DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.1.308326

УДК 004; 681.7.06

І. В. Косяк, О. А. Цубін
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Формування радіальних оптичних структур на круговій лазерній записуючій системі

Проведено аналіз і дослідження систем для формування планарних оптичних елементів. Розглянуто особливості розробки та побудови кругових лазерних записуючих систем. Запропоновано реалізацію формування радіальних оптичних структур лазерною системою запису оптичних дисків.

Ключові слова: *оптичні структури, лазерний запис, енкодер, фотолітографія, підкладка.*

Для отримання певного рисунка на поверхні скляної підкладки використовується метод фотолітографії, який широко застосовується в мікроелектроніці та інших видах мікротехнологій, а також у виробництві оптичних енкодерів і кодуючих дисків. Розрізняють три типи фотолітографії: контактну, із зазором, проекційну.

При контактній фотолітографії підкладка, що покрита фоторезистом, знаходиться в безпосередньому фізичному контакті з фотошаблоном. Такий спосіб забезпечує найкращу роздільну здатність, так як не вносяться спотворення за рахунок дифракції. Однак, недоліком даного способу є те, що при цьому зменшується термін служби фотошаблону через постійні механічні контакти, що призводить до його пошкодження і забруднення та складність суміщення малюнків.

Метод фотолітографії із зазором схожий з контактним, проте зазор (порядку 20–30 мкм) між шаблоном і фоторезистом зменшує ймовірність поломки шаблону, збільшуючи термін його служби. Недоліком вважається менша роздільна здатність, що обмежує його застосування.

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.

© І. В. Косяк, О. А. Цубін

На даний час для виготовлення високоточних вимірювальних кутових структур переважно використовується технологія, що заснована на проекційної фотолітографії.

Останнім часом дедалі активніше розвивається технологія лазерної літографії, так званий метод прямого лазерного запису у фоторезисті. Ця технологія дозволяє виготовляти та тиражувати широкий спектр різних оптичних структур і мікрооптичних елементів [1–7].

Технологія лазерної літографії заснована на скануванні сфокусованим амплітудно-модульованим лазерним пучком поверхні підкладки, яка покрита реєструвальним шаром. Для формування непрозорого мікрорисунку фотошаблонів на фоторезист наноситься покриття, що маскує (зазвичай плівка хрому). Після проявлення вікон у фоторезисті в них стравлюється плівка хрому за допомогою травника, до якого стійкий фоторезист [8, 9].

Експонування фоторезисту здійснюється за допомогою лазерних записуючих систем УФ-лазером. У мікроелектронному виробництві ці системи працюють у декартових координатах із рядковим скануванням пучка по траєкторіях у вигляді прямих ліній. При виробництві різних радіальних оптичних структур, таких як оптичні енкодери, кодуючі диски та кутові шкали, краще використовувати кругові лазерні записуючі системи, що працюють у полярних координатах.

Отже, завдання розробки кругової лазерної системи для формування радіальних оптичних структур є актуальним у науковому відношенні та корисним у практичному застосуванні. Це дозволить здешевити та суттєво зменшити час на виготовлення різноманітних оптичних елементів, таких як оптичні енкодери та кодуючі диски.

Аналіз досліджень і публікацій [1–7] свідчить про те, що висвітленню проблеми розробок засобів і технологій лазерної літографії приділяється велика увага. Звідси випливає задача досліджень — проведення експериментального дослідження запису радіальних оптичних структур по фоторезисту на круговій лазерній записуючій системі.

Реалізація запису радіальних оптичних структур на круговій лазерній записуючій системі

Формування радіальних оптичних структур методом прямого лазерного запису було здійснено на базі діючої станції лазерного запису, яка була створена в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України [10, 11]. 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 центра до краю відповідно до заданого рисунка.

На рис. 1 представлено функціональну схему системи формування радіальних оптичних структур методом прямого лазерного запису. Для усунення небажаних механічних коливань оптико-механічний блок розташовано на гранітній плиті, яка тримається на спеціальних опорах. З метою підвищення точності вимірю-

вання координати руху платформи лінійного переміщення — позиціонера було розроблено схему управління лінійним приводом позиціонера на основі лазерного цифрового інтерференційного далекоміра з абсолютним відліком координати та роздільною здатністю ≈ 0,6 нм. Обробку інтерференційних сигналів керування лінійним двигуном позиціонера виконано на програмному рівні [12].

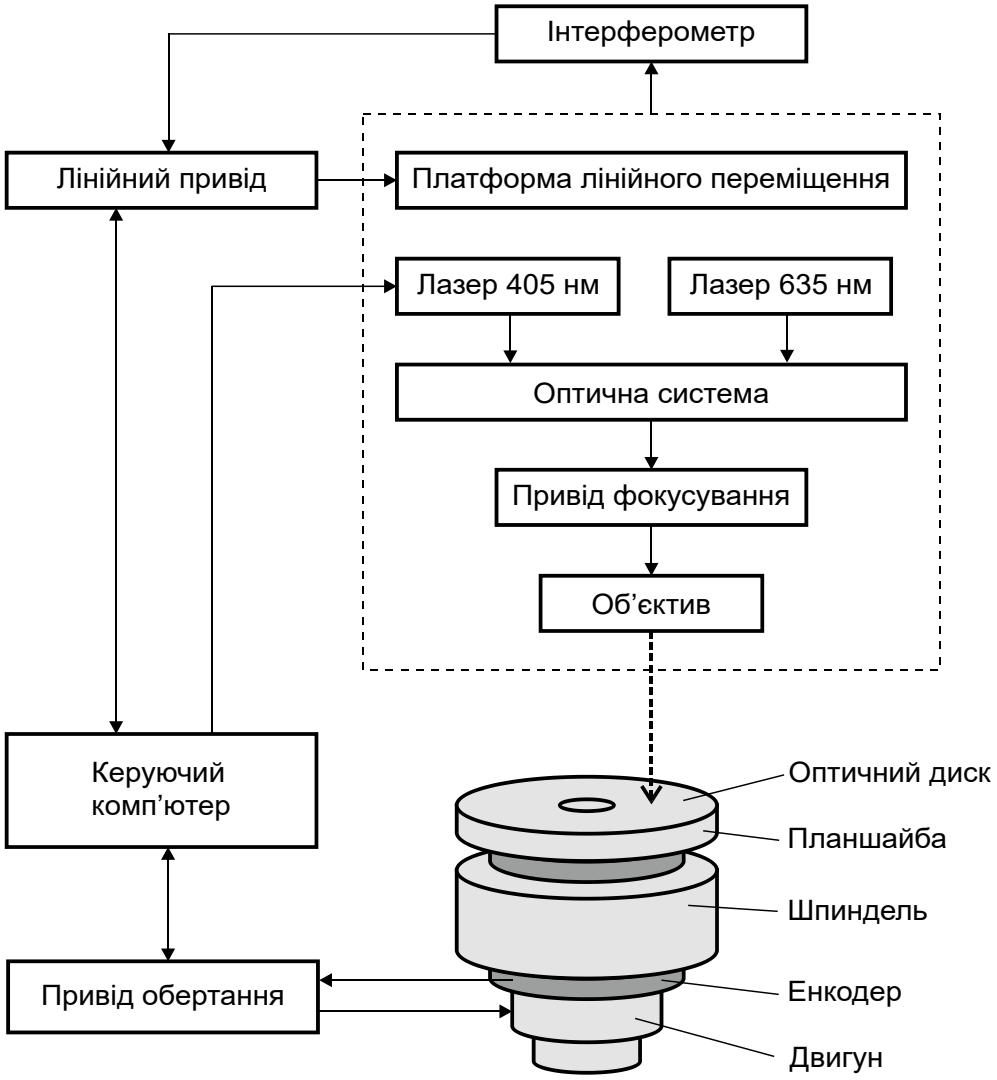


Рис. 1. Функціональна схема системи формування радіальних оптичних структур методом прямого лазерного запису

Вкрита фоточутливим шаром заготовка підкладки розташовується на планшайбі — поворотному столі шпинделя на аеростатичних опорах і фіксується вакуумним патроном. Кутовий інкрементний енкодер з системою множення частоти в 10 разів і інтерполяцією формують послідовність тактових імпульсів, що забезпечує 36000 тактових імпульсів за один оберт та імпульс початку обертання. Імпульси використовуються для синхронізації модуляції лазера з кутом повороту підкладки.

Блок радіального переміщення лазерного променя складається з лінійного приводу, інтерферометра та позиціонера, який встановлено на аеростатичних опорах. Лінійний привід і позиціонер забезпечують переміщення оптичної системи, двох лазерів, приводу фокусування, об'єктива. Лазерний інтерферометр контролює рух позиціонера.

Для фокусування лазерного променя запису на поверхні підкладки використовується об'єктив з приводом фокусування, зібраний на п'єзоелементах. Система автофокусування утримує фокальну площину об'єктива на поверхні підкладки під час запису. Для контролю фокуса використовується окремий напівпровідниковий лазер довжиною хвилі 635 нм; для запису — напівпровідниковий лазер довжиною хвилі 405 нм.

За допомогою лінійного переміщення позиціонера лазерне випромінювання фіксується на заданій відстані від центра обертання шпинделя. За допомогою мікрооб'єктива записуючої головки випромінювання фокусується на поверхні світлочутливого шару. Топологія елемента формується в цьому шарі в полярних координатах, де зміна радіуса забезпечується повільним переміщенням лазерного променя в радіальному напрямку, а зміна кута швидким обертанням заготовки — підкладки. Модуляція лазерного випромінювання здійснюється шляхом модуляції струму накачування напівпровідникового лазера відповідно до топології рисунка радіальних оптичних структур синхронно з сигналами секторних міток кутового енкодера і радіальним переміщенням об'єктива.

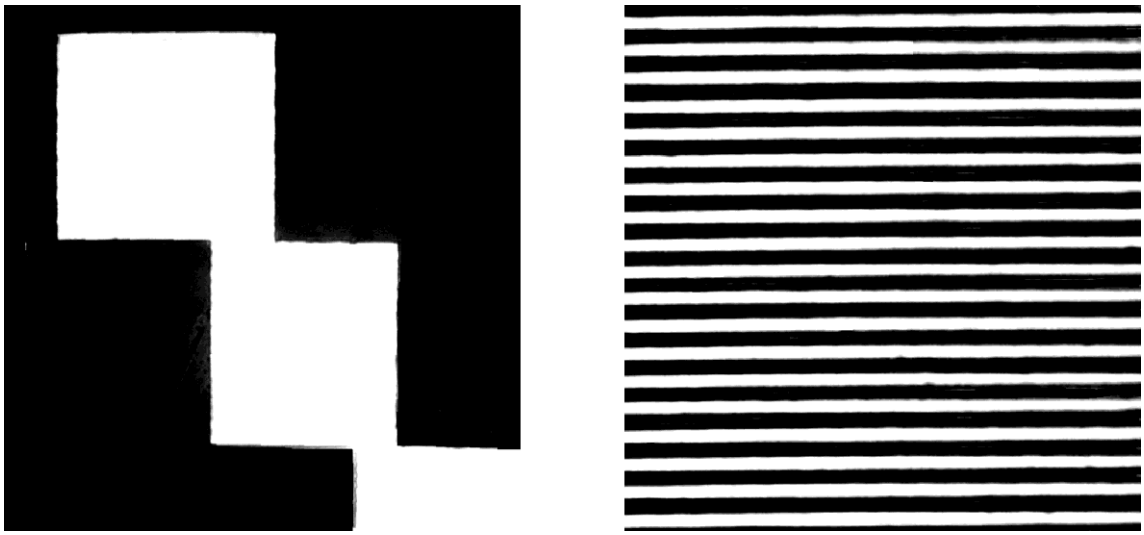
Для запису рисунка радіальних оптичних структур необхідно спочатку перетворити його в однобітне растрове зображення, яке складається з матриці пікселів, які забарвлені певним кольором (чорним або білим). Далі, застосовуючи розроблене програмне забезпечення, трансформувати однобітне растрове зображення в двовимірний масив даних у вигляді матриці $M(i, j)$, де i — висота рисунку на підкладці, j — кількість секторних міток (імпульсів) з енкодера за 1 оберт. Висота рисунку на підкладці прямо пов'язана з кроком переміщення позиціонера, тобто висота дорівнює добутку кількості кроків на величину кроку. Таким чином, рисунок радіальних оптичних структур подається на модуляцію лазерного випромінювання у вигляді послідовності пікселів з адресацією в декартовій системі координат. Натомість після запису на підкладці ми отримуємо радіальні оптичні структури в полярній системі координат.

Роздільна здатність сформованих радіальних оптичних структур на підкладці методом прямого лазерного запису залежить від двох параметрів: по осі y — від кроку переміщення позиціонера; по осі x — від кількості секторних міток кутового референтного енкодера.

При віддаленні від центра обертання підкладки, зі зростанням радіальної координати, лінійна швидкість сканування збільшується, що призводить до зменшення часу експонування фоторезисту на підкладці. Для компенсації цього ефекту необхідно зі зростанням радіальної координати зменшувати кутову швидкість обертання шпинделя так, щоб лінійна швидкість обертання була постійною відповідно до виразу: $f(t) = V_{\text{const}}/(2\pi \cdot R(t))$, де V — постійна лінійна швидкість; f — частота обертання; R — поточний радіус запису.

На рис. 2 представлені зображення радіальних оптичних структур, які були записані на круговій лазерній записуючій системі методом прямого лазерного

запису. Система підготовки даних дозволяє записувати не тільки штрихи (рис. 2,*б*), що спрощує алгоритм формування зображення для запису, але й елементи довільної форми малих розмірів (рис. 2,*а*).



а) б)

Рис. 2. Зображення записаних оптичних структур:
а) розмір елемента структури 20×20 мкм; б) штрихи кутової шкали з періодом 1,5 мкм

Максимальна допустима частота обертання підкладки залежить від параметрів референсного енкодера і коливається в межах 1–15 Гц. Дані взяті із даташитів на енкодери. Звідси випливає, що лінійна швидкість може бути 0,1–2 м/с (залежно від вибору початкового радіусу запису). Це набагато швидше, ніж формування оптичних структур у декартових координатах, що є важливим фактором підвищення швидкості запису.

Висновки

Виконано експериментальне дослідження запису радіальних оптичних структур по фоторезисту на круговій лазерній записуючій системі. Показано, що розроблена система підготовки даних дозволяє записувати радіальні оптичні структури довільної форми. Актуальними задачами залишаються підвищення роздільної здатності запису елементів оптичних структур і вдосконалення оптичних, механічних та електронних вузлів.

1. Hyug-Gyo Rhee. Direct Laser Lithography and Its Applications. IntechOpen, 2010. 19 p.

2. Lin B.J. Optical Lithography. SPIE Press, Bellingham, WA, 2009. 136 p.

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.

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.

5. Kiryanov A.V., Vedernikov V.M., Kiryanov V.P., Kokarev S.A., Nikitin V.G. Forming high-precision angular measuring structures by the laser pattern generators with circular scanning. *Measurement science review*. 2006. Vol. 6, No. 1. P. 10–13.

6. Zhenguo 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.

7. 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.

8. Syed Rizvi. Handbook of Photomask Manufacturing Technology. Taylor & Francis Group, 2005. 878 p.

9. Wayne M Moreau. Semiconductor lithography: principles, practices, and materials. New York : Plenum Press, 1988. 931 p.

10. Косяк И.В. Система записи оптических дисков высокой плотности. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2012. Т. 14, № 3. С. 12–19. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2012.14.3.105216.

11. Косяк І.В. Особливості побудови систем запису оптичних дисків високої щільності. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2014. Т. 16, № 2. С. 87–99. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2014.16.2.100259.

12. Високошвидкісний інтерферометр на основі запам’ятовуючого пристрою: пат. 106553 Україна. № a201304496, заявл. 10.04.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. 6 с.

Надійшла до редакції 05.02.2024