

І. В. Косяк

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

Дослідження впливу геометрії і топології мікрорельєфу на формування кутового розподілу випромінювання в оптичних дифузорах

Проведено аналіз і дослідження формування регулярних рельєфних мікроструктур в оптичних дифузорах-гомогенізаторах. Розглянуто особливості виготовлення дифузорів шляхом індентування та термопресування. Запропоновано використання гексагональної топології розміщення мікросферичних елементів із помірним перекриттям для забезпечення 100 % коефіцієнта заповнення поверхні. Встановлено вплив геометрії мікрорельєфу на індикатрису розсіювання та доведено ефективність сферичних структур для усунення плями нульового порядку.

Ключові слова: оптичний дифузор, гомогенізатор, рельєфна структура, гексагональна топологія, індентування, індикатриса розсіювання.

Оптичні дифузори є критично важливими компонентами сучасних систем формування світлових пучків. Вони знаходять широке застосування в дисплейних технологіях, проекційних системах, пристроях лазерного наведення, а також у складній світлотехніці, де виникає потреба у створенні освітлювального поля з прецизійно заданими параметрами. Основним завданням дифузора є забезпечення дифузного пропускання або відбиття падаючого випромінювання для формування необхідної індикатриси розсіювання — просторової залежності інтенсивності світла від кута спостереження.

На сьогодні розроблено низку способів створення випадкових і регулярних фазових структур, що виконують роль дифузорів. Серед них виділяють перетворення амплітудного голографічного запису в рельєфно-фазовий на галоїдосрібних фотоемульсіях, а також формування рельєфних мікроструктур шляхом термічного вдавлювання полімерних плівок для утворення масивів рівномірно розподілених опуклих мікроелементів [1, 2]. Проте існуючі способи мають певні обмеження, зокрема щодо експлуатаційної стійкості полімерних матеріалів у складних умовах променевих систем наведення.

Окрему увагу привертає спосіб, запропонований у роботі [3], який передбачає створення рельєфної мікроструктури за допомогою твердосплавного конічного ін-

дентора з кутом при вершині 120–160°. Отримана металева матриця служить штампом для термопресування конічних виступів на оптично прозорому полімері. Суттєвим недоліком такої геометрії є формування в центрі розсіяного поля яскравої світлої плями (нульового порядку), що зумовлено специфікою заломлення світла на конічних поверхнях. Це обмежує можливість отримання високого ступеня гомогенності випромінювання.

Для вирішення зазначеної проблеми в даній роботі запропоновано спосіб формування рельєфної мікроструктури у вигляді масивів сферичних сегментів, інтегрованих у поверхню прозорого полімерного матеріалу. Теоретично обґрунтовано, що для досягнення максимальної ефективності гомогенізації та повного усунення плями нульового порядку необхідно забезпечити структурування поверхні з коефіцієнтом заповнення 100 %.

Дана робота присвячена аналізу та дослідженню особливостей формування регулярних сферичних мікроструктур у складі оптичних дифузорів-гомогенізаторів для отримання максимально однорідного світлового потоку в робочій зоні фотоприймальних пристроїв.

Дослідження і аналіз розподілу сферичних сегментів на поверхні дифузора

Для отримання максимально однорідної структури світлового потоку у вигляді кругової плями на площадках фотоприймача було проведено геометричне моделювання розподілу сферичних сегментів на поверхні дифузора. Використання комп'ютерного моделювання дозволяє прецизійно розробити та дослідити топологічні параметри конструкції оптичного виробу ще на етапі проектування [4, 5].

Розташування мікролінз у вигляді сферичних сегментів на поверхні дифузора розглядалося в двох основних варіантах: 1) ортогональне (квадратне) розташування (рис. 1,а); 2) гексагональне розташування (рис. 1,б).

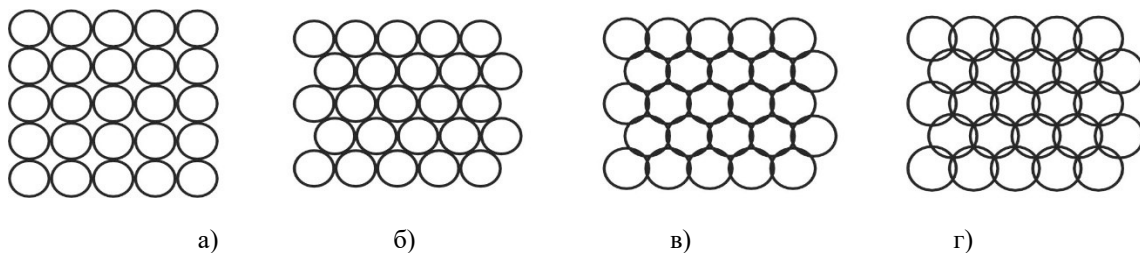


Рис. 1. Варіанти розташування сферичних сегментів на поверхні дифузора

Важливою умовою для мінімізації втрат та усунення прямого пропускання (нульового порядку дифракції) є забезпечення коефіцієнта заповнення поверхні 100 %. У ході аналізу встановлено, що ключовими параметрами, які визначають розсіювальні характеристики дифузора, є діаметр мікролінз (визначає масштаб структури) та глибина заглиблення, яка безпосередньо впливає на крутизну профілю та, відповідно, на максимальний кут відхилення променів.

Аналіз формування світлового поля при проходженні через різні типи ґраток показав, що гексагональне розташування сферичних поверхонь є оптимальним з наступних причин.

1. Вища ізотропність: гексагональна симетрія краще наближається до кругової, що забезпечує формування рівномірної круглої плями без паразитних «променів», характерних для квадратної структури.

2. Щільність розташування: гексагональна решітка дозволяє досягти природнього щільного стикування сфер, що критично важливо для гомогенізації світлового потоку.

Для усунення появи світлої плями та досягнення високої гомогенності світлового поля, розташування сферичних мікроструктур слід виконувати з певним взаємним перекриттям (рис. 1,в,г). Це дозволяє повністю нівелювати плоскі ділянки між мікролінзами, які є причиною появи нульового порядку дифракції.

Однак, при проектуванні слід враховувати енергетичний баланс: зі збільшенням ступеня перекриття спостерігається тенденція до зниження загального коефіцієнта пропускання дифузора. Це зумовлено зменшенням ефективної апертури кожної окремої мікросфери та зростанням втрат на краях перекриття. Таким чином, оптимальним варіантом, що забезпечує баланс між рівномірністю заповнення світлового поля та високою оптичною ефективністю, є помірне перекриття сферичних поверхонь (рис. 1,в).

Визначення кута розсіювання світла в дифузорі

Кутова індикатриса розсіяного випромінювання є однією з ключових характеристик оптичних дифузорів. Вона безпосередньо залежить від геометрії сформованого мікрорельєфу, зокрема від глибини залягання мікросфер у матриці дифузора.

Для дифузорів, виготовлених методом термопресування за допомогою штамп, отриманого заглибленням із використанням сферичного індентора, мікроструктура являє собою масив сферичних виступів. Розрахунок кута розсіювання в такому випадку базується на законах геометричної оптики, зокрема на законі заломлення світла (законі Снелліуса) на межі розподілу середовищ полімер – повітря. Матеріалом дифузора у даному дослідженні є поліметилметакрилат із показником заломлення $n = 1,585$.

На рис. 2 представлена геометрична схема формування кута розсіювання на одиничному мікросферичному елементі, де:

n — показник заломлення матеріалу;

R — радіус сферичного індентора;

h — глибина заглиблення індентора (відрізок AC), причому $h < R$;

α — кут між нормаллю до поверхні в точці виходу променя та оптичною віссю;

β — кут розсіювання (відхилення) випромінювання;

θ — повний кут заломлення на межі розділу середовищ.

Схема ілюструє взаємозв'язок кута розсіювання β з геометричними параметрами структури R та h .

Для аналізу впливу точки падіння променя на кут відхилення, на рис. 2 схематично зображено хід другого променя, який проходить крізь мікросферу ближче до її оптичної осі. Для цього променя α_1 — кут між нормаллю та віссю, β_1 — відповідний кут розсіювання, а відрізок $AB = h_1$ позначає висоту сегмента в точці па-

діння. Геометричний аналіз показує, що для точок, розташованих ближче до вершини сферичного сегмента, де $h_1 < h$, кут розсіювання $\beta_1 < \beta$. Таким чином, максимальний кут розсіювання дифузора визначається саме максимальною глибиною заглиблення індентора h .

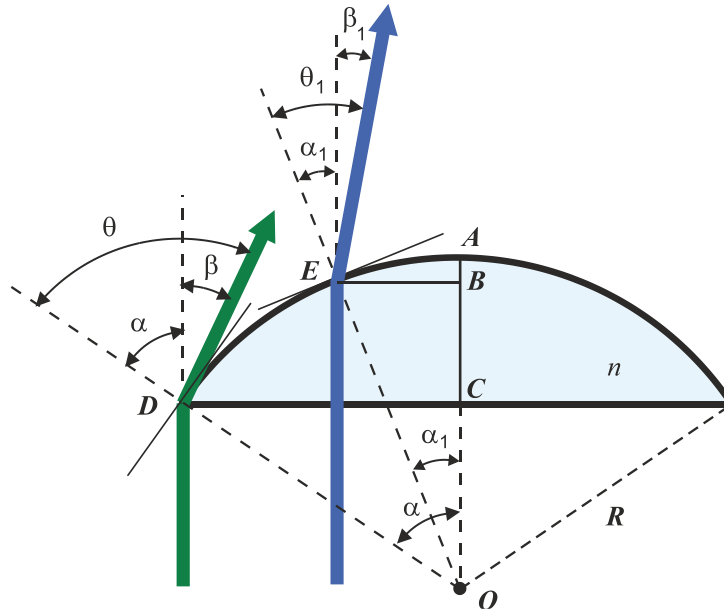


Рис. 2. Геометрична схема заломлення світлового променя на елементі сферичного мікрорельєфу дифузора

Використовуючи закон заломлення світла, можна визначити напрям розповсюдження променя, що падає на межу розділу двох середовищ. Оскільки падаючий промінь паралельний оптичній осі, кут між ним і нормаллю до сферичної поверхні (яка є продовженням радіуса) дорівнює куту нахилу самої поверхні α у точці падіння. Таким чином, кут падіння дорівнює α . За визначенням, кут заломлення θ — це повний кут між нормаллю та заломленим променем у зовнішньому середовищі (повітрі). Відповідно до закону заломлення світла можна записати, що $n \cdot \sin(\alpha) = \sin(\theta)$.

Кут розсіювання β визначає відхилення променя від його початкової траєкторії. З геометричної побудови випливає, що кут заломлення є сумою кута нахилу поверхні та кута відхилення: $\theta = \alpha + \beta$. Підставивши це значення в закон заломлення світла, отримаємо: $n \cdot \sin(\alpha) = \sin(\alpha + \beta)$. Для знаходження кута α скористаємося тригонометричною формулою синуса суми: $n \cdot \sin \alpha = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$. Після перенесення складових, що містять $\sin \alpha$, в ліву частину рівняння та ділення обох частин на $\cos \alpha$, отримуємо остаточний вираз для визначення необхідного кута нахилу поверхні:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin \beta}{n - \cos \beta}\right), \quad (1)$$

де n — показник заломлення матеріалу дифузора; β — заданий кут розсіювання.

Спираючись на геометрію сферичного профілю заглиблення, визначимо величину заглиблення індентора h , яка необхідна для забезпечення заданого кута нахилу α на краю сформованої мікроструктури. На рис. 2 ця величина відповідає відрізьку AC для максимального кута розсіювання β , тоді як для довільного променя з кутом розсіювання β_1 ефективна глибина профілю відповідає відрізьку AB :

$$h = \frac{D}{2}(1 - \cos \alpha) = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \left(\arctan \left(\frac{\sin \beta}{n - \cos \beta} \right) \right) \right), \quad (2)$$

де D — діаметр сферичного індентора.

З виразу (2) випливає, що для отримання ідентичного кута розсіювання можна використовувати індентори різних діаметрів за умови пропорційної зміни глибини заглиблення. Оскільки кут α залежить виключно від показника заломлення матеріалу n та необхідного кута розсіювання β , відношення h/D для фіксованого кута залишається незмінним.

Це дозволяє зробити висновок: максимальний кут розсіювання дифузора β_{\max} визначається крутизною профілю на краях сформованої мікросфери. Таким чином, кутова характеристика дифузора є функцією відносної глибини залягання мікроструктури і не залежить від абсолютного значення діаметра індентора, якщо зберігається пропорційність h/D .

На рис. 3,а представлено результати обчислення виразу (2) для різних діаметрів сфери індентора. Як видно з графіків, зі збільшенням кута розсіювання β необхідна глибина заглиблення h зростає нелінійно. На рис. 3,б наведено залежності глибини профілю мікросфери від діаметра сфери індентора для фіксованих кутів розсіювання. Ці залежності мають вигляд прямих похилих ліній, що проходять через початок координат. Лінійний характер цих графіків експериментально підтверджує теоретичне положення про те, що відношення h/D для будь-якого фіксованого кута залишається незмінною величиною.

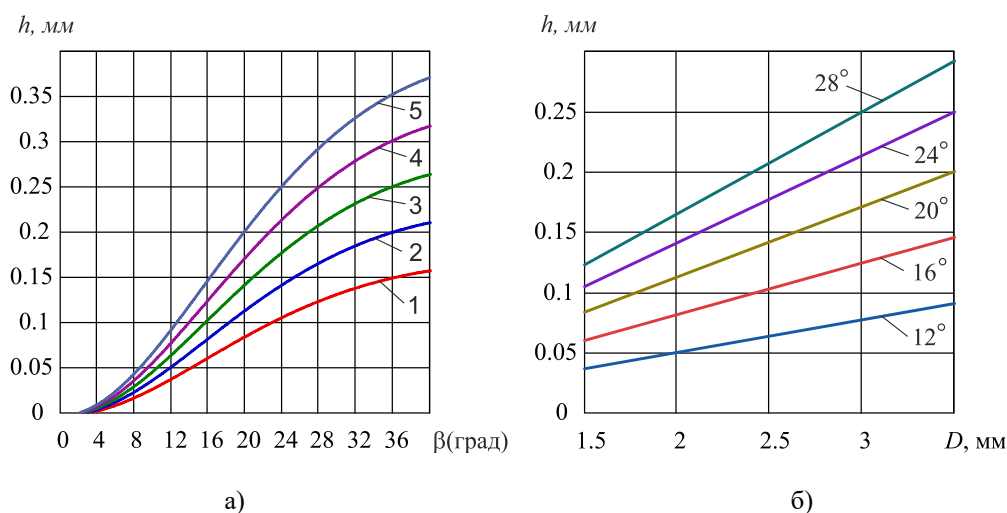


Рис. 3. Залежність глибини профілю мікросфери: а) від кута розсіювання (відхилення); б) від діаметра сфери індентора: 1 — $D = 1,5$ мм, 2 — $2,0$ мм, 3 — $2,5$ мм, 4 — $3,0$ мм, 5 — $3,5$ мм

Результати експериментального дослідження і аналіз кутового розподілу розсіяного випромінювання

Для практичної реалізації розробленого способу та автоматизації процесу формування мікроструктур було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення у середовищі Python 3.12. На рис. 4 представлено алгоритм формування гексагонального розташування центрів сферичних поверхонь. Вхідними параметрами алгоритму є: n, m — кількість мікросфер по осях x та y відповідно; t — крок розміщення (період структури); R — радіус області структурування на матриці.

Програма здійснює розрахунок координат кожного ідентування та генерує керуючий код для обладнання з числовим програмним керуванням. На рис. 5 наведено фрагмент лістингу робочої програми (G -коду), адаптованої для розточувально-координатного верстата, що забезпечує високу точність позиціонування індентора при створенні металевої матриці.

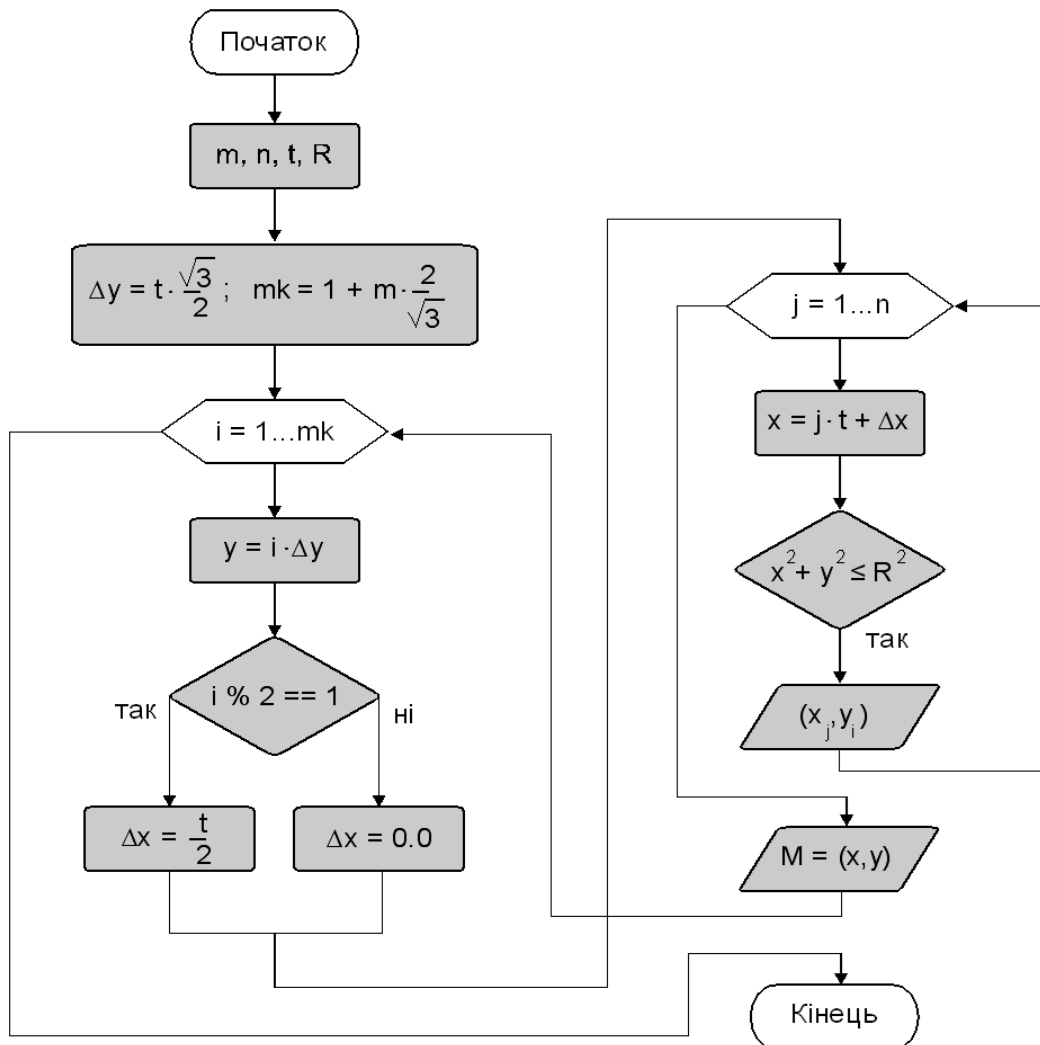


Рис. 4. Блок-схема алгоритму формування гексагональної топології розташування центрів мікросферичних елементів: n, m — кількість мікросфер за осями координат; t — крок розміщення; R — радіус робочої зони дифузора.

```
N1d1  
N2G90G1X0Y0F500  
N3Z1  
N4X-3.125Y10.287  
N5Z0.1F200  
N6Z-0.2F5  
N7Z1.0F200  
N8X-3.125Y7.966  
N9Z0.1F200  
N10Z-0.2F5  
N11Z1.0F200  
N12X-6.810Y12.028  
.....
```

Рис. 5. Фрагмент лістингу керуючої програми (G-коду) для реалізації на координатно-розточувальному верстаті з ЧПК

Для перевірки впливу різних характеристик на формування просторового розподілу інтенсивності випромінювання було виготовлено дослідні зразки дифузорів із різними параметрами мікрорельєфу та проведено їхню апробацію шляхом освітлення колімованим лазерним променем. На рис. 6 представлено візуалізацію просторового розподілу інтенсивності випромінювання (індикатрис розсіювання) для шести типів мікроструктурованих дифузорів. Аналіз отриманих зображень дозволяє виділити три ключові закономірності формування світлового поля.

1. Вплив геометрії мікропрофілю (сфера та конус).

Сферичні елементи (рис. 6, *a–z*) формують суцільну заповнену пляму у формі кола. Відповідно, промені відхиляються на всі можливі кути в межах $0 \dots \beta$, рівномірно заповнюючи внутрішню частину кола. Конічні елементи (рис. 6, *d–e*) формують кільцевий розподіл інтенсивності (annular distribution). Оскільки грані конуса мають сталий кут нахилу α по всій площі, більшість променів відхиляються на один і той самий кут β . На (рис. 6, *e*) видно чітке кільце з яскравою центральною точкою (нульовий порядок).

2. Вплив перекриття мікроструктур.

З перекриттям (рис. 6, *a, б*) пляма має найвищу гомогенність (рівномірність заповнення). Перекриття зон заглиблення «згладжує» періодичність структури, зменшуючи дифракційні ефекти від регулярної сітки. Без перекриття (рис. 6, *в, г, e*) у центрі плями з'являється виражена яскрава точка (нульовий порядок дифракції). Це зумовлено тим, що частина світла проходить крізь плоскі проміжки між мікросферами без відхилення.

3. Тип топологічного розташування (гексагональне та ортогональне).

Гексагональне розташування (рис. 6, *a, б, в*) забезпечує найбільш ізотропне розсіювання. На рис. 6, *в* (без перекриття) помітна слабка шестипроменева симетрія ореолу, що безпосередньо корелює з геометрією розташування центрів мікросфер. При ортогональному розташуванні (рис. 6, *г*) загальна форма плями залишається близькою до кругової.

Узагальнюючи результати (рис. 6), можна стверджувати, що для створення дифузорів з рівномірним заповненням області розсіювання найбільш ефективним є використання сферичного індентора з гексагональним розташуванням та взаємним перекриттям зон заглиблення.

Водночас конічні структури (рис. 6, д, е) дозволяють трансформувати падаючий пучок у специфічний кільцевий розподіл. Варто зазначити, що формування такого профілю інтенсивності має практичне значення для спеціалізованих оптичних систем. Зокрема, кільцеві пучки широко застосовуються в системах лазерного наведення за методом «променя, що веде» (laser beam riding), де просторове кодування координат здійснюється за допомогою структурованих полів випромінювання [6, 7].

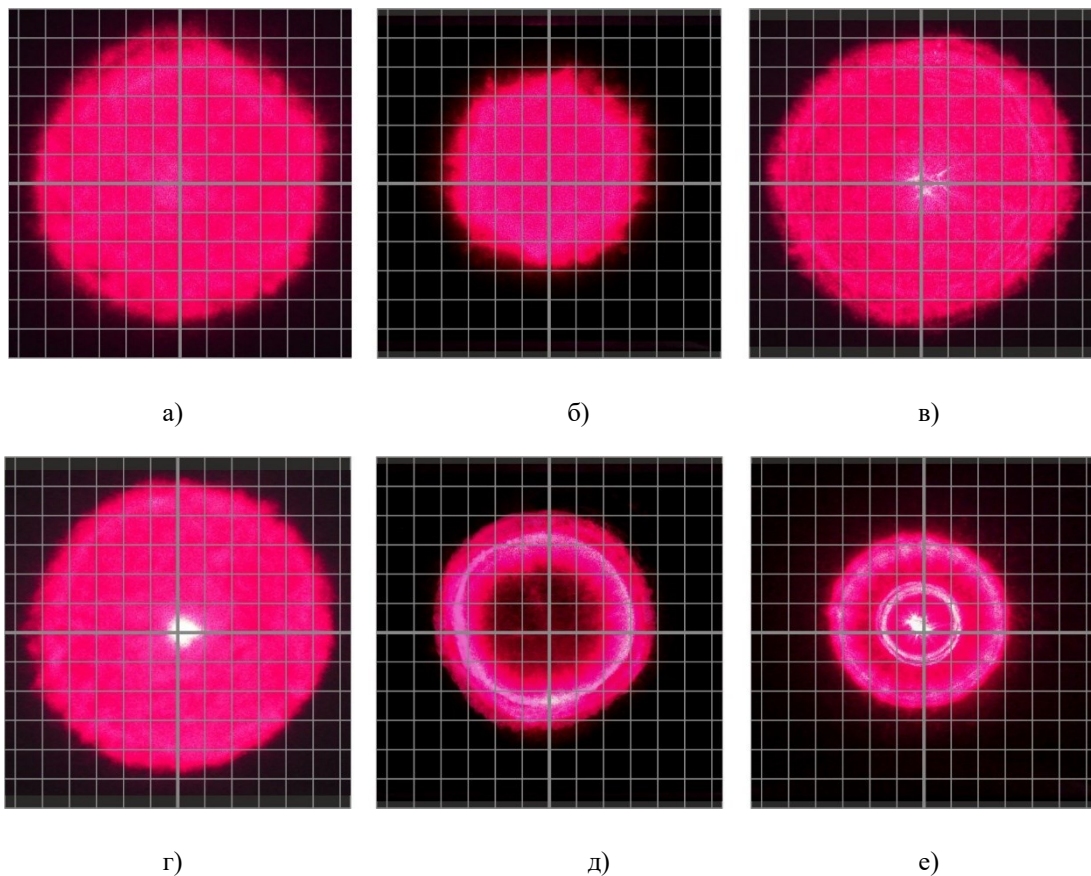


Рис. 6. Експериментальні зображення просторового розподілу інтенсивності випромінювання (світлових плям) для різних типів дифузорів: а) гексагональне розташування мікросфер із перекриттям ($\beta = 16^\circ$); б) гексагональне розташування мікросфер із перекриттям ($\beta = 12^\circ$); в) гексагональне розташування мікросфер без перекриття ($\beta = 16^\circ$); г) ортогональне розташування мікросфер без перекриття ($\beta = 16^\circ$); д) конічний профіль, гексагональне розташування з перекриттям; е) конічний профіль, гексагональне розташування без перекриття

Важливим параметром для розташування мікросфер на поверхні дифузора є геометрія розташування центрів мікросфер для досягнення умови перекриття сферичних елементів. Для цього треба визначити діаметр виступаючої сфери d над

поверхнею дифузора, яка дорівнює $d = D \cdot \sin(\alpha)$, тоді відстань між центрами мікросфер має бути $L \leq 0.9 \cdot d$.

Експериментально встановлено, що ступінь перекриття мікросфер впливає на коефіцієнт пропускання світла та практично не змінює кутову індикатрису розсіяного випромінювання. За однакового рівня перекриття гексагональне розташування мікролінз забезпечує вищий коефіцієнт пропускання порівняно з ортогональною структурою.

Висновки

Виконано дослідження процесів формування світлового поля мікροструктурованими дифузорами та запропоновано гексагональну топологію розміщення мікросфер на поверхні дифузора. Доведено, що для повного усунення нульового порядку дифракції необхідне помірне взаємне перекриття зон інденування, що забезпечує 100 % коефіцієнт заповнення поверхні.

Установлено вплив геометрії профілю на індикатрису розсіювання: сферичні індентори формують гомогенну круглу пляму, тоді як конічні — кільцевий розподіл інтенсивності, що є ефективним для спеціалізованих систем наведення.

Розроблено та реалізовано спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує автоматичну генерацію керуючого G-коду для верстатів з числовим програмним керуванням, що гарантує високу точність позиціонування мікроелементів.

Експериментально підтверджено адекватність геометричної моделі та можливість вибору кута розсіювання β шляхом варіації відносної глибини інденування h/D . Це дозволяє проектувати оптичні гомогенізатори із заздалегідь заданими характеристиками.

1. Пат. США № US8262953, МПК B29D11/00. Wang Lau-Shuenn. Method for making optical diffuser; Опубл. 11.09.2012.

2. Пат. США № US6410213b1, МПК g03f7/001. Raguin Daniel, Morris Michael, Emmel Peter. Method for making optical microstructures having profile heights exceeding fifteen microns; Опубл. 25.06.2002.

3. Спосіб виготовлення оптичного дифузору. Пат. України на корисну модель. № 123591, МКІ G03F 7/20. Заявл. 15.11.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4.

4. Косяк І.В. Формування розподілення конусних поверхонь в структурі оптичних дифузоров-гомогенізаторів. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2020. Т. 22, № 3 С. 31–38. doi: 10.35681/1560-9189.2020.22.3.219022

5. Антонов Є.Є., Токалін О.О. Параметри рельєфу та кутовий розподіл інтенсивності світла для осесиметричних поверхневих гомогенізуючих структур. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2020. Т. 22, № 1. С. 12–23. doi: 10.35681/1560-9189.2020.1.1.207749.

6. Fred M. Dickey. Laser Beam Shaping Theory and Techniques. CRC Press, 2017. 590 p. DOI: 10.1201/b17140.

7. M. Schmidt et al. Dynamic beam shaping—Improving laser materials processing via feature synchronous energy coupling. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 2024. 73. P. 533–559. doi:10.1016/j.cirp.2024.05.005.

Надійшла до редакції 18.03.2026

Прийнята до друку 19.05.2026

Опублікована 17.06.2026