

УДК 617.751

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1\(41\).111-121](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1(41).111-121)

В. В. ПЕТРОВ, академік НАН України,
доктор технічних наук,
професор
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>

Є. Є. АНТОНОВ, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>

В. М. ЗЕНІН, науковий співробітник
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>

А. А. КРЮЧИН, член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
<http://orcid.org/0000-0002-5063-4146>

С. М. ШАНОЙЛО, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
<http://orcid.org/0009-0002-5559-8521>
(Інститут проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України
м. Київ)

МІКРОПРИЗМОВА ПЛОСКО-ФОКУСУЮЧА ФРЕНЕЛІВСЬКА ОПТИКА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Розроблено алгоритм моделювання мікропризмових концентраторних лінз Френеля, які формують в фокальній площині гомогенне зображення пройдених світлових променів. Такі плоско-фокусуючі лінзи дозволяють формувати оптимальний сигнал в системах автоматичного керування рухомими об'єктами з чотирьох-площинними фотодетекторами, а також є перспективними для використання в сонячних фотоелектричних модулях. За допомогою колімованого лазерного променя експериментально досліджено тестові зразки спеціалізованих трансформуючих мікропризмових структур, які виготовлені за результатами моделювання і формують в фокусі рівномірно освітлене світлове коло. Створено відповідну технологію алмазного мікроточіння і виготовлено металеві матриці для масового тиражування плоско-фокусуючої оптики з оптичних пластичних матеріалів. Досліджено зразки спеціалізованих трансформуючих мікропризмових структур, які виготовлені методом термопресування з використанням створених металевих матриць.

Ключові слова: мікропризмовею структура Френеля, моделювання параметрів лінз, плоско-фокусуюча оптика, алмазне мікроточіння.

ВСТУП

В Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України виконано ряд науково-технічних досліджень зі створення оптичних пристроїв для гомогенізації пройдених світлових потоків (дифузори, розсіювачі променів видимого діапазону). Зокрема, розроблено алгоритми моделювання та виготовлено методом алмазного мікроточіння дослідні зразки мікропризмових модернізованих лінз Френеля, які формують у фокусі рівномірно освітлену пляму для пройденного паралельного потоку світла. Такі лінзи називаються плоско-фокусуючими, на відміну від традиційних лінз Френеля, які формують в фокальній площині точкове зображення, інтенсивність якого в залежності від радіуса зображення r відповідає функції $J(r) \sim 1/r$.

Алгоритм моделювання детально описаний в декількох наших роботах [1–5] і дозволяє створювати плоско-фокусуючі лінзи різного світлового діаметру D_L для необхідної фокусної відстані f_0 для певного матеріалу лінзи з показником заломлення n_0 . Такі лінзи в залежності від свого призначення мають формувати в фокусі гомогенно освітлене коло необхідного розміру. Так, лінзи для систем керування рухомими об'єктами з чотирьох-площинними фотодетекторами з робочою поверхнею діаметром $d_D \sim 10$ мм, мають формувати гомогенне коло приблизно такого ж діаметру; згідно з технічним завданням ми створили ряд трансформуючих лінз з діаметром плями в фокусі $d_V = 9,0$ мм [6]. Використання такої трансформуючої оптики замість традиційної пари оптичних елементів «дифузор-фокусуюча лінза» у відповідних пристроях автоматичного спостереження та керування дозволяє зменшити масо-габаритні параметри оптичного блоку і таким чином підвищити точність і надійність функціонування систем.

Лінзи для концентраторних модулів з фотоперетворювачами для сонячної енергетики [7] проектувалися нами з діаметром фокальної світлової плями $d_V = 3,0$ мм для досягнення певного ступеня концентрування K_C сонячних променів. При світловому діаметрі лінз $D_L = 50$ мм з такими лінзами досягається значення $K_C \approx 280$.

В останній час створено та виготовлено перспективні дослідні зразки плоско-фокусуючих лінз для систем керування, які формують в фокальній площині світлове коло з яскравим кільцем на периферії зображення, тим самим дозволяючи формувати оптимальні практично лінійні пеленгаційні характеристики рухомих об'єктів з максимальним кутом пеленгу. Розроблено технологію алмазного мікроточіння, запропоновано конструкцію та виготовлено металеві матриці для масового тиражування запропонованих плоско-фокусуючих лінз. Розглянемо зазначені питання більш детально.

АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПРИЗМОВИХ ОПТИЧНИХ СТРУКТУР

Раніше авторами [1–4] було запропоновано алгоритм моделювання параметрів трансформуючої мікропризмової плоскої оптики, яка дозволяє формувати в фокусі світлове коло необхідного радіуса r_V з практично гомогенним розподілом освітленості. За результатами моделювання виготовлено декілька тестових зразків

лінз, мікрорельєф яких сформовано на плоскій поверхні заготовки з оптичних пластичних матеріалів методом алмазного мікроточіння [8–9]. Для виготовлення товарної кількості таких лінз індивідуальне мікроточіння, вочевидь, неприпустиме і необхідно формувати відповідні металеві матриці, за допомогою яких, наприклад методом термопресування, створювати необхідну кількість пластикових кінцевих відбитків.

Матриця для масового тиражування плоско-фокусуєчих лінз повинна мати мікрорельєф, який обернений стосовно рельєфу лінзи. Схема заломлення світла для такої матриці показана на рис. 1, де f – фокусна відстань лінзи; n_0 і n_1 – показники заломлення середовища та матеріалу лінзи відповідно; R_k – радіус кільцевих призматичних зон $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ лінзи; ΔR_k – ширина заломлюючої k -зони лінзи в напрямку осі X^0 ; $r_v = R_0$ – зовнішній радіус світлової плями у фокальній площині; γ_k – кут спостереження k -зони з фокусу F ; α_k – кут заломлення призми, β_k – зворотний кут призми; h_k – глибина рельєфу k -зони.

При моделюванні лінз, перш за все, необхідно задати оптичні та геометричні параметри майбутньої лінзи: фокусну відстань f , світловий діаметр D_L , робочу довжину хвилі випромінювання λ , необхідний радіус r_v сфокусованої світлової плями в фокусі лінзи. Визначається схема освітлення (CO) в фокусі (світлове коло або коло з кільцем на периферії).

Для усунення небажаного центрального максимуму освітленості в центрі зображення моделюється не освітлена «темна» область певним радіусом r_j ($j = 0, 1, \dots, N$); вважається, що змодельована «темна» область в центрі зображення в реальності буде освітлюватися за рахунок дифузно розсіяного на дефектах мікрорельєфу світла та додаткового відбиття заломлених променів всередині лінзи. Після цього визначається необхідна кількість призматичних зон та проводиться корекція ширини призматичних зон (ZC) лінзи ΔR_k [5] внаслідок звуження світлових потоків лінзою.

На наступному етапі проводиться певна оптимізація процесу фокусування (OF), яка полягає в тому, що відповідні зони лінзи світловим діаметром $D_L = 2R_L$ з радіусом R_k та шириною $\Delta R_k = R_{k+1} - R_k$ ($k = 20-35$) спрямовують заломлені світлові потоки в певні кільцеві області зображення шириною $\Delta r_j = r_{j+1} - r_j$. Наприклад, схема фокусування $OF = 1,0(3)-2,0(1)-3,0(1)$ означає, що 3 лінзові зони #1-3 спрямовують світло в область зображення з внутрішнім радіусом $r_0 = 1,0$ мм, одна зона #4 – в область $r_0 = 2,0$ мм та одна зона #5 – в область $r_0 = 3,0$ мм, при цьому заданий зовнішній радіус зображення r_v є однаковим для всіх променів. Окрім того, для можливості застосування при виготовленні мікропризматичної оптики методом алмазного мікроточіння [8–9], рефракційні зони лінзи шириною ΔR_k створюються з декількох окремих мікропризм шириною ΔR_{kc} , ідентичних за глибиною рельєфу h_k та за кутом рефракції α_k : $\Delta R_k = \Sigma \Delta R_{kc}$. Ширина кожної з таких зон $\Delta R_{kc} = 1,0-1,2$ мм [4] не повинна перевищувати розміри ріжучої кромки наявного алмазного інструменту.

Згідно з технічним завданням на виготовлення лінз-дифузорів для реальних систем керування рухомими об'єктами нами методом алмазного мікроточіння заготовок з оптичного полікарбонату було сформовано плоско-фокусуєчі лінзи для довжини хвилі $\lambda_0 = 1,064$ мкм (згідно [10] показник заломлення $n_0 = 1,564$), які формують в фокусі гомогенне світлове коло діаметром $d_v = 9,0$ мм, при цьому світловий діаметр лінзи становить $D_L = 50$ мм при фокусній відстані $f_0 = 41$ мм; діаметр $D_L = 33$ мм при фокусі $f_0 = 28$ мм; діаметр $D_L = 50$ мм при фокусі $f_0 = 25$ мм.

Виготовлено також зразки деяких перспективних «інфрачервоних» лінз з фокусною відстанню $f_0 = 15-20$ мм діаметром $D_L = 33-50$ мм, а також розроблено та виготовлено декілька тестових лінз з аналогічними параметрами, але для зеленої зони спектру ($\lambda_0 = 0,585$ мкм, $n_0 = 1,585$), з метою можливості тестування за допомогою «зеленого» лазера фокусуєчих властивостей лінз та подальшої оптимізації їх геометричних параметрів.

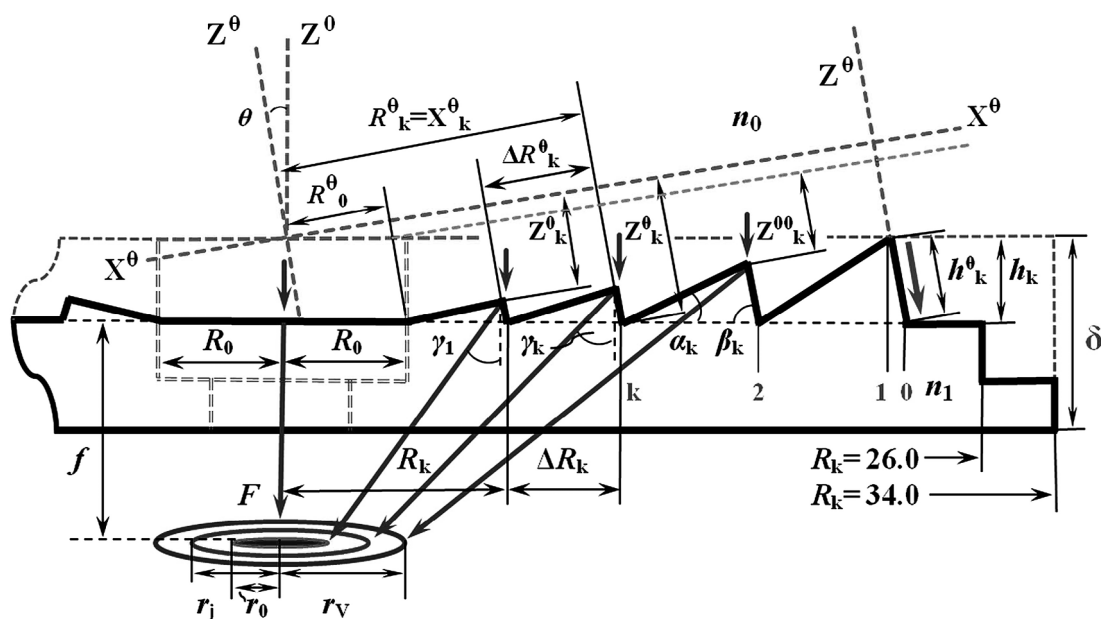


Рис. 1. Схема матриці для виготовлення плоско-фокусуєчих лінз

ОПТИЧНІ ПАРАМЕТРИ СТВОРЕНОЇ МІКРОПРИЗМОВОЇ ТРАНСФОРМУЮЧОЇ ОПТИКИ

Експериментальні дослідження виготовлених плоско-фокусуєчих «інфрачервоних» лінз для систем керування рухомими об'єктами ($\lambda_0 = 1,064$ мм, $n_0 = 1,564$) виконано, перш за все, з метою відпрацювання остаточної конструкції лінз, зокрема, визначення розміру темної області r_0 в світловій плямі в фокусі, а також визначення оптимальної схеми освітлення CO і схеми фокусування CF .

Для експериментального дослідження лінз створено спеціальний стенд, який дозволяє отримувати на екрані зображення паралельного пучка світла від лазера, пройденного через досліджувану лінзу. Потік створюється трьохлінзовою конденсорною системою лінз, довжина хвилі «зеленого» лазера $\lambda = 0,532$ мкм, діаметр колімованого світлового потоку $D_S \approx 60$ мм. Оптична схема нашої експериментальної установки детально розглянута в [1]. Зображення трансформованого променя лазера на екрані фіксувалися фотокамерою *Nikon P7000*, використовувалися фіксовані налаштування фокусу об'єктива та параметрів зйомки для можливості безпосереднього порівняння освітленості отриманих фокальних зображень для різних лінз.

На рис. 2-а наведена типова профілограма зображення колімованого лазерного променя на матовому екрані, а на рис. 2-б – зображення пройденого променя на екрані після трансформування його тестовою лінзою із світловим діаметром $D_L = 50$ мм. Світлова пляма в фокусі лінзи на екрані діаметром d_S відповідає розрахунковому значенню $d_V = 9,0$ мм, кільце на периферії – зображення колімованого променя, пройденого поза лінзою, шириною $(D_S - D_L) / 2 \approx 5,0$ мм.

Рис. 3 ілюструє загальний вигляд тестової лінзи-дифузора # 4.1 (пляма в фокусі – коло, фокусна відстань $f_0 = 41$ мм для довжини хвилі $\lambda_0 = 0,585$ мм (згідно [10] $n_0 = 1,585$), світловий діаметр $D_L = 50$ мм, розрахунковий радіус світлової плями $r_V = 4,5$ мм, радіус «темної» області в центрі зображення $r_0 = 0,75$ мм, відстань спостереження $L = 41$ мм), зображення центральної фокальної світлової плями на екрані для цієї лінзи з масштабованою схемою чотирьох-площинного фотодетектора діаметром $d_D = 16$ мм, а також деталізоване зображення центральної плями, розподіл освітлення якого є практично гомогенним.

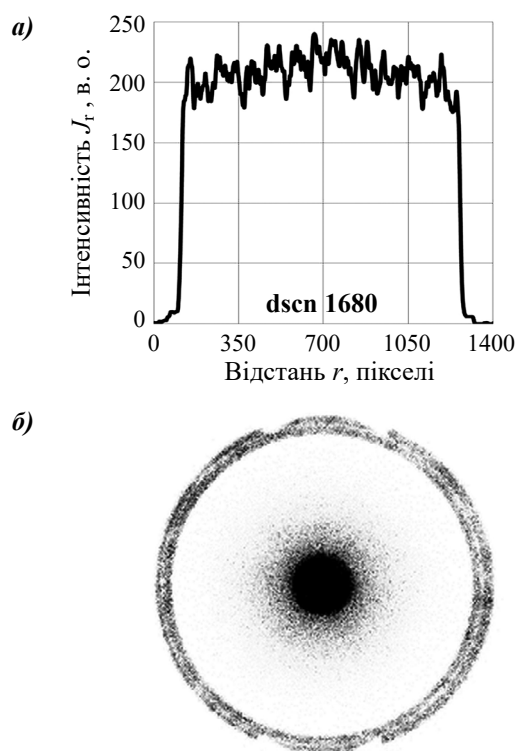


Рис. 2. Профілограма колімованого лазерного променя на екрані (а) та зображення променя, трансформованого лінзою (б)

Профілограми розподілу інтенсивності світла в фокальній площині для лінзи # 08 (пляма в фокусі – коло) наведені на рис. 4 суцільними лініями. Лінза розроблена саме для використання в системах автоматичного керування рухомими об'єктами і має радіус $r_0 = 0,75$ мм, діаметр $D_L = 50$ мм, фокус $f_0 = 41$ мм і схему $OF = 0.75(3)-1.5(1)-2.3(1)-3.5(1)$. Профілі зображень отримано за допомогою програми *Jmage J-1.53* [11]. Розрахований в пікселях діаметр світлової плями $d_S = 9,0$ мм на екрані для лінзи # 08 показаний на рис. 4 пунктирними лініями.

Профіль для номінальної відстані спостереження $L = 41$ мм досить гомогенний і слабо змінюється при невеликих змінах відстані L . Однак профілі дещо розширені відносно розрахункових даних і в центрі світлової плями спостерігається невеликий «провал» освітленості, що свідчить про необхідність корекції радіуса «темної» області r_0 в центрі зображення.

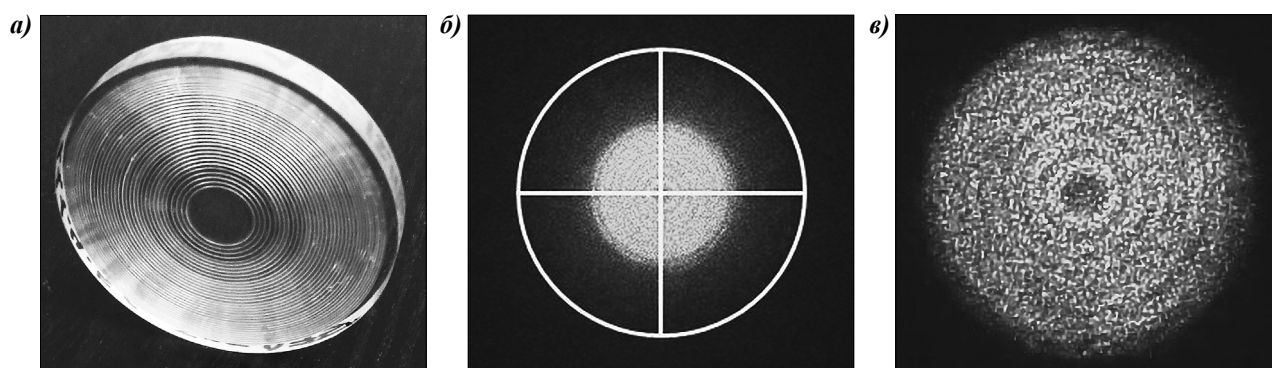
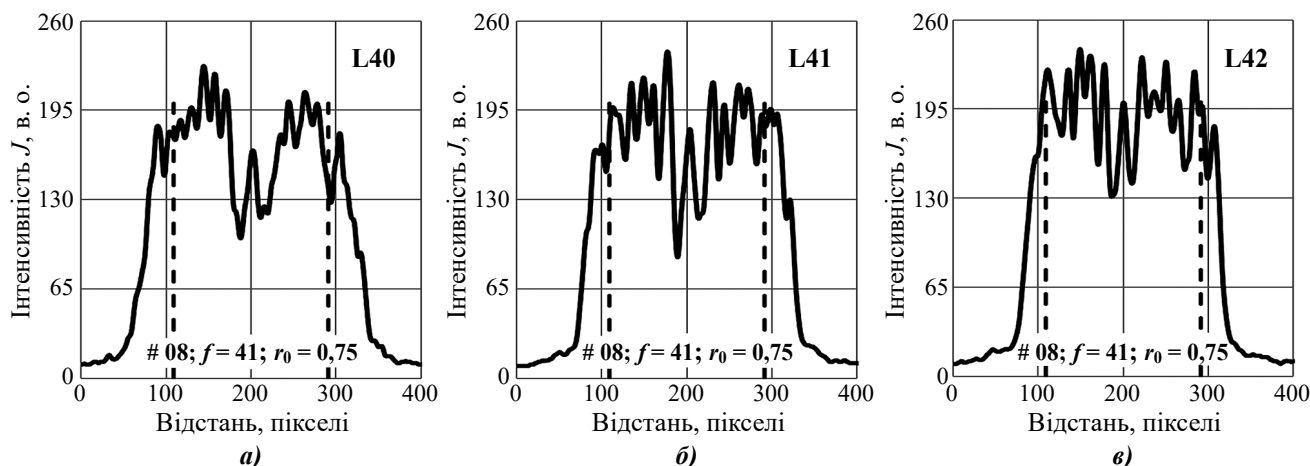


Рис. 3. Загальний вигляд плоско-фокусуєчої лінзи #4.1 (а); зображення світлової плями на екрані (б); деталізоване зображення плями (в)



Р и с . 4. Профілограми світлової фокальної плями для лінзи #08: а) відстань спостереження $L = 40$ мм; б) $L = 41$ мм; в) $L = 42$ мм

В той же час, для лінзи # 15 (рис. 5), для якої радіус «темної» області $r_0 = 0,5$ мм, (світлова пляма – коло з кільцем) з фокусом $f_0 = 20$ мм для $n_0 = 1,564$, $D_L = 50$ мм та схемою фокусування $ОФ = 0,5(1)-1,0(1)-2,7(1)-4,0(10)$, спостерігається практично гомогенний профіль зображення, який є повністю задовільним для використання в системах автоматичного контролю. Форма отриманих профілів помітно залежить від відстані спостереження L , тобто глибина різкості зображення для цієї лінзи невелика.

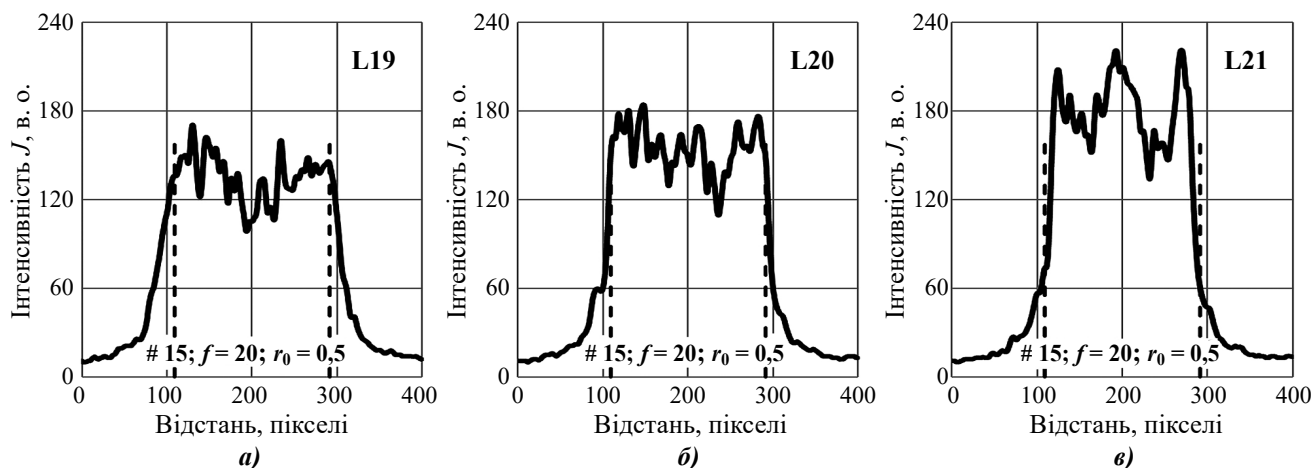
Відмітимо на прикладі цієї лінзи, що для номінального значення $L = 20,0$ мм для $n_0 = 1,564$ не спостерігається світлове кільце на периферії плями (рис. 5-б), яке заплановане при моделюванні. Однак для відстані $L = 21,0$ мм таке кільце, яке формується десятками мікропризмовими зонами лінзи # 4–13, вже з'являється (рис. 5-в). Цей факт підтверджує, що для складних за схемою оптимізації фокусування $ОФ$ «інфрачервоних» лінз неможливо точно визначити при діагностиці новий єдиний фокус для «зеленого» лазерного променя: кожна призматична зона лінзи функціонує окремо і заломлені промені від різних зон лінзи не збігаються в єдину площину фокусування.

Отримані дані для лінз з відносно невеликими фокусними відстанями $f_0 = 20$ –28 мм свідчать про помітну

залежність розподілу освітлення від відстані спостереження L , тобто про малу глибину різкості фокусування. Для лінз з більшою фокусною відстанню $f = 41$ мм глибина різкості відповідно збільшується.

Експериментально отримані профілі зображень дещо розширені відносно розрахункових значень, розмір світлової плями на екрані d_s перебільшує розрахункові значення d_v . На нашу думку, причиною таких розширень профілю може бути дифракція світла на гранях мікропризм [12], відбиття заломлених пучків світла всередині мікрорельєфу, особливо для периферійних зон лінзи, а також дифузне розсіювання променів на механічних дефектах поверхонь лінзи. Відносне збільшення ширини профілю значно більше для лінз з невеликим діаметром світлової плями в фокусі $d_v = 3,0$ мм і має менший ефект для лінз з більшими значеннями $d_v = 9,0$ мм.

За результатами досліджень оптичних параметрів лінз з номінальною фокусною відстанню $f_0 = 15$ –41 мм для різних схем освітлення CO і різних схем фокусування $ОФ$ оптимальний розрахунковий розмір «темної» області в центрі зображення має становити $r_0 \approx 0,4$ –0,5 мм; за таких умов формується практично гомогенний розподіл освітленості в фокусі лінзи, що необхідно для ефективного використання лінз в системах автоматичного слідування та контролю.



Р и с . 5. Профілограми плями для лінзи # 15: а) відстань спостереження $L = 19$ мм; б) $L = 20$ мм; в) $L = 21$ мм

ЗАСТОСУВАННЯ ТРАНСФОРМУЮЧОЇ ОПТИКИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

В системах автоматичного керування рухомими об'єктами пеленгаційні характеристики $J(\theta)$, тобто залежність сигналу відклику J від кута пеленгу об'єкта θ , формуються, найчастіше, за допомогою чотирьох-площинного фотоприймача шляхом реєстрації сигналу детектора в залежності від кута повороту детектора θ до напрямку світлового потоку J від об'єкта. При цьому повороті сформоване певним чином гомогенне зображення об'єкта переміщується по поверхні фотоприймача.

Для моделювання вигляду пеленгаційних характеристик $J(\theta)$ було створено спеціальний стенд з оптичним блоком, який можна повертати в потоці світла на необхідний кут θ . В якості фокусуємого елемента застосовано створені нові мікропризмкові плоско-фокусуєчі лінзи. Схема експериментального стенду наведена на рис. 6, на якому пунктиром позначено оптичний блок з мікропризмковою лінзою.

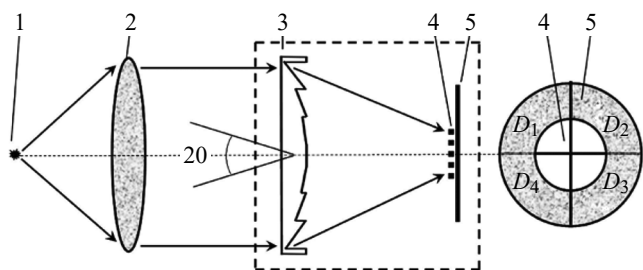


Рис. 6. Оптична схема стенду для дослідження пеленгаційних характеристик: 1 – джерело світла; 2 – коліматорна лінза; 3 – розроблена лінза-концентратор; 4 – світлова пляма в площині чутливих елементів; 5 – чотирьох-площинний фотодетектор з елементами # D_1 – D_4 в поворотному оптичному блоці; θ – кут повороту лінзи до напрямку світлового потоку

Загальний вигляд експериментального стенду і вимірювального блоку наведені на рис. 7.

Контрольно-вимірювальний блок стенду дозволяє розраховувати модуль величини $J(\theta)$ за сигналами (D_1 – D_4) з чотирьох-площинного фотодетектора. Використовувався детектор типу ФДІ4М круглої форми з діаметром фото-

чутливої поверхні $d_D = 16$ мм. В якості джерела світла застосовано «червоний» світловий діод з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,64$ мкм, оскільки гомогенізатори в реальних системах автоматичного керування функціонують найчастіше при інфрачервоному освітленні об'єкту.

Сумарний сигнал J з матриці детекторів D_1, D_2, D_3, D_4 від освітленого об'єкта в вертикальний і горизонтальний площинах розраховується, відповідно, за формулами:

$$J_V = \{D_1 + D_2 - (D_3 + D_4)\}; \quad (1)$$

$$J_H = \{D_2 + D_3 - (D_1 + D_4)\}.$$

Обчислений таким чином сигнал (1) буде залежати від відстані до рухомого об'єкта, оскільки інтенсивність світла падає при зростанні відстані. Тому для розрахунку сигналу відхилення доцільно використовувати нормовані сигнали, а саме:

$$J_{V0} = \{D_1 + D_2 - (D_3 + D_4)\} / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) = J_V / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4); \quad (2)$$

$$J_{H0} = \{D_2 + D_3 - (D_1 + D_4)\} / (D_1 + D_2 + D_3 + D_4).$$

Такі нормовані сигнали J_{V0} та J_{H0} (2) не залежатимуть від відстані до об'єкта, а тільки від кута відхилення θ променя відносно нормалі до поверхні матриці детекторів. При належному калібруванні матриці при куті $\theta = 0$ сигнали (D_1 – D_4) однакові і відповідний сумарний сигнал $J(\theta) = 0$. Саме цей випадок ілюструє рис. 7-б.

Деякі пеленгаційні характеристики, отримані з використанням нових мікропризмкових плоско-фокусуєчих френелівських лінз для $\lambda = 1,064$ мкм з різними фокусними відстанями f , наведено на наступному рис. 8. При їх реєстрації використовувалась корекція відстані спостереження L відносно номінальних значень f [13], яка необхідна внаслідок різниці коефіцієнтів заломлення світла n_1 для «червоної» довжини хвилі випромінювання діода $\lambda = 0,64$ мкм ($n_1 = 1,580$), використаного для освітлення лінз, та для «інфрачервоної» зони спектру $\lambda = 1,064$ мкм ($n_1 = 1,564$), для якої проектувались лінзи з метою їх використання на практиці.

Перш за все, для всіх пеленгаційних характеристик помітна залежність максимального кута пеленгу $\theta_{\max}$ від фокусної відстані f . Так, для лінзи з фокусом $f = 41$ мм



Рис. 7. Загальний вигляд стенду для дослідження пеленгаційних характеристик (а) і зображення вимірювального блоку (б) з сигналами (D_1 – D_4) з чотирьох-площинного фотодетектора для нульового кута повороту θ

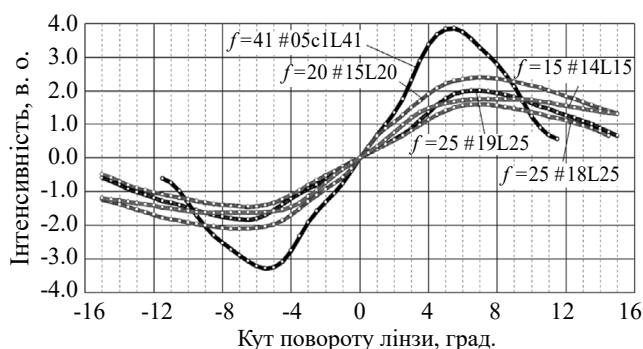


Рис. 8. Пеленгаційні характеристики для деяких плоско-фокусуєчих лінз

для відстані спостереження $L = 41$ мм максимальний кут пеленгу $\theta_{\max} \approx 5.5$ град., в той час як для $f = 15\text{--}20$ мм значення $\theta_{\max} \approx 9\text{--}10$ град. для номінальних значень L .

При фіксованому фокусі лінзи спостерігається залежність максимального кута пеленгу $\theta_{\max}$ і від відстані спостереження L , що наглядно ілюструє рис. 9, отриманий для лінзи # 15 ($f = 20$ мм, $D_L = 50$ мм). Цей факт пов'язаний з тим, що при зменшенні відстані спостереження L світлова пляма в фокусі лінзи збільшується, що створює більш сприятливі умови для формування оптимальної пеленгаційної характеристики. При умові збігу діаметру світлової плями d_V з діаметром детектора d_D , характеристика є практично лінійною, що корелює з нашими розрахунками [6].

Однак, занадто велике розширення зображення d_V , яке перебільшує діаметр фотодетектора d_D , негативно впливає на лінійність характеристики, особливо в області нульових значень кутів θ , що повністю неприйнятно для систем стеження за рухомими об'єктами.

Таким чином, створені мікропризмові плоско-фокусуєчі лінзи Френеля, легкі і практично плоскі, можуть успішно використовуватися в системах автоматичного керування та стеження за рухомими об'єктами замість

традиційної пари важких та великих оптичних систем «дифузор – фокусуєча лінза», що дійсно дозволяє зменшити ваго-габаритні параметри оптичного блоку.

СТВОРЕННЯ МАТРИЦЬ ДЛЯ МАСОВОГО ТИРАЖУВАННЯ ПЛОСКО-ФОКУСУЮЧОЇ ОПТИКИ

При використанні плоско-фокусуєчої оптики в існуючих системах автоматичного слідкування та керування необхідні сотні таких лінз, тому індивідуальне їх виготовлення методом алмазного мікроточіння повністю неприпустиме. Для організації масового тиражування лінз, по-перше, необхідно розробити відповідну конструкцію лінзи, придатну для тиражування, а по-друге, створити відповідну матрицю для тиражування.

При конструюванні лінз, придатних для масового тиражування, наприклад, методом термопресування [12], значення має зворотний кут мікропризм β_k (рис. 1). Виходячи з нашого попереднього досвіду виготовлення лінійних офтальмологічних мікропризм [9], цей кут β_k має становити $\sim 3\text{--}4$ град. для кращого від'єднання металеві матриці від сформованих пластикових лінз після закінчення процесу термопресування.

Для формування такого кута β_k при тиражуванні мікропризм необхідно відтворити його на матриці. Тому при формуванні методом алмазного мікроточіння відповідної матриці, утворюючу металеву заготовку необхідно нахилити на кут $\theta = (90 - \beta_k)$ град. відносно напрямку руху різця. Коричнева стрілка на рис. 1 вказує цей напрямок руху інструменту, який зазначений як вісь Z^0 . Всі кроки ΔR_k і глибини h_k мікрорельєфу, а також зворотні кути призм β_k необхідно отримати в цій новій системі координат (X^0, Z^0). Нові значення $\Delta R_k^0, h_k^0$ і β_k^0 можна визначити наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta X_k^0 &= \Delta R_k^0 = \Delta R_k \cos \theta + (h_k - h_{k-1}) \sin \theta; \\ \beta_k^0 &= 90 - \theta; \quad \Delta Z_k^0 = h_k^0 = h_k / \cos \theta; \end{aligned} \quad (4)$$

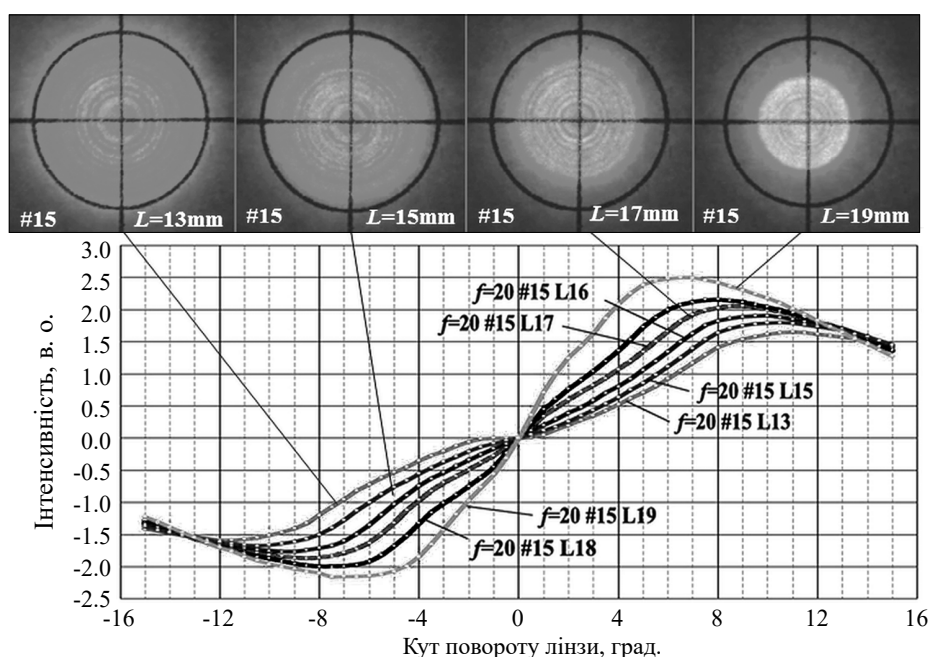
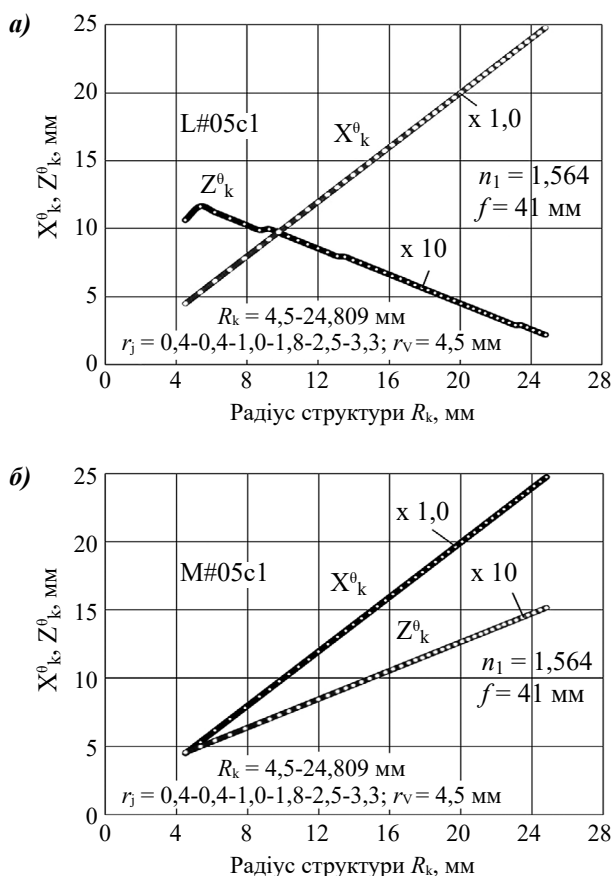


Рис. 9. Світлова пляма на поверхні фотоприймача діаметром $d_D = 16$ мм і відповідні пеленгаційні характеристики для плоско-фокусуєчої лінзи # 15 в залежності від відстані спостереження L

Процес алмазного мікроточіння плоскої металевої заготовки товщиною δ (рис. 1) доцільно починати з центральних зон матриці з мінімальним значенням R_k (точка «0» на рис. 1). При цьому мікростружка від алмазного різця при будь-якому радіусі матриці R_k не зіпсує вже створену кільцеву оптичну поверхню шириною $\Delta R_k = R_{k+1} - R_k$, забезпечуючи тим самим максимальну чистоту створюваних робочих поверхонь мікрорельєфу. Отже, наші розрахунки також повинні бути пов'язані з цією вихідною точкою і переміщення різця вздовж осей (X^0, Z^0) визначаються наступним чином:

$$X_k^0 = \Sigma \Delta X_k^0 = \Sigma \Delta R_k^0; Z_k^0 = h_k^0 + \Sigma \Delta R_{k+1}^0 \operatorname{tg} \theta. \quad (5)$$

Дані щодо X^0 та Z^0 , отримані за формулами (4)–(5) для випадку виготовлення оптимізованої лінзи #05c1 з кутом нахилу $\theta = 3,0$ град., показані на рис. 10-а. На рис. 10-б наведено аналогічні дані для випадку виготовлення відповідної матриці #05c1m.

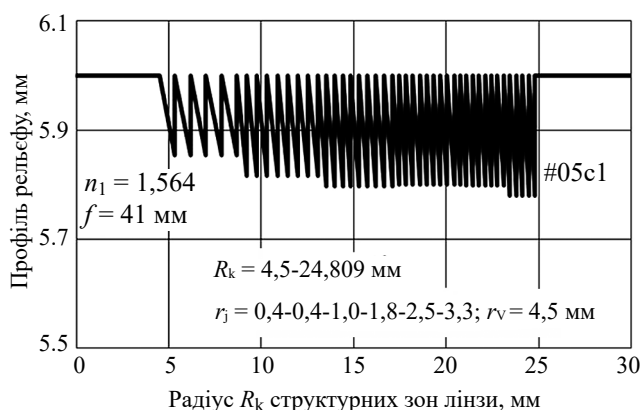


Р и с . 10. Розраховані переміщення різця вздовж осей X_k^0 та Z_k^0 : а) при виготовленні лінзи; б) при виготовленні матриці

Отримані значення X_k^0 та Z_k^0 дозволяють повністю організувати рух картриджа з алмазним різцем вздовж осей (X^0, Z^0). Подібні дані щодо X_k^0, Z_k^0 і β_k^0 можуть бути легко розраховані згідно з запропонованим алгоритмом для інших діаметрів лінз D_L і фокусних відстаней f , а також для інших пластиків – силікону або поліметил-метакрилату, з яких зазвичай виготовляються лінзи для концентраторних модулів сонячної енергетики та для систем автоматичного керування.

Згідно з розрахованими параметрами X_k^0 і Z_k^0 переміщення картриджа з різцем шляхом індивідуального алмазного мікроточіння заготовки з полікарбонату створено лінзу #05c1 фокусом $f = 41$ мм для $\lambda = 1,064$ мкм ($n_1 = 1,564$), світловим діаметром $D_L = 50$ мм і зворотним кутом $\beta_k^0 = 3$ град., яка оптимізована для тиражування методом термопресування.

Лінза утворює в фокусі однорідну пляму радіусом $r_v = 4,5$ мм і необхідна для певної реальної системи автоматичного керування з чотирьох-площинним фотодетектором з робочою зоною круглої форми діаметром $d_D = 9,0$ мм. Радіус «темної» центральної області обрано $r_0 = 0,4$ мм. Корекція кроку (ЗС) призводить до моделювання структури лінзи з 6 призматичних зон #1–6, які реалізуються шляхом формування 44 окремих мікропризматичних елементів. Розрахункова структура рельєфу лінзи #05c1 наведена на наступному рис. 11.

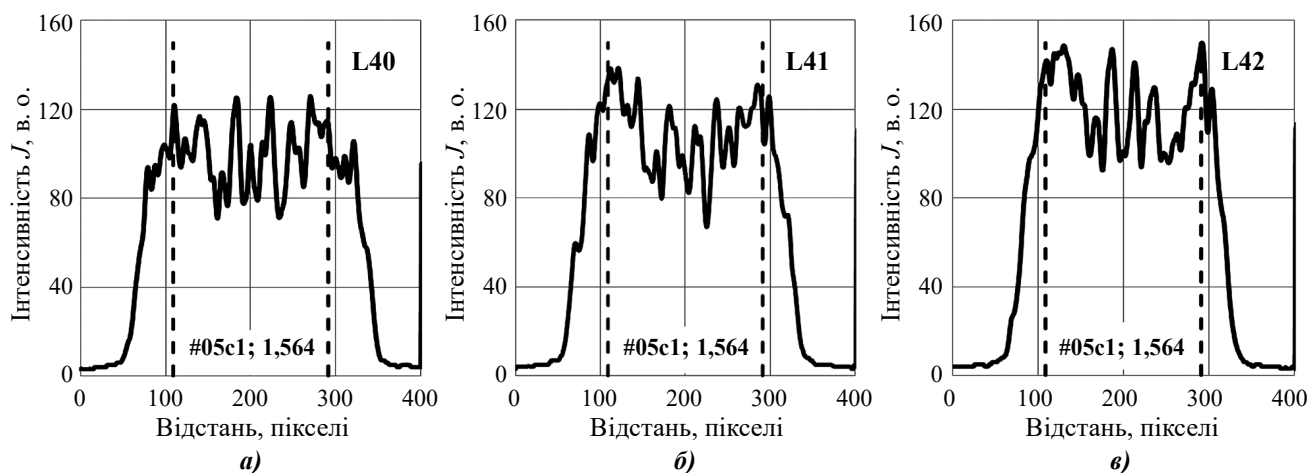


Р и с . 11. Розрахована структура мікрорельєфу лінзи #05c1 з фокусом $f = 41$ мм та світловим діаметром $D_L = 50$ мм, яка формує фокальну світлову пляму радіусом $r_v = 4,5$ мм

Експериментальні дослідження цієї лінзи #05c1 з використанням колімованого лазерного променя довели, що розподіл фокусного світла для цієї лінзи є практично гомогенним (рис. 12). Форма профілів незначно залежить від відстані L і дещо збільшена відносно розрахункової ширини (пунктирні лінії). Однак, в цілому лінза повністю задовольняє технічним умовам на її виготовлення.

Зазначеним методом алмазного мікроточіння було створено також матрицю #05c1m зі спеціального алюмінієвого сплаву В-95, призначену для масового тиражування лінз. При формуванні матриці використано параметри рельєфу ΔR_k^0 і h_k^0 , обчислені для лінзи #05c1.

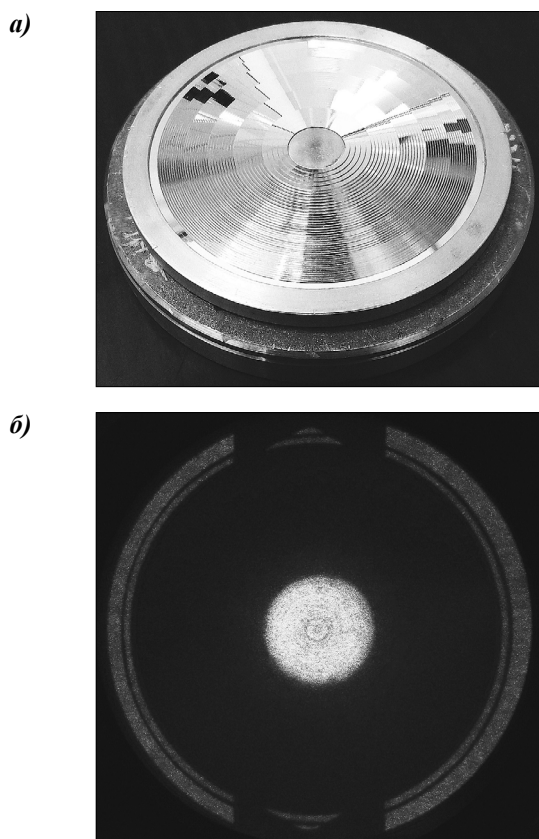
Центральна плоска зона матриці не може бути сформована методом алмазного мікроточіння, тому що неможливо розташувати різець паралельно осі X^0 в цій зоні, яка заглиблена на величину $h_{k \max}$ відносно утворюючої поверхні заготовки. Тому ця центральна зона створюється шляхом висвердлювання отвору з фіксуючим уступом діаметром R_0 , після чого в цей отвір встановлюється спеціальний штифт з полірованою вершиною з таким самим діаметром R_0 , який фіксується на необхідній глибині $h_{k \max}$. Периферійна частина матриці



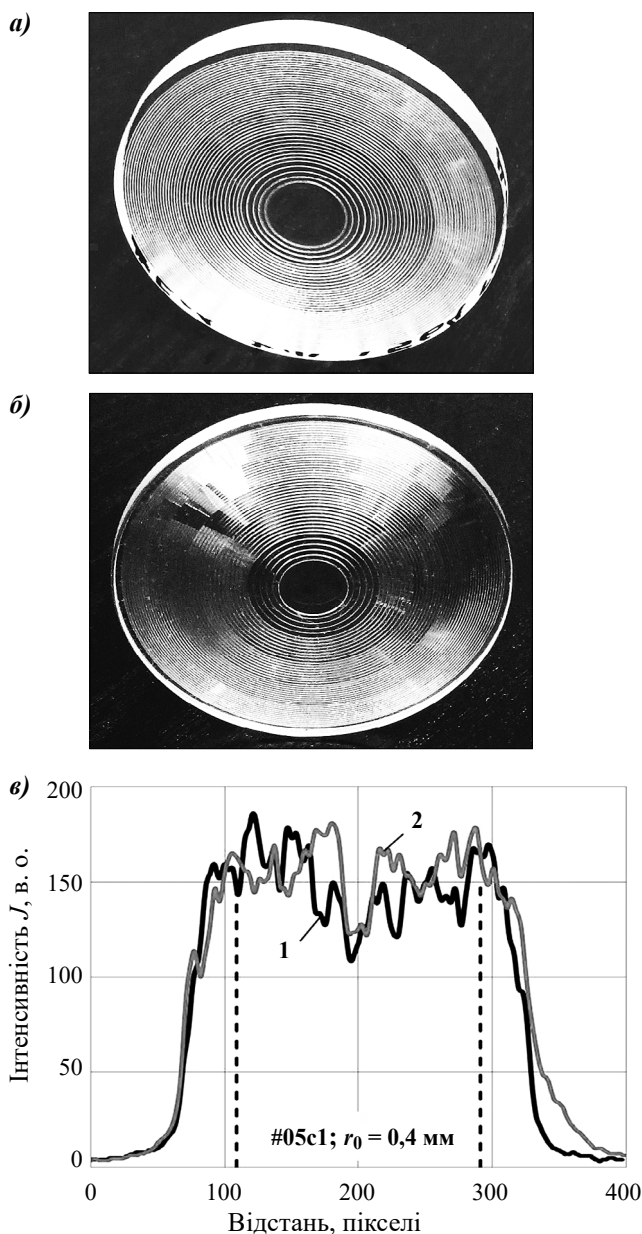
Р и с . 12. Профілі світлового зображення в фокусі для лінзи #05c1 для різних відстаней спостереження L : а) $L = 40$ мм; б) 41 мм, в) 42 мм

також має спеціальну конфігурацію для формування заданого діаметра лінзи D_L з уступом глибиною h_0 , який необхідний в застосованій технології термопресування.

Загальний вигляд створеної матриці #05c1m ілюструє рис. 13-а. З використанням цієї матриці методом термопресування було виготовлено декілька тестових зразків плоско-фокусуючих лінз #m00-05c1 з оптичного полікарбонату товщиною $\delta = 2,0$ мм. Зображення на екрані трансформованого лазерного променя діаметром $D_S = 60$ мм для однієї з таких лінз наведено на рис. 13-б.



Р и с . 13. Виготовлена металева матриця #05c1m (а) і світлове зображення в фокусі для лінзи #m02-05c1 (б) зі світловим діаметром $D_L = 50$ мм і фокусною відстанню $f = 41$ мм



Р и с . 14. Світлові зображення в фокусі та їх профілі для лінзи #05c1: а) лінза #05c1; б) лінза #m02-05c1; в) профілограми фокальних зображень для обох лінз

Профілі зображень в фокусі для лінзи #05c1, виготовленої індивідуально методом алмазного мікроточіння заготовки з оптичного полікарбонату товщиною $\delta = 6,0$ мм (рис. 14-а), і для лінзи #m02-05c1, виготовленої з полікарбонату товщиною $\delta = 2,0$ мм з використанням металевої матриці методом термопресування (рис. 14-б) для відстані спостереження $L = 41$ мм, наведені на рис. 14-в (1 – індивідуально виготовлена лінза; 2 – лінза, виготовлена за допомогою матриці). Профілі зображень для цих лінз майже ідентичні, розподіл освітлення близький до гомогенного і повністю відповідає розрахунковим характеристикам.

Таким чином, масове виробництво визначеної кількості плоско-фокусних лінз високої якості з використанням металевої матриці повністю можливе. Такі лінзи є оптимальними як для систем автоматичного керування, так і для сонячних фотоелектричних модулів, коли необхідно забезпечити гомогенне освітлення зображень в фокусі лінзи для досягнення оптимальних робочих характеристик пристроїв.

ВИСНОВКИ

Запропоновано конструкції, розраховано геометричні параметри та методом алмазного лезового мікроточіння виготовлено експериментальні зразки спеціалізованих лінзових концентраторів світла з оптичного полікарбонату для систем автоматичного керування рухомими об'єктами та для сонячної енергетики.

За допомогою колімованого лазерного випромінювання досліджено світлотехнічні характеристики експериментальних зразків фокусуючих елементів з номінальною фокусною відстанню $f_0 = 25\text{--}41$ мм, результати яких показали відповідність експериментальних даних розрахунковим характеристикам.

Встановлено оптимальні параметри лінз, придатних для масового тиражування методом термопресування, як для систем автоматичного керування, так і для сонячних фотоелектричних модулів. Розроблено конструкцію матриці та методом алмазного мікроточіння виготовлено металеві матриці, з використанням яких можливе масове виробництво визначеної кількості плоско-фокусних лінз високої якості, які забезпечують гомогенний розподіл освітлення зображення у фокусі лінзи для досягнення оптимальних робочих характеристик пристроїв.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Моделирование та дослідження параметрів концентраторів світлових променів / Петров В.В., Антонов Є.Є., Зенін В.М., Манько Д.Ю., Шанойло С.М. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2020. Т. 22. № 3. С. 3—13. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.3.218803>.
2. Двохелементні мікропризмкові лінзи / Петров В.В., Антонов Є.Є., Манько Д.Ю., Шанойло С.М. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2020. Т. 22. № 4. С. 3—11. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.4.225885>.
3. Петров В.В., Антонов Є.Є., Шанойло С.М. Алгоритм моделювання мікропризмкових лінз для трансформації світлових потоків. Електронне моделювання. 2021. Т. 43. № 2. С. 3—18. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.02.003>.

4. Antonov, E.E., Fu, M.L., Petrov, V.V., Manko, D.Yu. & Rong, K.H. (2021). Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*. Vol. 29. No. 24. Pp. 38958—38970. <https://doi.org/10.1364/OE.438590>.
5. Fu, M.L., Antonov, E.E., Manko, D.Yu., Petrov, V.V. & Rong, K.Z. (2021). Microprismatic Fresnel Lens for Formation of Uniform Light Circle. *IEEE Photonics J*. Vol. 13. No. 3. Pp. 1—8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3072538>.
6. Antonov, E.E., Lapchuk, A.S., Petrov, V.V., Tokalin, O.A. & Zenin, V.N. (2022). Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. Vol. 25. No. 3. Pp. 315—322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
7. Antonov, E.E., Kondratenko, S.V., Lysenko, V.S., Petrov, V.V. & Zenin, V.N. (2023). Microprismatic plane-focusing Fresnel lenses for light concentration in solar photovoltaic modules. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. Vol. 26. No. 2. Pp. 221—232. <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.221>.
8. Brinksmeier, E., Glabe, R. & Schonemann, L. (2012). Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. Vol. 36. Pp. 650—657. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>.
9. Le, Z.C., Antonov, E.E., Mao, Q., Petrov, V.V., Wang, Y.H., Wang, W., Shevkolenko, M.V. & Dong, W. (2022). Anti-fatigue glasses based on microprisms for preventing eyestrain. *Sensors*. Vol. 22. No. 5. Pp. 1933. <https://doi.org/10.3390/s22051933>.
10. Sultanova, N., Kasarova, S. & Nikolov, I. (2009). Dispersion properties of optical polymers. *Acta Physica Polonica A*. Vol. 116. Pp. 585—587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
11. Image J Program. Available at: <https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>.
12. Born, M. & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181>.
13. Особливості формування гомогенізованих зображень плоско-фокусуючими лінзами Френеля / Петров В.В., Антонов Є.Є., Зенін В.М., Манько Д.Ю., Шанойло С.М. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2023. Т. 25. № 1. С. 3—21. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2023.25.1.286993>.

REFERENCES

1. Petrov, V.V., Antonov, E.E., Zenin, V.N., Manko, D.Yu. & Shanoilo, S.M. (2020). “Modeliuvannia ta doslidzhennia parametriv kontsentratoriv svitlovykh promeniv” [Simulation and Investigation of Parameters for Light Beam Concentrators], *Data Recording, Storage & Processing*. Vol. 22. No. 3. Pp. 3—13. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.3.218803>.
2. Petrov, V.V., Antonov, E.E., Manko, D.Yu. & Shanoilo, S.M. (2020). “Dvokhelementni mikropryzmovi linzy” [Two-Elements Microprismatic Lenses], *Data Recording, Storage & Processing*. Vol. 22. No. 4. Pp. 3—11. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.4.225885>.

3. Petrov, V.V., Antonov, E.E. & Shanoilo, S.M. (2021). "Algoritmy modelirovaniya mikroprizmovykh linz dlya transformatsii svetlovykh potokiv" [Algorithm for Simulation of Microprismatic Lenses for Light Beams Transformation]. *Electronic Simulation*. Vol. 43. No. 2. Pp. 3—18. <https://doi.org/10.15407/emodel.43.02.003>.
4. Antonov, E.E., Fu, M.L., Petrov, V.V., Manko, D.Yu. & Rong, K.H. (2021). Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*. Vol. 29. No. 24. Pp. 38958—38970. <https://doi.org/10.1364/OE.438590>.
5. Fu, M.L., Antonov, E.E., Manko, D.Yu., Petrov, V.V. & Rong, K.Z. (2021). Microprismatic Fresnel Lens for Formation of Uniform Light Circle. *IEEE Photonics J.* Vol. 13. No. 3. Pp. 1—8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3072538>.
6. Antonov, E.E., Lapchuk, A.S., Petrov, V.V., Tokalin, O.A. & Zenin, V.N. (2022). Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. Vol. 25. No. 3. Pp. 315—322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
7. Antonov, E.E., Kondratenko, S.V., Lysenko, V.S., Petrov, V.V. & Zenin, V.N. (2023). Microprismatic plane-focusing Fresnel lenses for light concentration in solar photovoltaic modules. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. Vol. 26. No. 2. Pp. 221—232. <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.221>.
8. Brinksmeier, E., Glabe, R. & Schonemann, L. (2012). Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. Vol. 36. Pp. 650—657. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>.
9. Le, Z.C., Antonov, E.E., Mao, Q., Petrov, V.V., Wang, Y.H., Wang, W., Shevkolenko, M.V. & Dong, W. (2022). Anti-fatigue glasses based on microprisms for preventing eyestrain. *Sensors*. Vol. 22. No. 5. P. 1933. <https://doi.org/10.3390/s22051933>.
10. Sultanova, N., Kasarova, S. & Nikolov, I. (2009). Dispersion properties of optical polymers. *Acta Physica Polonica A*. Vol. 116. Pp. 585—587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
11. Image J Program. Available at: <https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>.
12. Born, M. & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181>.
13. Petrov, V.V., Antonov, E.E., Zenin, V.N., Manko, D.Yu. & Shanoilo, S.M. (2023). "Osoblyvosti formuvannya homogenizovanykh zobrazen plosko-fokusuiuchymy linzamy" [Particularities of Homogenized Images Formation by Plane-Focusing Fresnel Lenses]. *Data Recording, Storage & Processing*. Vol. 25. No 1. Pp. 3—21. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2023.25.1.286993>.

**Petrov V.V., Antonov E.E., Zenin V.N.,
Kryuchyn A.A., Shanoilo S.M.**

MICROPRISM PLANE-FOCUSING FRESNEL OPTICS FOR SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL FOR MOVING OBJECTS

An algorithm for simulating Fresnel microprism plane-focusing lenses has been developed, which form a homogeneous image of transmitted light rays in the lens focal plane. Such transforming lenses make it possible to form an optimal signal in systems of automatic control of moving objects with four-plane photodetectors, and are also promising for usage in solar photovoltaic modules.

Test samples of such specified focusing microprism devices with illumination distribution of the light spot in the form of circle and ring were made by the method of diamond microcutting technique according to our simulation results. A feature of focusing structures created by the diamond cutting technique is a discrete change in the refractive angles of microprismatic zones, resulting in the discreteness of the images formed in the focus. This is a main difference from Fresnel focusing optics with aspherical convex circular surfaces, when the angles of refraction change continuously. In the manufacture of such new devices by the diamond cutting method it is possible to obtain almost mirror working surfaces of a high optical quality. However, the size of such conical refracting zones should not be too large to reduce the discreteness of the formed images, so the new specified focusing microprisms are made from several totally identical prismatic elements.

Some samples of specialized transforming microprism structures were experimentally investigated with the collimated «green» laser beam. These lenses were made based on our simulation results and form in the focus the uniform illumination of a light spot in the form of a light circle and a circle with a ring.

The appropriate technology of diamond microcutting was created and metal matrices for mass replication of flat focusing optics from optical plastic materials were produced. Samples of specialized transforming microprism structures, which were manufactured by the method of thermo-pressing using created metal matrices, were studied.

Keywords: *microprismatic Fresnel structure, plane-focusing optics, lenses parameters simulation, diamond microcutting.*

Відомості про авторів:**Петров Вячеслав Васильович**

академік НАН України
доктор технічних наук, професор
директор Інституту проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Антонов Євген Євгенович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Інституту проблем реєстрації інформації Національної
академії наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Зенін Володимир Миколайович

науковий співробітник
Інституту проблем реєстрації інформації Національної
академії наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Крючин Андрій Андрійович

член-кореспондент НАН України
доктор технічних наук, професор
заступник директора Інституту проблем реєстрації ін-
формації Національної академії наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-5063-4146>
e-mail: kryuchyn@gmail.com

Шанойло Семен Михайлович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
вчений секретар Інституту проблем реєстрації інформа-
ції Національної академії наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0009-0002-5559-8521>
e-mail: shans1946@gmail.com

Information about the authors:**Viacheslav Petrov**

Academician of NAS of Ukraine
Doctor of Engineering Sciences, Professor
Director of the Institute for Information Recording
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Eugene Antonov

Doctor of Engineering Sciences
Senior Researcher
Leading Scientific Researcher
of the Institute for Information Recording
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Volodymyr Zenin

Scientific Researcher
of the Institute for Information Recording
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Andriy Kryuchyn

Member-Correspondent of NAS of Ukraine
Doctor of Engineering Sciences, Professor
Deputy Director of the Institute for Information Recording
of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-5063-4146>
e-mail: kryuchyn@gmail.com

Shanoilo Semen

Candidate of Engineering Sciences
Senior Researcher
Scientific Secretary of the Institute for Information
Recording of the National Academy of Sciences of
Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0009-0002-5559-8521>
e-mail: shans1946@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 08.02.2024.