з розмірами складових елементів масштабу довжини хвилі оптичного діапазону (380-750 нм, у залежності від типу джерела лазерного світла), тоді як для запису субмікронних та нанорозмірних структур більшою мірою використовуються технології електронно-променевої літографії (Electron Beam Lithography; EBL) та сфокусованої іонно-променевої літографії (Focused Ion Beam Lithography; FIBL), що характеризуються

низькою швидкістю запису, високою вартістю формування елементів і відносно невеликою зоною запису, що вказує на ряд очевидних обмежень [6, 7].

Реалізувати методику прямого лазерного запису широкого класу дифракційних оптичних елементів можна за умов впровадження та налаштування оптичних систем, роздільна здатність яких є меншою за дифракційну межу. Це надає можливість вказати на високу актуальність задачі по розробці і оптимізації методів субдифракційного оптичного запису. Для формування структурних елементів, розмірність яких лежить за дифракційною межею, на сьогоднішній день використовується низка технологій, що широко застосовуються у сучасних системах оптичного запису інформації. У основі більшості з них лежить впровадження процесу прямого лазерного запису променем з гаусовим розподілом інтенсивності на нелінійному реєструвальному середовищі, а також використання спеціальних типів фоторезистів, зокрема, неорганічних фоторезистів [8, 9]. Слід зауважити, що сучасні методи досягнення надвисокої роздільної здатності шляхом подолання дифракційної межі характеризуються високою вартістю і відсутністю цілісної методології проектування оптичних систем на їх основі. Це призводить до невідповідності представлених методів для більшості застосувань у сфері прямого лазерного запису [5, 10].

I. Підвищення роздільної здатності систем прямого лазерного запису

При проектуванні систем оптичного запису субмікронних структур DOE за основу, зазвичай, береться технологія оптичної літографії прямого лазерного запису (Direct Write Lithography; DWL) на основі набору короткохвильових лазерних діодів видимого діапазону з довжинами хвиль випромінювання у 405 нм та 375 нм. Як було зазначено вище, одним з основних напрямів розвитку технології прямого лазерного запису є підвищення просторової роздільної здатності оптичної системи при виготовленні субмікронних структур. Розглянемо найбільш актуальні технології підвищення роздільної здатності систем прямого лазерного запису, які можуть бути використані при виготовленні дифракційних оптичних елементів. Базовим підходом, що використовується для досягнення субдифракційної роздільної здатності є використання шарів насичених поглиначів, що наносяться на фоточутливий шар області оптичного запису.

Зазначений метод широко досліджувався для проектуванні оптичних носіїв архівного зберігання даних, систем оптичної літографії, тощо. Дослідники вказують на те, що застосування халькогенідних матеріалів, як то Sb_2Te_3 , Bi_2Se_3 і Vi_2Te_3 , є надзвичайно ефективним при формуванні структур з фіксованими спектрами поглинання, що надалі можуть бути використані як шари насичених поглиначів, що надають можливість збільшити роздільну здатність системи оптичного запису [10-12]. Особливості поглинання сфокусованого променя світла у структурах на основі відповідних матеріалів пов'язані

зі знебарвленням світла при насиченні поглинання у процесі опромінення зразка інтенсивними лазерними імпульсами [10-12]. Коли сфокусований лазерний промінь з гаусовим розподілом інтенсивності проходить через шар насиченого поглиначя, область низької інтенсивності гаусового імпульсу зазнає більшого поглинання, а центральна область високої інтенсивності поглинається менше, як це показано на базовій схемі субдифракційного оптичного запису, що представлена на рис. 1. Це призводить до просторового зменшення розміру гаусового імпульсу, що, у свою чергу, відповідає збільшенню роздільної здатності системи прямого лазерного запису. Залежність для показника пропускання області запису фоточутливого шару, що представлено рис. 2, у свою чергу, вказує на просторове зменшення гаусового променя, що моделювалось з використанням нелінійного закону Ламберта [10]. Результати математичного моделювання показують, що нанесення шару насиченого поглиначя на основі Bi_2Se_3 призводить до зменшення розміру записаного елементу на 15% і, відповідно, надає можливість реалізувати технологію субдифракційного оптичного запису.

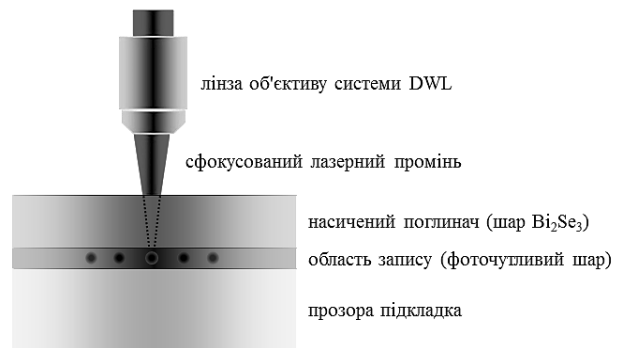


Рис. 1. Схема субдифракційного оптичного запису з використанням насиченого поглиначя [10].

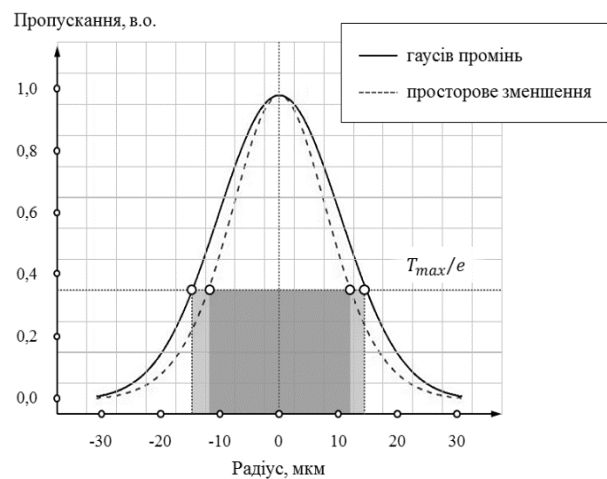


Рис. 2. Результати математичного моделювання процедури зменшення розміру гаусового пучка після проходження крізь структуру $BiSe_3$ [10].

Подальше дослідження сучасних методів зі створення технологій підвищення роздільної здатності дифракційнообмежених оптичних систем

показали, що збільшення роздільної здатності можна досягти при впровадженні технології прямого лазерного запису у шарі фоточутливого матеріалу з нелінійними характеристиками за умов неоднорідного розподілу інтенсивності сфокусованого променя [13, 14]. При вирішенні задачі запису субмікронних структурних елементів DOE фоточутливих матеріалів з пороговою експозиційною характеристикою для підвищення просторової роздільної здатності оптичної системи найбільш важливо обрати оптимальну форму розподілу інтенсивності у сфокусованому лазерному промені. Як було показано вище, найпоширенішим видом розподілу інтенсивності є гаусів розподіл, однак для ряду актуальних завдань відповідний вибір не є оптимальним. При цьому можна зауважити переваги у організації прямого лазерного запису з розподілом інтенсивності, що характеризується вираженим центральним піком і менш вираженими бічними пелюстками. У зв'язку з тим, що процедура оптичного запису здійснюється лише при досягненні порогової потужності випромінювання, бічні максимуми сфокусованого світла на поверхні фоточутливого матеріалу практично не впливають на результат оптичного запису. Прикладом такого негаусового пучка може бути сфокусований лазерний промінь з розподілом інтенсивності що моделюється функцією Бесселя нульового порядку, як це показано на рис. 3. Зазначений тип розподілу інтенсивності може бути представлено як найбільш перспективний розподіл для системи субдифракційного оптичного запису. Результати досліджень, що представлено в значній кількості сучасних публікацій, вказують на те, що використання негаусового пучка для запису структурних елементів паттерну в області запису фоточутливого шару з нелінійною (пороговою) характеристикою дозволяє забезпечити зменшення геометричних розмірів складових елементів на 35-40% [16-18]. При цьому зазначається, що для реалізації режиму запису з високою роздільною здатністю необхідно забезпечити суворе дотримання розрахованих за допомогою математичної моделі процесу запису, що базується на функції розподілу інтенсивності у сфокусованому пучку лазерного випромінювання. Відповідний режим запису може бути реалізовано тільки при жорсткому контролі потужності лазерного джерела та точній роботі системи автоматичного фокусування лазерного випромінювання на станції запису. Таким чином, особлива увага повинна приділятися створенню систем стабілізації потужності лазерного випромінювання, що лежить в основі високоточної системи автоматичної генерації лазерного випромінювання для запису DOE [19].

Перспективним підходом у галузі проектування системи субдифракційного оптичного запису є використання джерел пікосекундних та фемтосекундних лазерних імпульсів [15, 20]. Загалом, як зазначають дослідники, при математичному моделюванні процесів, що відбуваються у середовищі фоточутливого шару під час прямого лазерного запису, можна провести багаторівневу класифікацію у відповідності до довжини імпульсу лазерного джерела

(рис. 4):

1. Квантові процеси, що пов'язані зі збудженням та релаксацією носіїв заряду (електрони та дірки), характерні для ультракоротких імпульсів у діапазоні від 10 фс до 100 пс. Це включає у себе розсіювання на фонах (діапазон 1 – 100 пс), розсіювання на носіях (30 фс – 100 пс), а також інші нелінійні ефекти (10 фс – 30 пс).

2. Процеси, що пов'язані зі структурними змінами та тепловою дифузією у середовищі фоточутливого шару, які спостерігаються для імпульсів з періодом більше 100 пс. Це включає у себе в першу чергу широкий набір теплових ефектів для діапазону імпульсів від 100 нс та діелектричний пробій (діапазон 100 пс – 100 мкс).

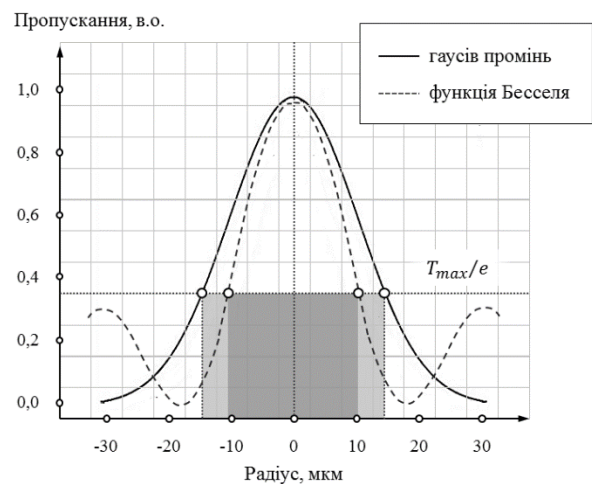


Рис. 3. Результати математичного моделювання розподілу інтенсивності сфокусованого лазерного пучка на основі функції Бесселя [13].

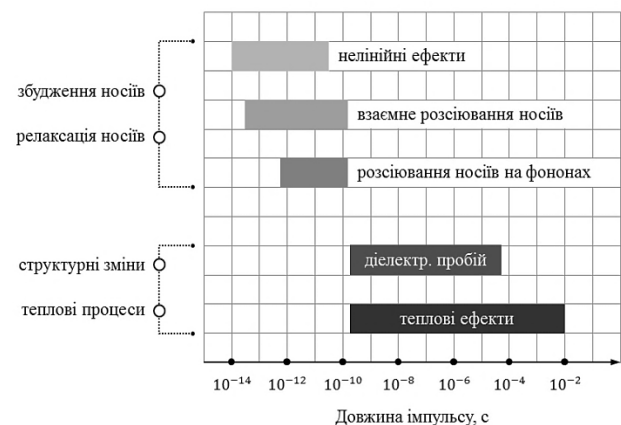


Рис. 4. Діаграма співвіднесення механізмів впливу фемтосекундних та наносекундних імпульсів лазерного випромінювання на середовище фоточутливого шару [15].

Організація процедури прямого лазерного запису структурних елементів DOE фемтосекундними лазерними імпульсами, таким чином, надає можливість забезпечити формування відповідних паттернів з високою точністю завдяки зменшенню рівня дифузії тепла у сусідні елементи структури [15-20]. При цьому в процесі прямого лазерного запису

повинні контролюватися типові параметри лазерного джерела, включаючи потужність, площу та геометричні параметри плями сфокусованого лазерного світла, довжину хвилі, тривалість імпульсу, а також частоту повторення імпульсів. Визначення відповідних параметрів необхідно для належної підготовки оптичної системи у відповідності до розподілу інтенсивності випромінювання.

Для забезпечення режиму субдифракційного оптичного запису необхідно також точне знання властивостей фоторезисту, параметрів експозиції та часу прояву фоторезисту. Режим прямого лазерного запису, що кратно перевищує роздільну здатність дифракційної межі, досягається в результаті відповідного вибору потужності лазера запису і швидкості сканування. Так, у лабораторних умовах були записані надтонкі лінії шириною 65 нм, що складало 1/8 від довжини хвилі лазерного джерела завдяки технології формування квантових точок (Quantum Dots; QD) у середовищі фоточутливого шару на основі полімерних нанокомпозитів [21]. Квантові точки, вбудовані в полімерну матрицю, можуть бути налаштовані для поглинання та випромінювання світла в певному спектральному діапазоні, що дозволяє створювати високочутливі середовища для оптичного запису з субдифракційною роздільною здатністю. Полімерні матриці забезпечують захист квантових точок від агрегації і фотодеградації, що важливо для дотримання стабільності оптичних параметрів структур DOE. Слід зазначити, що надвисока роздільна здатність системи оптичного запису, яка надала можливість формувати структурні елементи з лінійними розмірами у вісім разів меншими за дифракційну межу, була отримана завдяки регулюванню потужності лазерного джерела для максимального наближення до порогового значення процесу полімеризації [21].

II. Запис структури DOE з субмікронною роздільною здатністю на спеціальних типах фоторезистів

Для виготовлення DOE субмікронних розмірів методом прямого лазерного запису розробляються і використовуються спеціальні фоторезисти з нелінійною експозиційною характеристикою. Перспективним типом фоторезистів для запису дифракційних елементів з субмікронними розмірами є фоторезисти з тепловим режимом експонування (Heat-Mode Resists; HMR), які надають можливість просторово обмежити зону фокусування лазерного випромінювання для досягнення субмікронної експозиції у процесі прямого лазерного запису. Слід зауважити, що індукована лазерним пучком область високого нагріву на поверхні шару фоторезисту може бути набагато меншою площею відповідної світлової плями. Використовуючи процедуру джоулевого нагрівання, можна здійснити просторово обмежену експозицію на терморезистивних плівках. Рельєфні структури при цьому отримуються за допомогою

процесу мокрого травлення. При цьому завдяки параметрам неорганічних фоторезистів, що виражені через основні структурні одиниці, можливо отримати надзвичайно високу роздільну здатність і чіткі межі структурних елементів. Встановлено, що халькогенідний сплав AgInSbTe (AIST) у рамках зазначеної процедури виконує роль терморезисту, його нанесення на поверхню підкладки з кварцового скла надало можливість сформувати набір структур із мікро- та наноструктурними елементами, мінімальний розмір яких становить 130 нм, що складає приблизно 1/3 довжини хвилі лазерного джерела [22]. Перспективним типом фоторезистів для виготовлення DOE субмікронних розмірів є неорганічні фоторезисти на основі халькогенідних напівпровідників з фотоструктурними перетвореннями. Роздільна здатність як оптичний параметр фоточутливих матеріалів на основі халькогенідних напівпровідників, дозволяє надійно оцінити можливість формування сфокусованим лазерним випромінюванням субмікронних структур. На плівках халькогенідних напівпровідників, у тому числі з фазовими переходами, методом прямого лазерного запису можна формувати структурні складові DOE з лінійними розмірами 0,3-0,4 мкм [8]. Найбільшою роздільною здатністю характеризуються фоторезисти на основі халькогенідних напівпровідників з металевими наночастинками [1]. Відповідна технологія формування субмікронних структур на плівках халькогенідних напівпровідників може бути використана для виготовлення широкого класу DOE, як то лінз, решіток, голограм, а також метаповерхонь на основі резонансних структур.

Для підвищення ефективності прямого лазерного запису на субмікронних розмірах важливим напрямом досліджень є розробка адаптивних алгоритмів контролю параметрів лазерного впливу. Зокрема, використання таких алгоритмів дозволяє автоматично налаштовувати інтенсивність і тривалість лазерного імпульсу залежно від властивостей фоторезисту та конкретних вимог до формування структури. Це забезпечує підвищену точність і однорідність створених елементів, а також мінімізує ризик пошкодження матеріалу під час експозиції. Поєднання цих алгоритмів із сучасними методами моделювання процесів теплообміну в матеріалах під впливом лазерного випромінювання відкриває нові можливості для оптимізації процесу виготовлення дифракційних оптичних елементів із надвисокою роздільною здатністю.

III. Впровадження процедури прямого лазерного запису інформаційних елементів модуляційних дисків

Для синтезу дифракційних оптичних елементів найбільш ефективним і адаптованим до модифікацій інструментом є кругову лазерну систему оптичного запису. Вони ґрунтуються на локальному експонуванні підкладки з шаром реєструвального матеріалу шляхом безперервного її обертання та

покрокового переміщення сфокусованого лазерного пучка вздовж радіусу. Запис здійснювався лазером з довжиною хвилі 405 нм на скляну підкладку покриту шаром фоторезисту, яка оберталась з швидкістю 7 об/с (лінійна швидкість при цьому становила 0,8 м/с). Зображення інформаційних елементів модуляційного диску сформовані прямим лазерним записом наведено на рис. 5.

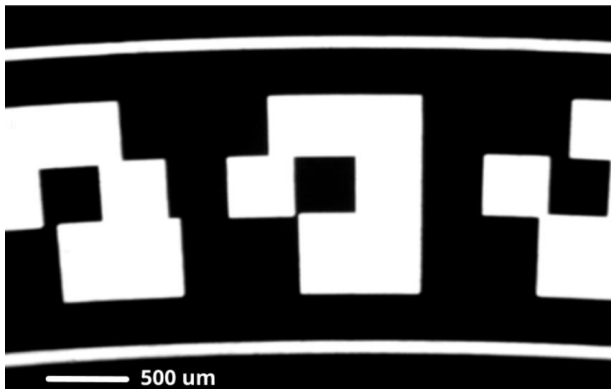


Рис. 5. Зображення інформаційних елементів модуляційного диску сформовані прямим лазерним записом.

Основна увага при здійсненні процесу прямого лазерного запису повинна приділятися отриманню різкого переходу між темними і світлими елементами,

що відповідає вкритим та неvkритим півкою хрому областям підкладки. На рис. 6 та 7 наведено мікрображення переходів між відповідними областями зони запису підкладки модуляційного диску, що були отримані на сканувальному тунельному мікроскопі.

При створенні системи запису модуляційних дисків була побудована підсистема автоматичного фокусування лазерного випромінювання. Забезпечення високої швидкості роботи системи автоматичного фокусування здійснювалось за рахунок використання п'єзоелектричного актуатору для керування об'єктивом, причому підкладки модуляційних дисків обирались з показником биття не більше 10 мкм. На рис. 6-а наведено профілі структурних елементів модуляційного диску записаного методами контактної літографії, у той час як на рис. 6-б і 6-в представлено нанорозмірні елементи рельєфу і мікрображення області переходу, відповідно.

При порівнянні профілю структурних елементів, мікрорельєфу і мікрображення області переходу з відповідними результатами отриманими для модуляційного диску, що було записано методом прямого лазерного запису (рис. 7), можна вказати на кардинальне збільшення рівню точності формування субмікронних елементів. Метод прямого лазерного запису дозволяє отримати інформаційні елементи з

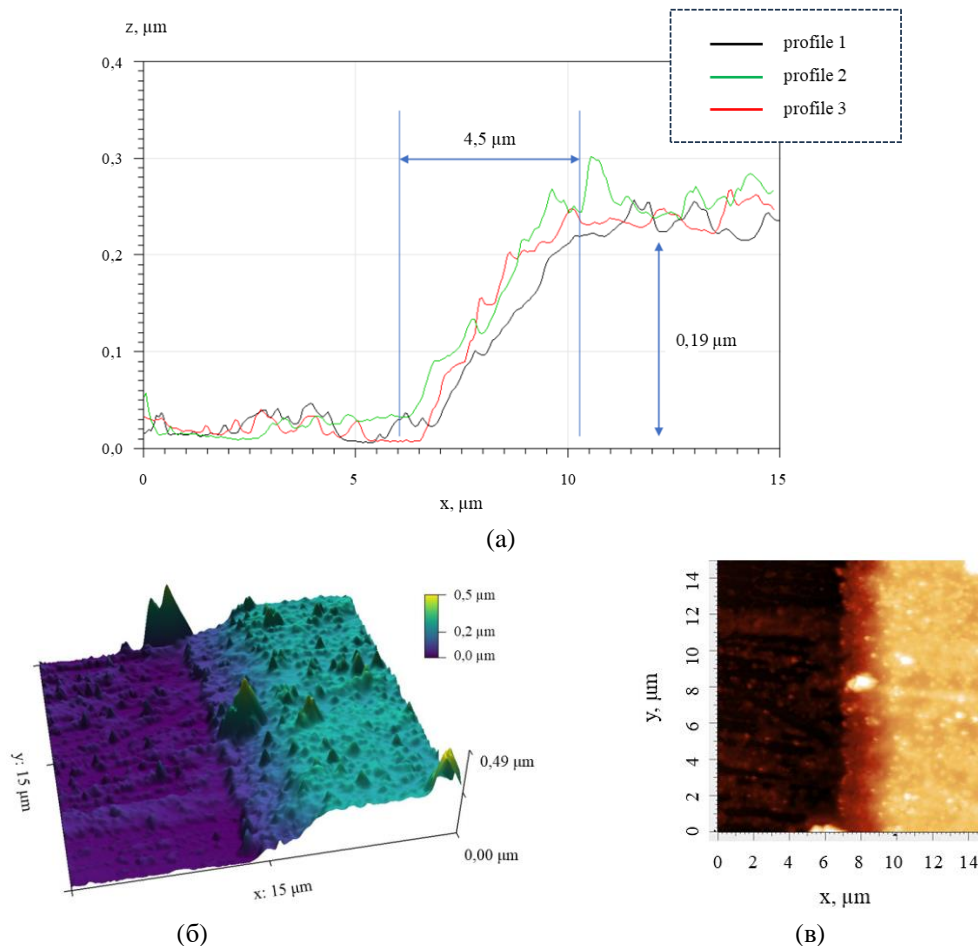


Рис. 6. Результати дослідження області переходу модуляційного диску, записаного методами контактної літографії: (а) профіль елемента; (б) мікрорельєф; (в) мікрображення.

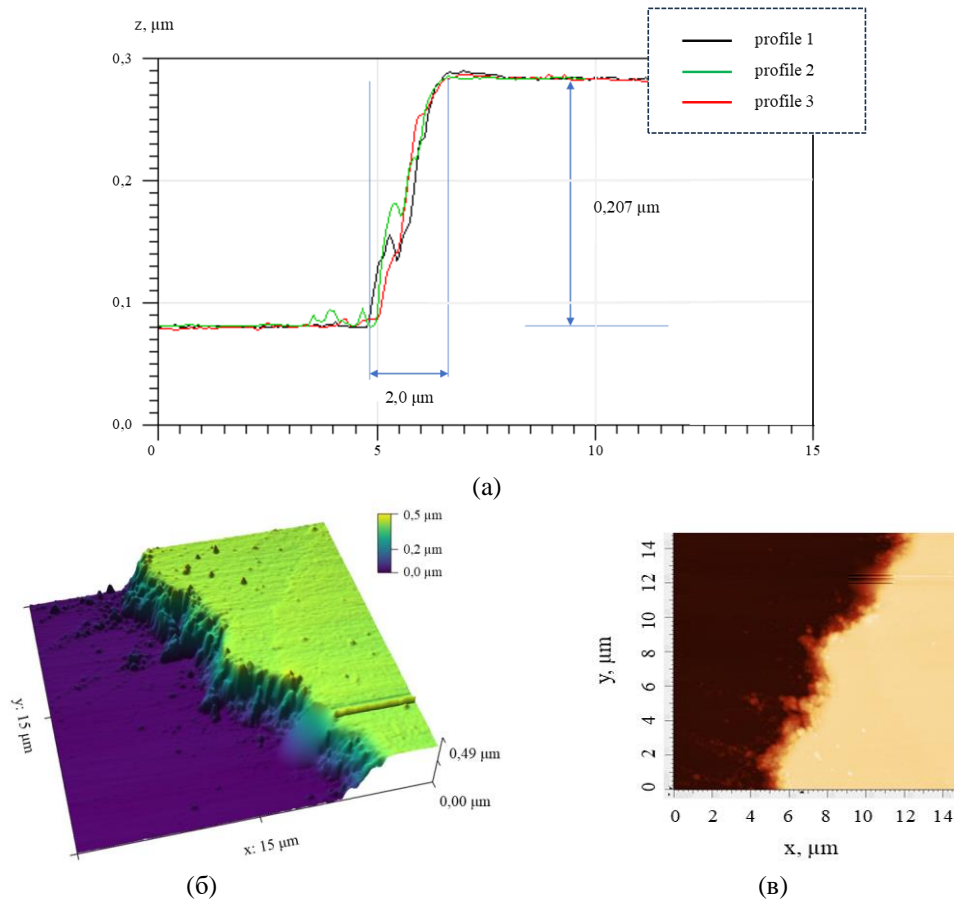


Рис. 7. Результати дослідження області переходу модуляційного диску, записаного методом прямого лазерного запису: (а) профіль елемента; (б) мікрорельєф; (в) мікрозображення

шириною області переходу між інформаційним елементом хрому і скляною підкладкою модуляційного диску у 2 мкм, що порівняно з областю переходу модуляційного диску, записаного методом контактної літографії у 4,5 мкм, надає можливість для збільшення роздільної здатності паттерну модуляційного диску у 2,25 рази. Подальше зменшення ширини області переходу при застосуванні методу прямого лазерного запису можливо через оптимізацію режиму селективного хімічного травлення шару фоторезисту та хрому.

Завдяки можливості точного формування мікрота наноструктур на поверхні підкладки, проектування оптичних систем надвисокої роздільної здатності відкриває перспективи для створення широкого спектру інноваційних оптичних компонентів з високими експлуатаційними характеристиками. Такі досягнення сприяють подальшому розвитку технологій в області оптичної інженерії та розширюють можливість їх застосування в суміжних наукомістких галузях.

Висновки

Проведено аналіз методів зі збільшення роздільної здатності систем прямого лазерного запису. У результаті дослідження було визначено та проведено класифікацію найбільш актуальних підходів, що використовуються при прямому

лазерному записі елементів субмікронного розміру:

Розроблено технологію прямого лазерного запису структурних складових DOE з глибиною рельєфу 0,3-0,4 мкм на основі плівок халькогенідних напівпровідників, а також паттернів модуляційного диску, що були отримані з високими показниками роздільної здатності та контрасту, і, таким чином, мають незаперечні переваги у порівнянні з методами контактної літографії.

Представлено методику нанесення на поверхню фоточутливого шару області запису насиченого поглинача на основі халькогенідних матеріалів (Sb_2Te_3 , Bi_2Se_3 і Bi_2Te_3) з метою просторового зменшення розміру лазерного пучка.

Визначено особливості застосування лазерного пучка з розподілом інтенсивності, що моделюється у відповідності до функції Бесселя, основний максимум якої є вужчим за функцію Гауса, а побічні максимуми не перевищують порогові характеристики фоточутливого шару.

Зазначено переваги у синтезі фоточутливих матеріалів з пороговою експозиційною характеристикою, що оптимізується у відповідності до розподілу інтенсивності у сфокусованому лазерному промені.

Розглянуто підходи з організації процедури прямого лазерного запису фемтосекундними лазерними імпульсами, що надає можливість забезпечити формування структурних елементів з високою точністю завдяки зменшенню рівня дифузії

тепла в сусідні елементи структури.

прямого лазерного запису, засобами сканувальної тунельної мікроскопії.

Конфлікт інтересів

Немає конфлікту інтересів

Подяка

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

Автори також висловлюють глибоку подяку керівнику Центру колективного користування науковим обладнанням Литвину Петру Мар'яновичу та співробітникам Інституту фізики напівпровідників ім. В.С. Лашкарьова НАН України за допомогу у проведенні дослідження мікрорельєфу області запису модуляційних дисків, що були отримані методами контактної літографії та

Петров В.В. – академік НАН України, професор, доктор технічних наук, директор Інституту проблем реєстрації інформації НАН України;
Крючин А.А. – член-кореспондент НАН України, професор, доктор технічних наук, завідувач відділу оптичних носіїв інформації Інституту проблем реєстрації інформації НАН України;
Беляк Є.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник;
Манько Д.Ю. – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник;
Косяк І.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник;
Мельник О.Г. – науковий співробітник.

- [1] Iu.L. Vynnykov, S.F. Pichuhin, O.O. Dovzhenko, A.O. Dmytrenko, P.P. Voskobiinyk, A.V. Yakovliev, V.V. Petrov, A.A. Kryuchyn, V. M. Rubish, & M.L. Trunov, (2022). *Recording of micro/nanosized elements on thin films of glassy chalcogenide semiconductors by optical radiation*. Chalcogenides - Preparation and Applications. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102886>.
- [2] А.В. Коротун, А.О. Коваль, А.А. Крючин, В.М. Рубіш, В.В. Петров, І.М. Тітов, *Нанопотонні технології. Сучасний стан і перспективи*. Ужгород: ФОП Сабов А.М. (2019).
- [3] Петров, В.В., Антонов, Е.Е., Крючин, А.А., Шанойло, С.М. *Микропризмы в офтальмологии*. Київ, Наук. думка, (2019).
- [4] S. Kar, *Metamaterials and metasurfaces. Basics and trends*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2023); <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-5532-2>.
- [5] V.V. Petrov, Z. Le, A.A. Kryuchyn, S.M. Shanoylo, M. Fu, Ie.V. Belyak, D.Yu. Manko, A.S. Lapchuk, E.M. Morozov, *Long-term storage of digital information*. Akadempriodyka. Kyiv. (2018); <https://doi.org/10.15407/Akadempriodyka.360.148>.
- [6] B. Berčić, A. Drnovšek, & D. Mihailović, *Electron beam lithography*. Handbook of Microscopy for Nanotechnology, 287 (2009); https://doi.org/10.1007/1-4020-8006-9_10.
- [7] K. Stokes, K. Clark, D. Odetade, M. Hardy, P. Goldberg Oppenheimer, *Advances in lithographic techniques for precision nanostructure fabrication in biomedical applications*. Discov Nano, 18(1), 153 (2023); <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03938-x>.
- [8] A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov, S.O. Kostyukevych, *High density optical recording in thin chalcogenide films*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 13(11-12), p.1487 (2011).
- [9] A.A. Kryuchyn, V.V. Petrov, V.M. Rubish, M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, S.A. Kostyukevich, *Formation of nanoscale structures on chalcogenide films*. Physica Status Solidi (B). (2017); <https://doi.org/10.1002/pssb.201700405>.
- [10] A. Karimbana-Kandy, J. Lumeau, J.-Y. Natoli, & K. Iliopoulos, *2D chalcogenide thin films for super-resolved laser structuring*. EPJ Web of Conferences, 287, 04004 (2023); <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328704004>.
- [11] R.-N. Verrone, A. Campos, M. Cabie, *Te₃ layers: development and characterization*. Advances in Optical Thin Films VII, SPIE, Spain-2021. <https://doi.org/10.1117/12.2597345>.
- [12] D. Coiras, R.-N. Verrone, A. Campos, M. Cabie, L. Gallais, M. Minissale, J. Lumeau, J.-Y. Natoli, K. Iliopoulos, *Laser Annealing of Sb₂Te₃ 2D Layers towards Nonlinear Optical Applications*. Optics 3, 234 (2022); <https://doi.org/10.3390/opt3030023>.
- [13] M. R. Wang, & X. G. Huang, *Subwavelength-resolvable focused non-Gaussian beam shaped with a binary diffractive optical element*. Applied Optics, 38(11), 2171 (1999); <https://doi.org/10.1364/ao.38.002171>.
- [14] B. Park, H. Lee, & S. Jeon, *Inside front cover: Reflection-mode switchable subwavelength Bessel-beam and Gaussian-beam photoacoustic microscopy in vivo*. Journal of Biophotonics, 12(2), (2019); <https://doi.org/10.1002/jbio.201970002>.
- [15] O. Wheeler, *Femtosecond vs. nanosecond laser damage threshold. Understanding laser damage mechanism differences between femtosecond and nanosecond lasers promotes efficiency and longevity of laser systems*. Laser Focus World. Edmund Optics. (2024); <https://www.laserfocusworld.com/optics>.
- [16] N. Stsepuro, P. Nosov, M. Galkin, G. Krasin, M. Kovalev, & S. Kudryashov, *Generating Bessel-Gaussian beams with controlled axial intensity distribution*. Applied Sciences, 10(21), 7911 (2020); <https://doi.org/10.3390/app10217911>.

- [17] M.K. Bhuyan, F. Courvoisier, H.S. Phing, O. Jedrkiewicz, S. Recchia, P. Di Trapani, & J.M. Dudley. *Laser micro- and nanostructuring using femtosecond Bessel beams*. The European Physical Journal Special Topics, 199(1), 101 (2011); <https://doi.org/10.1140/epjst/e2011-01506-0>.
- [18] E. Stankevičius, M. Garliauskas, M. Gedvilas, & G. Račiukaitis, *Bessel-like beam array formation by periodical arrangement of the polymeric round-tip microstructures*. Optics Express, 23(22), 28557 (2015); <https://doi.org/10.1364/oe.23.028557>.
- [19] D.-I. Kim, H.-G. Rhee, J.-B. Song, & Y.-W. Lee, *High-speed and Precision Auto-focusing system for direct laser lithography*. SPIE Proceedings. (2009); <https://doi.org/10.1117/12.825191>.
- [20] Y. Yang, E. Jia, X. Ma, C. Xie, B. Liu, Y. Li, & M. Hu, *High throughput direct writing of a mesoscale binary optical element by femtosecond long focal depth beams*. Light: Advanced Manufacturing, 4(4), 1 (2023); <https://doi.org/10.37188/lam.2023.042>.
- [21] J. Jue, Z. Gan, Z. Luo, & K. Li, *Direct laser writing of functional QD-polymer structure with high resolution*. Materials, 16(6), 2456 (2023); <https://doi.org/10.3390/ma16062456>.
- [22] G. Chen, J. Zheng, Z. Wang, K. Zhang, Z. Mo, X. Liu, T. Gao, Y. Wang, & J. Wei, *Fabrication of micro/nano multifunctional patterns on optical glass through chalcogenide heat-mode resist AgInSbTe*. Journal of Alloys and Compounds, 867, 158988 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158988>.

V.V. Petrov, A.A. Kryuchyn, Ie.V. Belyak, D.Yu. Manko, I.V. Kosyak, O.G. Melnik

Advantages of Direct Laser Writing for Enhancing the Resolution of Diffractive Optical Element Fabrication Processes

Institute for Information Recording of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, belyak1312@gmail.com

A technology for direct laser writing of code sequences on modulation disks has been developed and implemented, ensuring high accuracy and reliability in the process of forming structural elements. The main advantages of applying direct laser writing compared to contact lithography for forming submicron-sized elements have been demonstrated. The proposed technology is characterized by high resolution and flexibility in configuring the parameters of the optical recording system, making it suitable for a wide range of applications in micro-optics. Direct optical writing is presented as a promising approach for enhancing the resolution of optical systems used in recording submicron-sized diffractive optical elements, as this technology enables the creation of complex optical structures. Additionally, a detailed classification of current approaches for further increasing the resolution of the optical recording system was conducted, including the application of a saturated absorber layer on the photosensitive surface, the use of a laser beam with intensity modeled by a Bessel function, and the synthesis of photosensitive materials with optimized exposure characteristics, ensuring high efficiency and accuracy in the process of direct laser writing.

Keywords: diffractive optical elements, modulation disks, resolution, direct laser writing, submicron structures, chalcogenide semiconductors, thermal exposure regime.