

DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.3.354561

УДК 004; 681.7.06

І. В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Дослідження типових джерел похибок при виготовленні растрових оптичних елементів лазерними записуючими системами з круговим скануванням

Проведено аналіз і дослідження типових джерел похибок, які виникають при виготовленні растрових оптичних елементів лазерними записуючими системами з круговим скануванням. Розглянуто особливості розробки та побудови кругових лазерних записуючих систем. Запропоновано способи зменшення впливу похибок при записі растрових оптичних елементів на круговій лазерній записуючій системі.

Ключові слова: оптичні структури, лазерний запис, енкодер, оптичний елемент, підкладка.

На даний час для виготовлення різноманітних растрових оптичних елементів і високоточних вимірювальних кутових структур переважно використовується технологія, що заснована на проекційній фотолітографії. Проекційна фотолітографія дозволяє повністю виключити пошкодження шаблону, оскільки зображення топологічного рисунка проектується на покриту резистом підкладку, яка розташована на відстані від шаблону. Недоліком такого методу є його висока ціна та мала швидкість експозиції. Тому цей метод використовується в основному для виготовлення фотошаблонів.

На сьогоднішній день для формування мікрорельєфу растрових, дифракційних і мікрооптичних елементів широко використовуються методи запису скануючим пучком (електронним чи лазерним). Вони засновані на скануванні сфокусованим амплітудно-модульованим лазерним пучком поверхні підкладки, покритої реєструючим шаром. Скануючі методи прямого лазерного запису є найбільш універсальними. Пучок, що записує, переміщається по заданих траєкторіях. Ці траєкторії є прямими лініями (у прямокутній системі координат), або колами та спіралями (у полярній системі координат). Технологія лазерної літографії дозволяє виготовляти та тиражувати широкий спектр різних оптичних структур і мікрооптичних елементів [1–6].

Електронно-променеві або лазерні пристрої запису, що працюють у прямокутній системі координат, широко використовуються для виготовлення растрових

і дифракційних оптичних елементів. Дифракційна або растрова структура є набором елементарних зображень — трапецій або прямокутників, орієнтованих уздовж двох фіксованих ортогональних осей [7]. Це призводить до розсіювання світла на кутах прямокутників і появі додаткового шуму у зображенні, що формується. Існує ряд типів растрових і дифракційних оптичних елементів, для яких розсіювання світла та точність виконання структури є критичним фактором. Для таких елементів доцільним є запис у полярній системі координат [5, 8].

Враховуючи вищезазначене, при виборі методу виготовлення растрових і дифракційних оптичних елементів необхідно враховувати особливості їхнього застосування. При виробництві різних радіальних оптичних структур таких, як оптичні енкодери, кодуєчі диски та кутові шкали краще використовувати кругові лазерні записуючі системи, що працюють у полярних координатах.

У даній роботі наведено аналіз найбільш типових джерел похибок запису на круговій лазерній записуючій системі та розглянуто особливості методу запису з адресацією лазерного пучка в полярній системі координат.

Мета дослідження — зменшити вплив похибок при записуванні растрових оптичних елементів на створеній круговій лазерній записуючій системі [9, 10].

Кругова лазерна записуюча система

На рис. 1 наведено функціональну схему кругової лазерної записуючої системи. Для усунення небажаних механічних коливань оптико-механічний блок розташовано на гранітній плиті, яка тримається на спеціальних опорах. Лазерна записуюча система складається з таких основних частин: шпинделя на аеростатичних опорах, привода обертання (електричний двигун), енкодера формування секторних міток, платформи лінійного переміщення з лінійним приводом та інтерферометром, лазерної системи запису і фокусування та комп'ютера керування [9]. З метою підвищення точності вимірювання координати руху платформи лінійного переміщення — позиціонера було розроблено схему управління лінійним приводом позиціонера на основі лазерного цифрового інтерференційного далекоміра з абсолютним відліком координати і роздільною здатністю $\approx 0,6$ нм [11].

Вкрита фоточутливим шаром заготовка підкладки (оптичний диск) кріпиться на планшайбі — поворотному столі, який встановлено на торці шпинделя. Шпиндель обертає прикріплений до нього електричний двигун. На осі шпинделя встановлений датчик вимірювання кута повороту — кутовий інкрементний енкодер Kubler 5825 (виробництва Німеччина), який має точність ≈ 50 кутових секунд і 36000 тактових імпульсів за один оберт та імпульс початку обертання. Енкодер має тільки 3600 оптичних штрихів і для збільшення кількості імпульсів за один оберт застосовано систему множення частоти в 10 раз із інтерполяцією. Цим власне і пояснюється така точність. Інкрементний енкодер формує електричні імпульси, що призначені для синхронізації модуляції лазерного пучка з кутовим положенням підкладки.

Для запису використовується напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 405 нм. Модульоване лазерне випромінювання спрямовується до фокусуєчого об'єктива (числова апертура $NA = 0,85$). Об'єктив формує записуючу пляму діаметром $\approx 0,8$ мкм на поверхні підкладки. Для утримання записуючої плями на поверхні підкладки під час запису використовується система автоматичного фокусування. У

приводі фокусування застосовано виконавчу частину на п'єзоелементах. Платформа лінійного переміщення рухається за допомогою лінійного двигуна. Переміщення платформи вимірюється лазерним інтерферометром. Растрові оптичні структури записуються шляхом кругового сканування по спіралі.

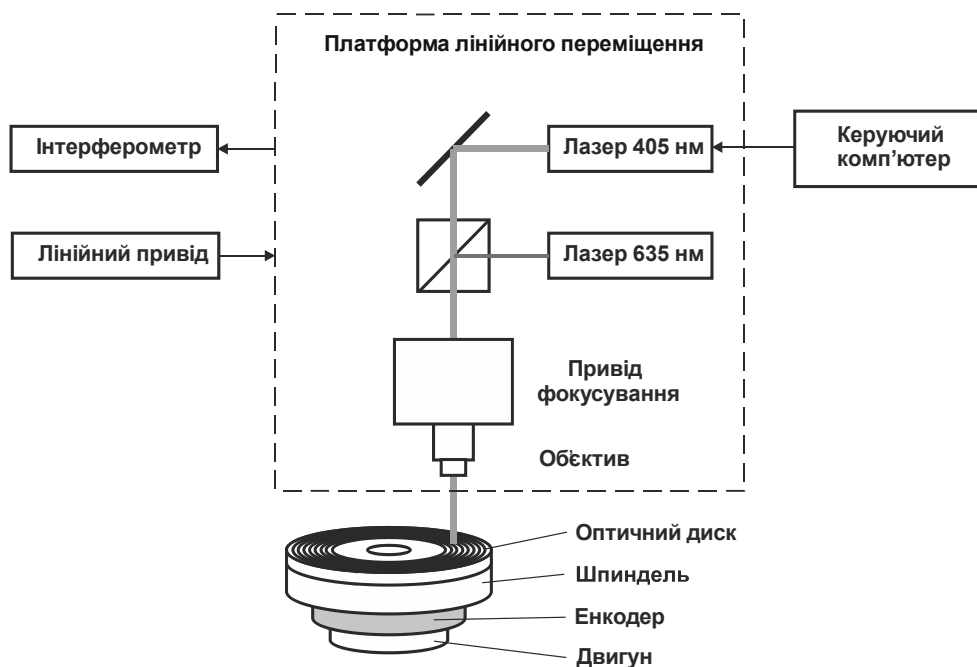


Рис. 1. Функціональна схема кругової лазерної записуючої системи

При технології прямого лазерного запису на круговій лазерній записуючій системі, на відміну від технології лазерного запису фотошаблонів у декартових координатах, експонування здійснюється сфокусованим променем при дуже високих швидкостях сканування 0,3-0,6 м/с. При виготовленні елемента оптичної структури підкладка зі світлочутливим матеріалом безперервно обертається, у той час як записуючий промінь повільно рухається в радіальному напрямку від центру до краю відповідно до заданого рисунка.

Аналіз похибок лазерної записуючої системи з круговим скануванням

Створена лазерна записуюча система з круговим скануванням дозволяє виготовлення растрових оптичних елементів із записом бінарних структур, які мають дві градації пропускання з мінімальними розмірами структури за умовною координатою y 1,5 мкм і за умовною координатою x залежно від радіуса запису. Мінімальний розмір структури за координатою x знаходиться із відношення $\pi \cdot D / 36000$. Для прикладу, мінімальні розміри елементів кодууючих дисків діаметром 40 мм становлять $< 3,3$ мкм за умовною координатою x .

Структура растрових оптичних елементів представляє набір елементарних точок (пікселів) з адресацією в полярній системі координат. Адреса запису довільного

пікселя в полярній системі координат визначається як $P_i(r_i, \varphi_i)$, де r_i — радіус запису, φ_i — кутова координата запису. В процесі запису вносяться похибки до структури растрових оптичних елементів, які мають дві складові:

- 1) похибка координати запису, тобто кінцева відстань між розрахованою $P_i(r_i, \varphi_i)$ та записаною $P_i'(r_i', \varphi_i')$ координатами точок $\varepsilon = P_i(r_i, \varphi_i) - P_i'(r_i', \varphi_i')$;
- 2) похибка розміру, що являє собою різницю між розрахованим і реально записаним розміром та формою структури, яка представляє набір елементарних точок.

Абсолютна похибка координати ε залежить від точності переміщення лазерної записуючої плями відносно підкладки. Величина похибки розміру структури растрових оптичних елементів, які записуються, в основному обумовлена умовами запису: величиною експозиції (потужністю лазерного випромінювання), тривалістю проявлення світлочутливого матеріалу — фоторезисту та хрому.

Типові джерела похибок, які призводять до зміщення координати запису, визначаються наступним:

- 1) помилкою визначення початку координат, що спричинена суміщенням центру осі обертання шпинделя записуючої системи та центром полярної системи координат;
- 2) похибкою кутової координати, яка викликана помилками вимірів поточного кутового положення записуючої підкладки, що обертається;
- 3) похибкою траєкторії обертання, яка викликана відхиленням траєкторії руху записуючого променя від ідеального кола;
- 4) похибкою переміщення записуючої плями в радіальному напрямку.

Початком полярної системи координат в лазерній записуючій системі з круговим скануванням є вісь обертання підкладки на поворотному столі, який встановлено на торці шпинделя. Визначення з високою точністю положення осі обертання є суттєвою проблемою. Практично помилка суміщення центру полярної системи координат з віссю обертання підкладки завжди можлива. На рис. 2 наведено траєкторії записуючого лазерного променя на підкладці за наявності помилки початку координат.

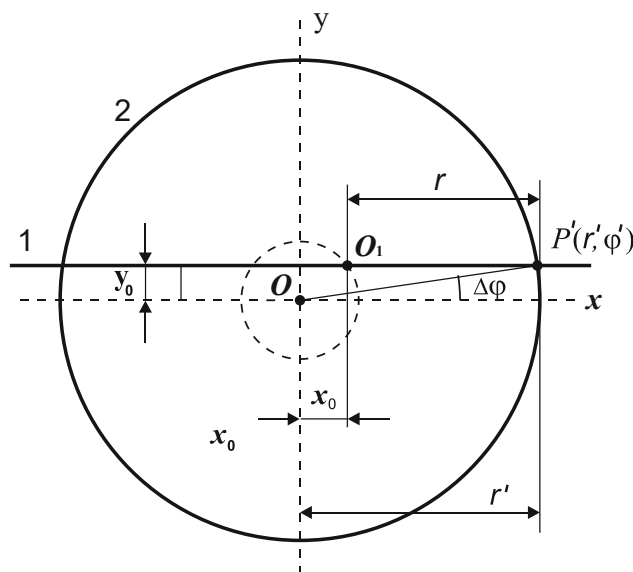


Рис. 2. Траєкторії записуючого лазерного променя на підкладці

Точка O є центром обертання підкладки на поворотному столі, точка O_1 є зміщеним центром полярної системи координат. На лінії 1 показано слід записуючої лазерної плями при переміщенні лінійної платформи на нерухомій підкладці, коло 2 з радіусом r' — слід записуючої плями на підкладці, що обертається при нерухомій платформі. Точка O_1 є початком відліку лазерного інтерферометра. Відрізки y_0 і x_0 від точки O_1 до центру обертання підкладки O вносять помилку в координату записуваної точки. Реальна полярна координата точки, що записується, буде $P'(r', j')$. Радіус r' і полярний кут φ' визначаються як

$$r' = \sqrt{(r + x_0)^2 + y_0^2}, \quad \varphi' = \varphi + \arctg\left(\frac{y_0}{r+x_0}\right).$$

Помилка встановлення початку координат, тобто відстань між точками O та O_1 (рис. 2) визначається експериментально при записуванні відповідних геометричних структур. Радіальні помилки x_0 та y_0 можна мінімізувати шляхом переміщення платформи. На рис. 3 представлено зображення записаних оптичних структур, в яких присутня похибка початку їхнього запису, що спричинена зміщенням центру осі обертання шпинделя записуючої системи та центром полярної системи координат. Для усунення (зведення до мінімуму) похибки кута $\Delta\varphi$ була зміщена платформа лінійного переміщення на величину відрізка BC (рис. 3,а).

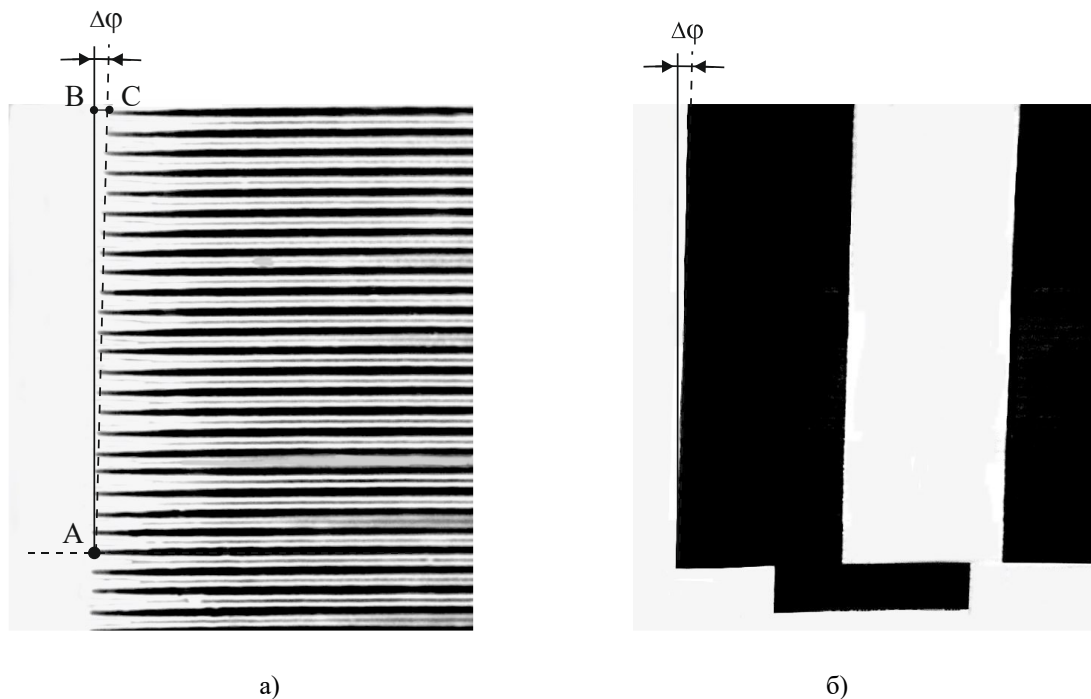


Рис. 3. Зображення записаних оптичних структур, в яких присутня похибка початку їхнього запису, що спричинена зміщенням центру осі обертання шпинделя записуючої системи та центром полярної системи координат

Похибка кутової координати викликана помилками вимірів поточного кутового положення записуючої підкладки, що обертається, і, в основному, обумовлена роботою енкодера. Джерелом помилок є нерівномірність інтервалів $\delta\varphi$, що вносять

ться як системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) енкодера, так і його оптико-електронним датчиком кута повороту. Оптико-електронний датчик кута повороту енкодера формує електричні імпульси, що йдуть через кожні $0,1^\circ$ (енкодер має тільки 3600 оптичних штрихів). Помножувач частоти проходження імпульсів, виконаний на основі ФАПЧ, збільшує кутову роздільну здатність у 10 разів, тобто $\delta\varphi = 0,01^\circ$ або до 36 кутових секунд. Таким чином, ми отримуємо 36000 тактових імпульсів за один оберт.

Сигнали очної діаграми (рис. 4,а), що представляють серію цифрових сигналів, накопичених і відображених на осцилографі, дозволяють здійснити аналіз цілісності сигналу, вплив міжсимвольних перехресних перешкод, зміщення в часі тактових імпульсів і визначення джитера (фазове тремтіння цифрового сигналу). На рис. 4,а явно помітні зміни розташування фронтів цифрового сигналу в часі.

Сигналограма на рис. 4,б, що отримана в режимі одиночного запуску тригера на осцилографі, відображає характеристики наявного цифрового сигналу тактових імпульсів. Видно, що імпульсні тактові сигнали відрізняються тривалістю імпульсів і місцем розташування в послідовності імпульсів (рис. 4,а). Власне це підтверджує наявність похибки кутової координати, обумовленої роботою енкодера, в якому використовується ФАПЧ для збільшення кутової роздільної здатності.

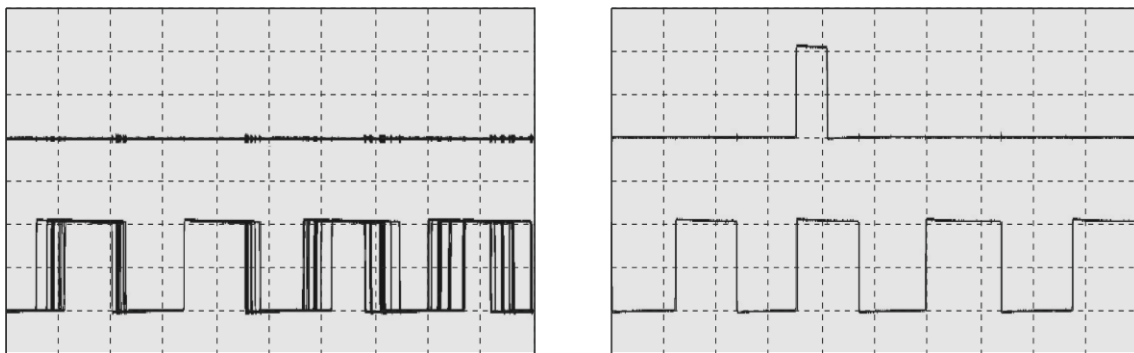


Рис. 4. Сигналограми сигналів з кутового інкрементного енкодера Kubler 5825:
 а) очна діаграма серії цифрових сигналів;
 б) сигнал в режимі *одиночний запуск тригера* (стоп кадр)

Експериментальні дослідження роботи лазерної записуючої системи з круговим скануванням показали, що типова середньоквадратична величина похибки кутової координати не перевищує 50 кутових секунд. На рис. 5 представлено зображення збільшеної частини записаної оптичної структури в якій присутня похибка кутової координати на радіусі 20 мм. Обчислення умовної дуги в 5 мкм на радіусі 20 мм і дає результат ≈ 50 кутових секунд. Таким чином, зі збільшенням радіуса запису, абсолютна величина похибки кутової координати даватиме зростання розмірів помилки умовної дуги в 5 мкм (рис. 5), що неминуче буде призводити до викривлень геометрії оптичних структур, які записуються.

Треба зауважити, що величина умовної дуги в 5 мкм (рис. 5) не означає збільшення розмірів записуваних оптичних елементів, а відображає тільки зміщення координати початку запису окремого елемента структури на певному радіусі.

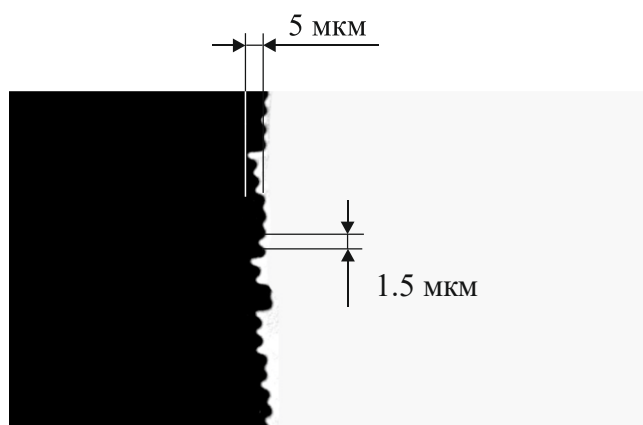


Рис. 5. Зображення збільшеної частини записаної оптичної структури в якій присутня похибка кутової координати на радіусі 20 мм

Похибка траєкторії обертання підкладки, яка викликана відхиленням траєкторії руху записуючого променя від ідеального кола обумовлена ексцентриситетом обертання підкладки, розміщеного на шпинделі та меншою мірою биттям осі шпинделя. Похибка траєкторії обертання спричинена неточністю виготовлення осі поворотного столу та деталей аеростатичного шпинделя. Також важливу роль відіграє точність виготовлення отвору самої підкладки. Ця похибка призводить до викривлення координат запису, і для її зменшення необхідно робити посадковий отвір підкладки з відповідною точністю.

Похибка переміщення записуючої плями в радіальному напрямку обумовлена рухом платформи лінійного переміщення. Платформа на аеростатичних опорах переміщує фокусуючу оптику і визначає положення записуючої плями на підкладці в радіальному напрямку. Контроль переміщення платформи здійснюється лазерним інтерферометром. З метою підвищення точності вимірювання координати руху платформи лінійного переміщення було розроблено схему управління лінійним приводом позиціонера на основі лазерного цифрового інтерференційного далекоміра з абсолютним відліком координати та роздільною здатністю $\approx 0,6$ нм. Обробку інтерференційних сигналів керування лінійним двигуном позиціонера виконано на програмному рівні [11].

Висновки

Виконано аналіз і експериментальне дослідження типових джерел похибок, які виникають при запису радіальних оптичних структур на круговій лазерній записуючій системі. Показано, що створена лазерна записуюча система з круговим скануванням має джерела похибок, які призводять до зміщення координати запису. Було усунуто помилку визначення початку координат, що спричинена суміщенням центру осі обертання шпинделя записуючої системи та центром полярної системи координат. Для зменшення похибки кутової координати, яка викликана роботою енкодера, запропоновано замінити енкодер, в якому будуть присутні значно більше ніж 3600 оптичних штрихів.

Актуальними задачами залишаються підвищення роздільної здатності запису елементів оптичних структур і вдосконалення оптичних, механічних і електронних вузлів.

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

1. Goltsov W., Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication. Proc. SPIE. 1990. **1211**. P. 137–147. DOI: 10.1117/12.17934.
2. Hyug-Gyo Rhee. Direct Laser Lithography and Its Applications. IntechOpen, 2010. 19 p. DOI: 10.5772/8167.
3. I. Bernardeschi, M. Ilyas, L. Beccai. A Review on Active 3D Microstructures via Direct Laser Lithography. Advanced Intelligent Systems published by Wiley-VCH GmbH, 2021. 20 p. DOI: 10.1002/aisy.202100051.
4. Varapnickas S., Malinauskas M. Processes of Laser Direct Writing 3D Nanolithography. In book: Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering. Springer, Cham, 2020. P. 1–31. DOI: 10.1007/978-3-319-69537-2_32-1.
5. Zhenguao Bai, Jingsong Wei, Rui Wang. High-speed laser writing of arbitrary patterns in polar coordinate system. *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87. P. 1–6. DOI: 10.1063/1.4973397.
6. Kiryanov A. Improving Synthesis Accuracy of Topology Elements in Laser Pattern Generators with Circular Scanning Mode. In book: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. 2020. P. 497–506. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_53.
7. Ogata S., Tada M., Yoneda M. Electron-beam writing system and its application to large and highdensity diffractive optic elements. *Appl. Opt.* 1994. **33**. P. 2032–2038. DOI: 10.1364/AO.33.002032.
8. Neugebauer G., Hauck R., Bryngdahl O. Computergenerated holograms: carrier of polar geometry. *Appl. Opt.* 1985. **24**, No. 6. P. 777–784. DOI: 10.1364/AO.24.000777.
9. Косяк І.В., Цубін О.А. Формування радіальних оптичних структур на круговій лазерній записуючій системі. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2024. Т. 26, № 1. С. 3–8. DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.1.308326
10. Петров В.В., Крючин А.А., Беляк С.В., Манько Д.Ю., Косяк І.В., Мельник О.Г. Переваги прямого лазерного запису для збільшення роздільної здатності процесу виготовлення дифракційних оптичних елементів. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2024. Т. 25, № 3. С. 587–594.
11. Високошвидкісний інтерферометр на основі запам'ятовуючого пристрою: пат. 106553 Україна. № а201304496, заявл. 10.04.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. 6 с.

Надійшла до редакції 14.05.2025