

DOI: 10.35681/1560-9189.2025.27.3.354565

УДК 617.751

Є. Є. Антонов, В. М. Зенін, Д. Ю. Манько

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

Розрахунок параметрів і комп'ютерне моделювання трансформуючих лінз для кремнієвих фотоперетворювачів

Розроблено алгоритм розрахунків параметрів плоско-фокусувальної оптики, призначеної для використання в концентраторних модулях фотоелектричних систем сонячної енергетики. Оптику спеціально адаптовано для модулів на основі кристалічного кремнію з певними розмірами одиначної фоточутливої комірки. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. Методом алмазного лезового мікроточіння на основі розрахунків сформовано тестові зразки «сонячних» лінз, а також виготовлено штамп-матриці для тиражування лінз. Модернізовано методи комп'ютерного моделювання геометричних параметрів лінз, а також відтворення ходу заломлених променів. Результати моделювання дозволили оптимізувати параметри трансформуючої оптики та створити плоско-фокусувальні лінзи, найбільш придатні для використання в сонячних модулях. Методом лазерної діагностики досліджено тестові зразки створених лінз. Результати досліджень підтвердили відповідність отриманих параметрів реально виготовлених лінз розрахунковим даним і результатам комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: геометричні параметри лінз, кільцеві фокусуєчі структури, комп'ютерне моделювання параметрів, мікропризмові лінзи.

Вступ

В Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України розроблено алгоритм моделювання і виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів серії плоско-фокусувальних кільцевих лінз Френеля для систем автоматичного керування рухомими об'єктами, в яких використовуються 4-площинні фотодетектори [1], та для систем сонячної енергетики [2] з концентраторними електрогенеруючими модулями. В подальшому планується використовувати для створення прототипу сонячного модуля фотоперетворювачі на основі кристалічного кремнію, для яких одиначна комірка має розміри $5,0 \times 5,0$ мм². Відповідні дослідження потребують створення спеціалізованого джерела освітлення [3], тому було розраховано ряд плоско-фокусувальних лінз, які можна використовувати саме в таких дослідженнях.

© Є. Є. Антонов, В. М. Зенін, Д. Ю. Манько

Методика розрахунку геометричних параметрів лінз Френеля

Методику розрахунку параметрів плоско-фокусувальної оптики детально викладено в декількох попередніх наших публікаціях, зокрема в роботі [4]. Перш за все, визначається схема освітлення у фокусі лінзи, тобто задається розподіл освітленості — у формі світлового кола або кола з яскравим кільцем на периферії. Визначається схема оптимізації фокусування випромінювання (ОФ) [4] для формування гомогенного зображення у фокусі. В центрі фокального зображення моделюється не освітлена «темна» область радіусом r_j ($j = 0, 1, \dots, N$), яка створюється для усунення небажаного центрального максимуму інтенсивності. Вважається [4], що зазначена «темна» область для реально виготовлених лінз заповнюється світлом, розсіяним на дефектах мікрорельєфу лінзи. Показники заломлення матеріалів лінз використовувалися з роботи [5].

Для можливості застосування при виготовленні мікропризмової оптики методу алмазного мікроточіння [6, 7] можна створювати призмові зони лінзи ΔR_k з декількох окремих складових мікропризм шириною ΔR_{kc} , ідентичних за глибиною рельєфу h_k та кутом α_k , тобто $\Delta R_k = \sum \Delta R_{kc}$. Величина ΔR_{kc} не може перевищувати значення 1,2–1,5 мм [4, 8], яке відповідає розмірам ріжучої кромки наявного алмазного інструменту, застосованого для формування мікрорельєфу.

Для алмазних різців з кутом різання α_p розроблено методику розрахунків значень критичних радіусів рельєфу лінзи R_{kc} залежно від кутів мікрорельєфу α_k та глибин мікрорельєфу h_k , за яких відбувається торкання тильного ребра різця до кромки поверхні рельєфу [8] при формуванні кільцевих мікропризм. Отримано робочі формули для розрахунку критичних значень R_{kc} і кутів α_k , за якими можна провести корекцію значень кутів різця α_p , або провести відповідну доробку параметрів формуємої лінзи для усунення пошкоджень мікрорельєфу.

За наведеним алгоритмом виготовлено ряд тестових лінз з полікарбонату та відповідних металевих штамп-матриць [4] для тиражування лінз. Для експериментального дослідження виготовлених зразків плоско-фокусувальних лінз модернізовано спеціальний стенд [4], який дозволяє отримувати на матовому напівпрозорому екрані зображення паралельного пучка світла від лазера, пройденого через досліджувану лінзу. Пучок створюється 3-лінзовою конденсорною системою лінз, довжина хвилі «зеленого» лазера $\lambda = 0,532$ мкм, діаметр колімованого світлового потоку в площині екрана $D_S = 59$ мм.

Дослідження оптичних характеристик лінз для сонячних модулів

Розроблені та виготовлені індивідуально методом алмазного мікроточіння перші зразки «сонячних» лінз #25с, #27.2 і #28 для систем сонячної енергетики [2] було експериментально досліджено на модернізованому стенді [4] за допомогою колімованого «зеленого» лазерного променя. На рис. 1 наведено профілограми сфокусованого зображення для лінзи #25с з радіусом світлової плями $r_V = 1,5$ мм, радіусом темної області $r_j = 0,5$ мм, світловим діаметром $D_L = 50$ мм і схемою оптимізації фокусування випромінювання ОФ = 0,5(14)–0,8(2)–1,1(2), яка означає, що перші 14 зон лінзи # 1-14 спрямовують випромінювання в світлове кільце шириною $r_V - r_j = 1,5 - 0,5 = 1,0$ мм; наступні зони # 15-16 — в кільце $r_V - r_j = 1,5 - 0,8 = 0,7$ мм; а

дві останні периферійні зони # 17-18 — в кільце шириною $r_V - r_j = 1,5 - 1,1 = 0,4$ мм. Для визначення профілів інтенсивностей на екрані стенду використовувалася програма Jimage J 1.53 [9].

Лінза створює майже рівномірний розподіл освітленості у фокусі, що повністтю усуває можливі омічні втрати у фотоперетворювачі [3, 4]. Розрахункове значення діаметра світлової плями $d_V = 3,0$ мм показано на рис. 1 пунктирними лініями.

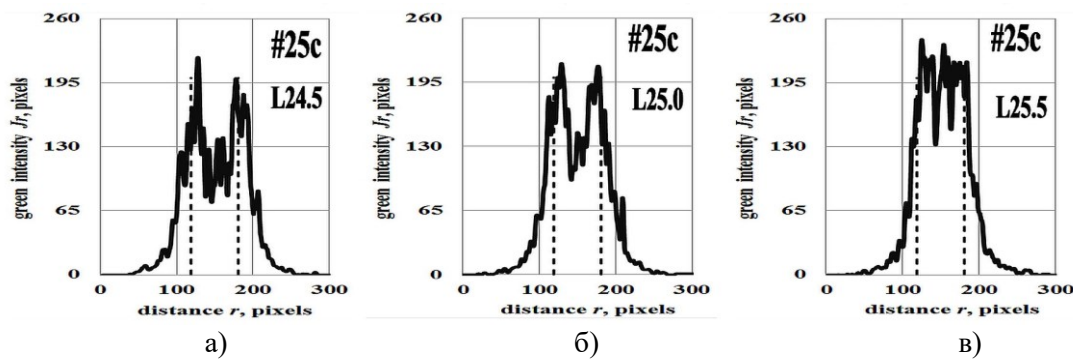


Рис. 1. Профілограми плями для лінзи #25с:
а) відстань спостереження $L = 24,5$ мм; б) $L = 25,0$ мм; в) $L = 25,5$ мм

Для лінз #25с, #27.2 і #28, створених для сонячних концентраторних модулів з фокусом $f_0 = 25$ мм, форма отриманих профілів освітлення у фокусі помітно змінюється навіть при невеликих змінах відстані спостереження L_0 . Отже, мала глибина фокусування для «сонячних» лінз з такою фокусною відстанню $f_0 = 25$ мм може бути проблемою під час встановлення та фокусування масиву окремих лінз на одній платформі під час створення єдиного сонячного модуля. З цієї причини практичніше створювати «сонячні» лінзи з більшою фокусною відстанню $f_0 = 40-50$ мм. Для таких значень f_0 глибина фокусування значно збільшується [4], що спрощує процес налаштування масиву лінз (100–500 шт.) під час створення промислових модулів сонячних концентраторів.

З цієї причини було розроблено лінзи #30 і #31 з радіусом гомогенного зображення $r_V = 1,5$ мм і фокусною відстанню $f_0 = 40$ мм. Радіус темної області було задано $r_j = 0,3$ мм для усунення провалу освітленості в центрі зображення, який зафіксований для перших зразків сонячних лінз (рис. 1). Методом алмазного мікроточіння [6, 7] було сформовано лінзи-оригінали #30-orig і #31-orig, а також штамп-матрицю #31m, із використанням якої методом термопресування було виготовлено серію лінз #31m-#(2–9). Кут зворотного нахилу мікропризм було встановлено $\theta = 3$ град. з метою полегшення роз'єднання кінцевих пластикових виробів від металевої матриці під час процесу термопресування [4].

Розподіл інтенсивності на екрані, що отриманий за допомогою лазерного променя для виготовленої лінзи #31m-#04, показано на рис. 2, профілограми цих зображень наведено на рис. 3 для відстаней спостереження $L_0 = 39, 40$ та 41 мм.

Отримані профілі фокальних зображень для лінзи #31-#04 демонструють значно більш гомогенний розподіл освітленості, але аналогічно до лінз #25с, #27, #28 помітно розширені порівняно з розрахованими даними (пунктирна лінія), Можли-

вою причиною є значний внесок у формування профілів процесу розсіювання світла на дефектах мікрорельєфу [4], оскільки радіус $r_V = 1,5$ мм є досить малим порівняно з кутовими розмірами зони можливого розсіювання. Для зменшення відносного внеску розсіювання в процес формування профілю зображення, було розраховано параметри лінз #32 і #32с1, які формують фокальне зображення зі збільшеним радіусом світлової плями $r_V = 2,5$ мм.

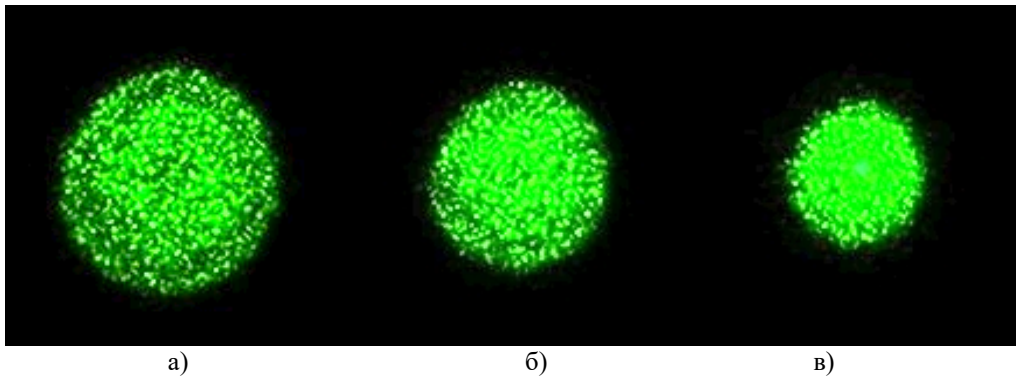


Рис. 2. Зображення у фокусі для лінзи #31м-#04 ($f_0 = 40$ мм, $r_V = 1,5$ мм):
а) відстань спостереження $L_0 = 39$ мм; б) $L_0 = 40$ мм; в) $L_0 = 41$ мм

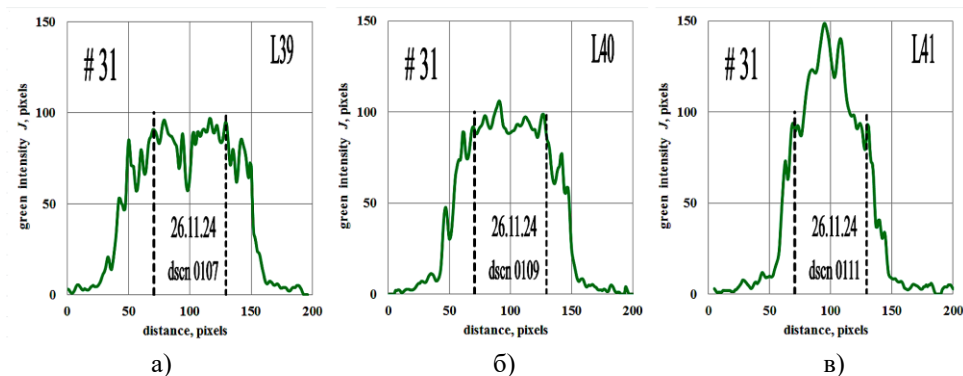


Рис. 3. Профілі зображень у фокусі для лінзи #31-#04 ($f_0 = 40$ мм, $r_V = 1,5$ мм):
а) відстань спостереження $L_0 = 39$ мм; б) $L_0 = 40$ мм; в) $L_0 = 41$ мм

Іншою причиною необхідності збільшення розміру фокального зображення є те, що для подальших експериментальних досліджень планується використовувати сонячні елементи з комбінованими дифузійно-польовими бар'єрами на основі монокристалічного кремнію [10, 11], розроблені в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України. Ці елементи були оптимізовані для роботи в режимі концентрації сонячної енергії [12, 13] і мають розміри окремих елементів $5,0 \times 5,0$ мм², які аналогічні розмірам фотоелементів, використаним авторами [14, 15].

При використанні кремнієвих фотоперетворювачів оптимальне значення концентрації сонячного світла становить $k_C \approx 50-60$ [10-13]. Однак лінзи #25с, #27, #28 та #31 забезпечують достатньо високий ступінь концентрації світла $k_C \approx 280$. У той же час запропоновані лінзи #32 і #32с1 зі збільшеним радіусом $r_V = 2,5$ мм забезпечують ступінь концентрації $k_C \approx 100$ для світлового діаметра

лінзи $D_L = 50$ мм. Після діафрагмування цих лінз до квадратної форми з максимально можливим розміром 35×35 мм², ступінь концентрації світла зменшиться саме до значення $k_C \approx 60$. Діафрагмування лінзи необхідне для зменшення втрат падаючого світлового потоку під час створення масиву лінз в єдиному концентраторному сонячному модулі.

Фокусну відстань лінз #32 і #32с1, як і в перших зразках «сонячних» лінз #25с, #27, #28, було обрано $f_0 = 25$ мм для можливості безпосереднього порівняння фокусуємих можливостей усіх цих лінз. Розрахунки параметрів найбільш оптимальної лінзи #32с1 було виконано на основі схеми оптимізації $ОФ = 0,2(4)–0,5(2)–0,9(2)–1,2(2)–1,6(2)–2,0(3)$, тобто перші чотири зони # 1-4 лінзи спрямовують випромінювання в світлове кільце шириною $r_V - r_j = 2,5 - 0,2 = 2,3$ мм; наступні зони # 5-6 — у кільце $r_V - r_j = 2,5 - 0,5 = 2,0$ мм; зони # 7-8 — у кільце світла шириною $r_V - r_j = 2,5 - 0,9 = 1,6$ мм; зони # 9-10 — у світлове кільце $r_V - r_j = 2,5 - 1,2 = 1,3$ мм; дві наступні зони # 11-12 — у кільце $r_V - r_j = 2,5 - 1,6 = 0,9$ мм; і три останні периферійні зони # 13-15 — у кільце шириною $r_V - r_j = 2,5 - 2,0 = 0,5$ мм.

Методом алмазного мікроточіння [6, 7] на основі розрахункових параметрів лінзи було сформовано лінзу-оригінал #32с1-orig з полікарбонату та штамп-матрицю цієї лінзи #32с1m зі спеціального алюмінієвого сплаву W-95 зі зворотним кутом нахилу мікропризм $\theta = 3,0$ град. Із використанням цієї матриці серія лінз #32с1m-#(01-12) була виготовлена методом термопресування. Зображення штамп-матриці #32с1m та лінзи #32с1m-#05, яка виготовлена з використанням цієї штамп-матриці #32с1m, показані на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд штамп-матриці #32с1m (а)
і лінзи #32с1m-#05 (б) з фокусом $f_0 = 25$ мм і радіусом $r_V = 2,5$ мм

Розподіл інтенсивності лазерного променя на екрані для лінзи #32с1m-#05 круглої форми показаний на рис. 5. Профілограми цих зображень проілюстровано на рис. 6 для відстаней спостереження $L_0 = 24, 25$ та 26 мм. Ширина зареєстрованих профілів практично збігається з їхніми розрахунковими значеннями. Розподіл освітленості практично гомогенний, однак спостерігаються певні дефекти щодо симетрії фокальних зображень.

Унаслідок використання оптимальної схеми фокусування, розподіл освітленості для лінзи #32-с1m-#05 виявився більш гомогенним порівняно з раніш ство-

реними «сонячними» лінзами #25с, #27, #28. Однак глибина різкості фокусування для лінз з фокусною відстанню $f_0 = 25$ мм є досить малою, тому більш практично створювати «сонячні» лінзи з більшою фокусною відстанню $f_0 = 40\text{--}50$ мм. Для таких значень f_0 глибина фокусування помітно збільшується [4], що помітно спрощує процес встановлення і юстирування великого масиву лінз (100–500) при створенні промислових сонячних концентраторних модулів.

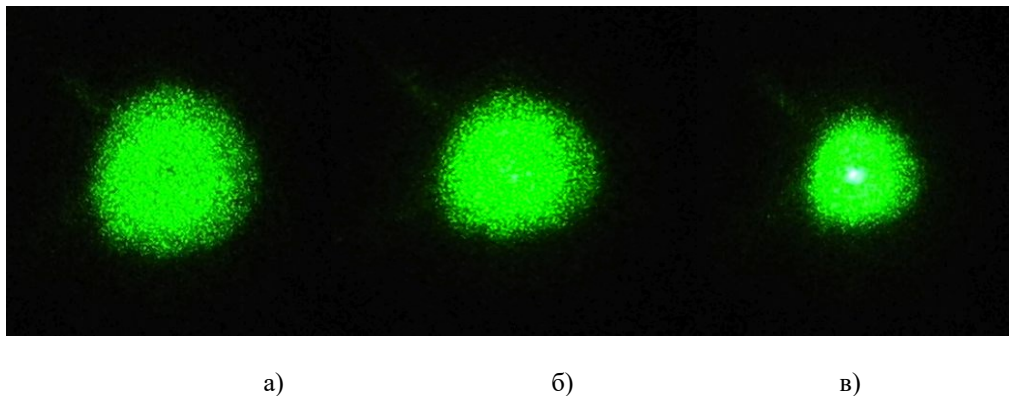


Рис. 5. Зображення у фокусі для лінзи #32c1m-#05:
а) відстань спостереження $L_0 = 24$ мм; б) $L_0 = 25$ мм; в) $L_0 = 26$ мм

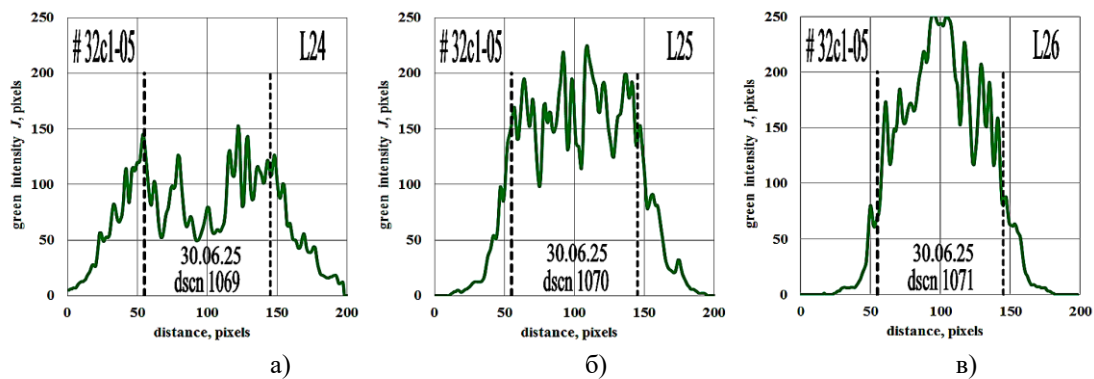


Рис. 6. Профілограми зображень у фокусі для лінзи #32c1m-#05:
а) відстань спостереження $L_0 = 24$ мм; б) $L_0 = 25$ мм; в) $L_0 = 26$ мм

Комп'ютерне моделювання оптичних характеристик плоско-фокусувальних лінз

Для дослідження і оптимізації оптичних параметрів розрахованих лінз було застосовано методи комп'ютерного моделювання. Використовувалася програма Solidworks 2020 [16], за допомогою якої за результатами розрахунків геометричних параметрів лінзи на першому етапі створювалася комп'ютерна модель лінзи (рис. 7,а). На наступному етапі модель лінзи завантажувалася в програму TracePro 7.3 [17] для подальшого моделювання ходу променів у наближенні геометричної оптики методом Монте-Карло. Джерелом світла був паралельний пучок променів, які рівномірно розподілені в напрямку, перпендикулярному до площини лінзи. Екран являє собою циліндр необхідного розміру, найчастіше діаметром $d_E = 50$ мм,

розташований на певних відстанях спостереження L_0 від поверхні рельєфу лінзи (рис. 7,б).

Схема проходження променів через лінзовий концентратор #27 для різних відстаней спостереження $L_0 = 15, 24, 25, 26$ і 50 мм з інтерфейсу програми TracePro 7.3 також наведена на рис. 7,б: червоним кольором позначені падаючий і заломлений промені з інтенсивністю 66–100 % від падаючого, зеленим і синім кольором — заломлений і відбитий світлові промені з інтенсивністю 33–66 % та 0–33 %, відповідно.

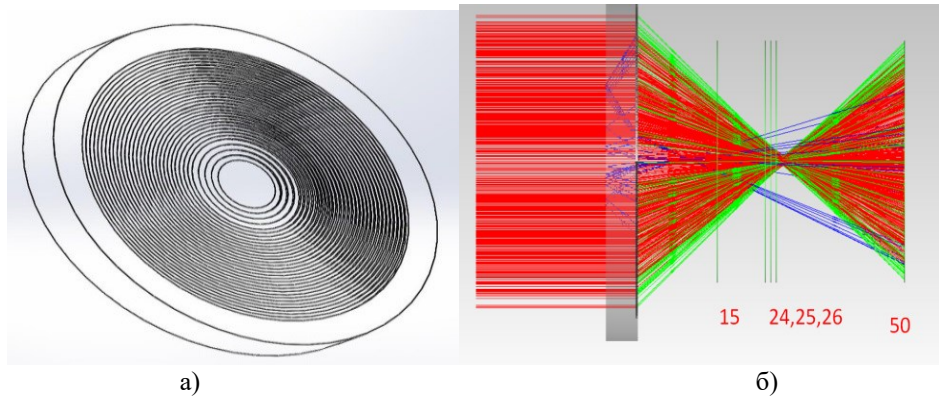


Рис. 7. Комп'ютерна модель лінзи #27 (а) та схема ходу променів через розроблену модель лінзи (б)

Змодельовані профілі пройденого заломленого потоку світла для «сонячної» лінзи #30 з фокусом $f_0 = 40$ мм, радіусом темної області $r_j = 0,5$ мм і радіусом гомогенізованої світлової плями $r_V = 1,5$ для номінальної відстані спостереження $L_0 = 40$ мм ілюструються рис. 8,а. Для порівняння на рис. 8,б наведена розрахункова схема оптимізації фокусування випромінювання для цієї лінзи, а експериментально отриманий розподіл освітленості у фокусі — на рис. 8,в. Вочевидь, комп'ютерне моделювання підтверджує ідентичність розрахункового профілю світлового потоку реальним характеристикам, що свідчить про високу точність розрахунку параметрів лінзи та повну відповідність результатів розрахунків поставленим завданням, а також підтверджує точність методу комп'ютерного моделювання. Експериментальний профіль (рис. 8,в), звичайно, значно розширений порівняно з розрахунковим і змодельованим профілями, що пов'язано з розсіюванням світла на дефектах мікрорельєфу [4].

За результатами проведеного для лінзи #30 комп'ютерного моделювання було проведено корекцію схеми оптимізації фокусування ОФ, застосованої для цієї лінзи, з метою усунення в центрі зображення області з «провалом» інтенсивності (рис. 8).

Результати зазначеного комп'ютерного моделювання виявилися додатковою причиною для розробки лінзи #31 з таким саме фокусом $f_0 = 40$ мм, але з радіусом «темної» області $r_j = 0,3$ мм (замість радіуса $r_j = 0,5$ мм у лінзі #30), а також для створення більш оптимальної лінзи #32с1 з фокусом $f_0 = 25$ мм і радіусом $r_j = 0,2$ мм.

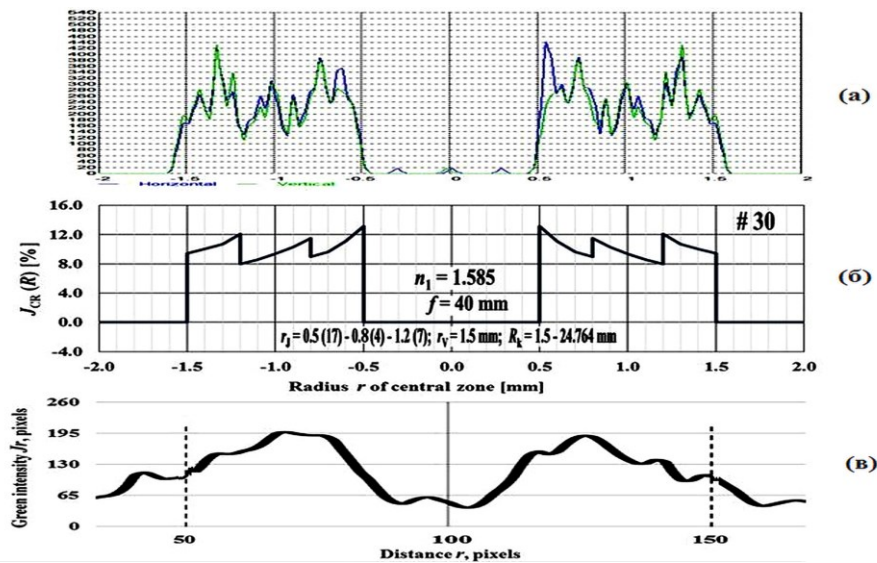


Рис. 8. Змодельований профіль пройденого світлового потоку (а); схема оптимізації фокусування (б); експериментально отриманий профіль (в) для лінзи #30

Для виявлення причин додаткового розширення профілю фокального зображення для лінзи #32с1-#4, яке спостерігається експериментально при лазерному скануванні пройдених променів, було виконано комп'ютерне моделювання ходу променів із використанням розрахованих параметрів лінзи #32с1. У процесі моделювання для периферійних зон # 11-15 цієї лінзи було встановлено появу додаткових максимумів інтенсивності пройдених потоків в області зображення $r_j < 2,0$ мм, які формуються призмовими зонами з радіусами $R_k < 21,5$ мм. Такі промені є повністю неочікуваними, тому що розрахований хід променів передбачав концентрацію всіх променів, заломлених від зон # 11-15, в область зображення $r_j > 1,6-2,0$ мм. Вищенаведене ілюструє рис. 9, на якому наведено розподіл освітленості у фокусі, що формується саме останніми призмовими зонами # 13-15 лінзи #32с1 товщиною $Y = 6,0$ мм.

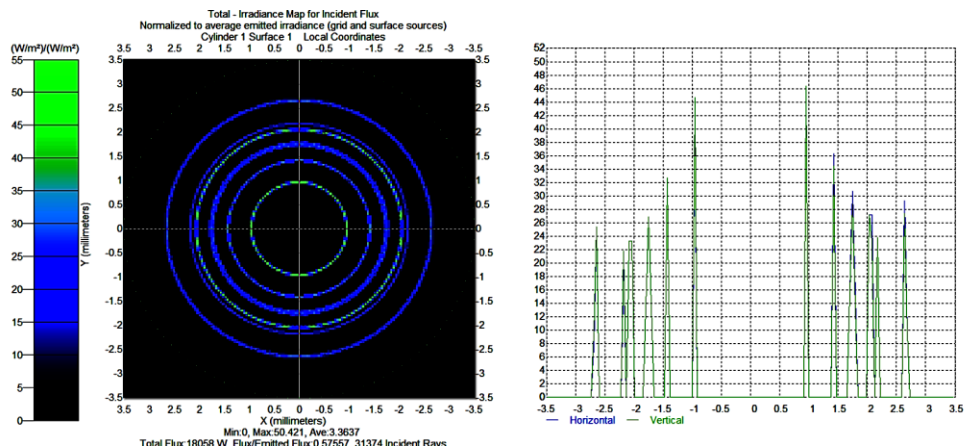


Рис. 9. Змодельований профіль пройденого світлового потоку для групи зон # 13-15 лінзи #32с1 з радіусами $R_k = 23,3-24,8$ мм

Аналогічне явище моделюється і для групи зон # 11-12 цієї лінзи (рис. 10). Променів у фокусі лінзи в області з радіусами $r_j < 1,6$ мм та $r_j > 2,5$ мм не повинно бути згідно з розрахунками, оскільки задано концентрування всіх заломлених променів в світлове кільце з радіусами $r_j = 1,6-2,5$ мм.

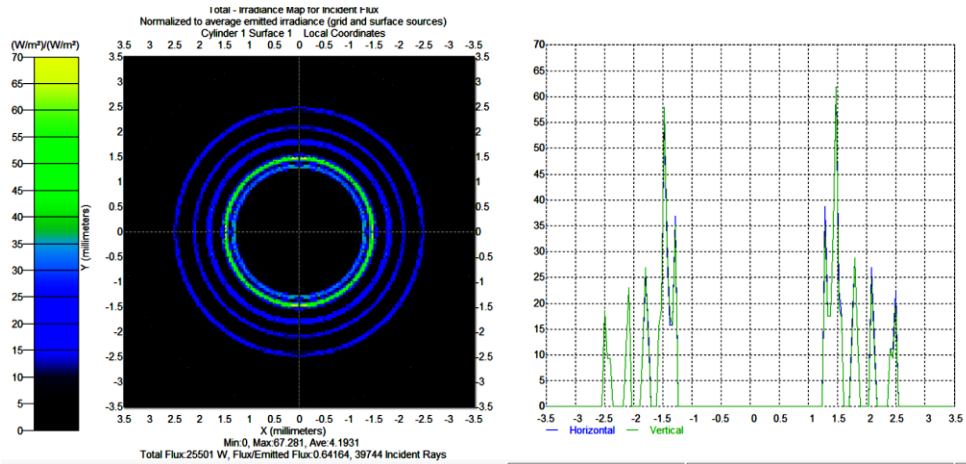


Рис. 10. Змодельований профіль пройденого світлового потоку для групи зон # 11-12 лінзи #32c1 з радіусами $R_k = 21,5-23,3$ мм.

У той же час, групи зон # 9-10 лінзи #32c1 з радіусами $R_k = 18,9-21,5$ мм виявляють профілі випромінювання в фокальній площині, повністю аналогічні розрахунковим даним (рис. 11): лінза спрямовує промені в світлове кільце з радіусами $r_j = 1,2-2,5$ мм. Наступні зони, які розташовані ще ближче до центру лінзи #32c1 з радіусами $R_k < 18,9$ мм, також формують профілі, повністю аналогічні розрахунковим.

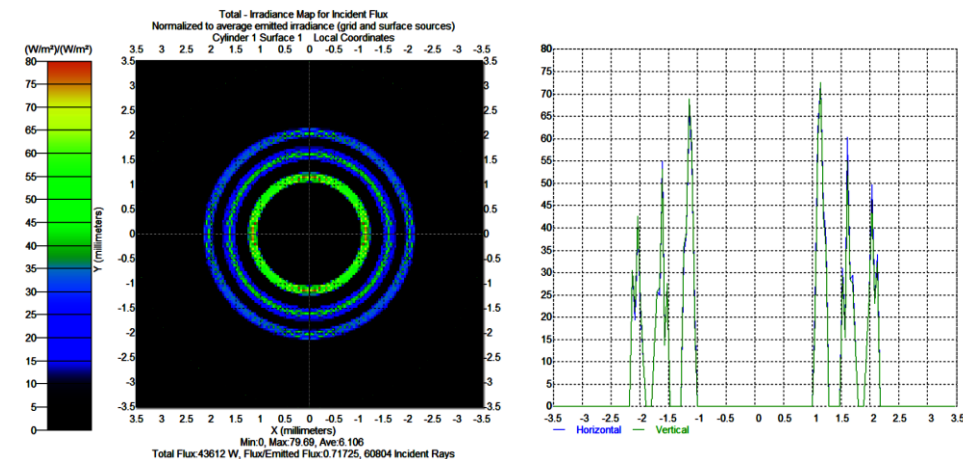


Рис. 11. Змодельований профіль пройденого світлового потоку для групи зон # 9-10 лінзи #32c1 з радіусами $R_k = 18,9-21,5$ мм

Ефект появи максимумів, на перший погляд, здається повністю незрозумілим, але причина прояснюється з даних щодо моделювання схеми пройдених потоків

(рис. 12). На цій схемі показані промені «зеленого» кольору, тобто промені з досить високою інтенсивністю 33–66 % від падаючих, які заломлюються всередину лінзи і після наступних багаторазових відбиттів від всіх поверхонь лінзи формують додаткові максимуми інтенсивності у фокальній площині. Дійсно, призмкові зони лінзи #32с1 з радіусами $R_k = 23,3\text{--}24,8$ мм мають кути заломлення $\alpha_k = 38,211\text{--}38,437$ град., які практично дорівнюють критичному куту $\alpha_{k\max} = 39,118$ град. для випадку розміщення полікарбонату в повітрі [5]. Тому відбиття променів від мікрорельєфу всередину лінзи відбувається під кутом $\varphi_k = 90 - \alpha_k$ з досить великим коефіцієнтом відбиття k_S , і процес їхнього концентрування після виходу з лінзи і формує додаткові максимуми.

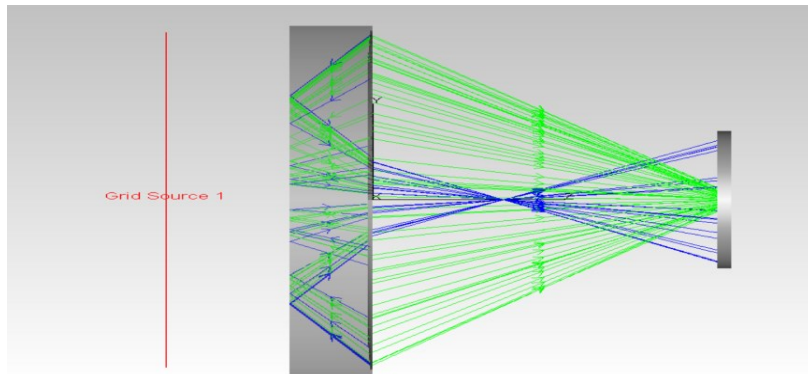


Рис. 12 .Змодельований хід заломлених променів для групи зон # 13-15 лінзи #32с1 з радіусами $R_k = 23,3\text{--}24,8$ мм

Отже, причина виникнення додаткових максимумів інтенсивності для лінзи #32с1 полягає в малій фокусній відстані лінзи $f_0 = 25$ мм при досить великому оптичному діаметрі $D_L = 50$ мм, унаслідок чого відбуваються численні відбиття променів всередині лінзи з досить великими коефіцієнтами відбиття $k_S \sim 0,33\text{--}0,66$. У результаті такого процесу у фокальній площині лінзи формуються додаткові максимуми інтенсивності.

Для усунення зазначеного ефекту було розраховано лінзу #33 з таким самим радіусом зображення $r_V = 2,5$ мм, радіусом «темної» області $r_j = 0,2$ мм, світловим діаметром $D_L = 50$ мм і кількістю призмових зон # 1-15, але з фокусною відстанню $f_0 = 40$ мм. Головною відмінною лінзи #33 від лінзи #32с1 є істотне зменшення величин кутів заломлення, які для останніх периферійних зон # 13-15 не перевищують значення $\alpha_k = 34,385$ град. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #33 наведено на рис. 13.

Схема оптимізації фокусування для цієї лінзи $ОФ = 0,2(4)\text{--}0,5(2)\text{--}0,9(2)\text{--}1,2(2)\text{--}1,6(2)\text{--}2,0(3)$, що використана при розрахунках, наведена на рис. 14,а. Модельований профіль пройдених світлових потоків ілюструє рис. 14,б, який повністю ідентичний розрахунковим даним.

Спостерігається зменшення освітленості периферійних зон зображення в зоні радіусів $r_j \sim 2,5$ мм (рис. 14,б) порівняно з розрахунками (рис. 14,а), що пов'язано зі звуженням світлових потоків лінзою. Для компенсації такого звуження при розрахунках параметрів лінз [4] зазвичай проводиться відповідна корекція ширини ΔR_k

і глибини Δh_k призматичних зон лінзи. Однак таку корекцію необхідно проводити лише для зон, які складається з однієї мікропризми. За наявності рефракційних зон, створених зі складових мікропризм ΔR_{kc} , корекція ширини зони ΔR_k не потрібна, тому що заломлений складовий світловий потік від кожної зони в цьому випадку розподіляється рівномірно по всій ширині відповідного фокального зображення. В нашому випадку, всі зони лінзи #33 складаються з 2–4 окремих призматичних зон (рис. 13), тому корекція ширини та глибини складових мікропризм не проводилася. Зрозуміло, що при цьому в межах кожного складового потоку ΔR_{kc} відбувається його звуження, що і виявило проведенне комп'ютерне моделювання.

Simulation of Fresnel lens rV = 2,5 mm with $r_f = 0.2$ (4 zones) - 0.5 (2 zones) - 0.9 (2 zones) - 1.2 (2 zones) - 1.6 (2 zones) - 2.0 (3 zones) mm														# 33			
f = 40 mm, $\lambda = 0.585 \mu\text{m}$ ($n_1 = 1.585$); $\delta = 6.0$ mm, $\alpha_{k \max} = 39.118$ deg, $\tau^R(\text{Fr}1) = 0.949$; $\tau^R(\text{Fr}2) = 0.901$.														$\tau_k^V = 1 / (1 + \text{tg} \alpha_k \text{tg} \theta)$			
$\Delta R'_k = W_j \text{tg} \alpha_k \text{tg} \gamma_k / (1 - \text{tg} \alpha_k \text{tg} \gamma_k)$				$\Delta R^0_k = \Delta R_k \cos \theta + (h_k - h_{k-1}) \sin \theta$				$h_k = W_j \text{tg} \alpha_k \{1 + \text{tg} \alpha_k \text{tg} \gamma_k / (1 - \text{tg} \alpha_k \text{tg} \gamma_k)\}$									
Lens with reverse angle $\theta = 0$ deg.																	
n	n		range	R_k cp.	$R_k = R_0 + \Delta R_k$	$\gamma_k = \text{tg}^{-1}(R_k/f)$	$\sin \gamma_k$	$\cos \gamma_k$	$\alpha_k = \text{tg}^{-1}(\sin \gamma_k / (1.585 - \cos \gamma_k))$	$\Delta R_k = h_k / \text{tg} \alpha_k$	$\Delta L_k = \Delta R_k / \cos \alpha_k$	$\beta = 90 - \alpha$	h_k				
step	zone	r_f	R_0 , mm	mm	mm	rad.	deg.	rad.	deg.	deg.	pitch (mm)	slope (mm)			μm		
			2,500 - 0,000		0,000000	0,000000	0,00	0,0000	1,0000								
	1	0,20	4,800000	4,800 - 2,500	2,50	2,500000	0,057437	3,29	0,0574	0,9984	0,097542	5,588753	0,000	2,30000	2,31	90,000	0,000
	2	0,20	7,100000	7,100 - 4,800	4,80	4,800000	0,114497	6,56	0,1142	0,9935	0,190783	10,931088	5,589	1,15000	1,17	84,411	225,061
	3	0,20	9,400000	9,400 - 7,100	7,10	7,100000	0,170819	9,79	0,1700	0,9854	0,276276	15,829433	10,931	0,57500	0,80	79,069	222,102
	4	0,20			7,10	7,866667	0,170819	9,79	0,1700	0,9854	0,276276	15,829433	15,829	0,57500	0,80	74,171	217,370
	5	0,20			7,10	8,633333	0,170819	9,79	0,1700	0,9854	0,276276	15,829433	15,829	0,57500	0,80	74,171	217,370
	6	0,20	11,700000	11,700 - 9,400	9,40	9,400000	0,226068	12,95	0,2241	0,9746	0,351904	20,162603	15,829	0,57500	0,61	74,171	217,370
	7	0,20			9,40	9,975000	0,226068	12,95	0,2241	0,9746	0,351904	20,162603	20,163	0,57500	0,61	69,837	211,133
	8	0,20			9,40	10,550000	0,226068	12,95	0,2241	0,9746	0,351904	20,162603	20,163	0,57500	0,61	69,837	211,133
	9	0,20			9,40	11,125000	0,226068	12,95	0,2241	0,9746	0,351904	20,162603	20,163	0,57500	0,61	69,837	211,133
	10	0,50	13,700000	13,700 - 11,700	11,70	11,700000	0,273009	15,64	0,2696	0,9630	0,409017	23,434974	20,163	0,50000	0,54	69,837	211,133
	11	0,50			11,70	12,200000	0,273009	15,64	0,2696	0,9630	0,409017	23,434974	23,435	0,50000	0,54	66,565	216,732
	12	0,50			11,70	12,700000	0,273009	15,64	0,2696	0,9630	0,409017	23,434974	23,435	0,50000	0,54	66,565	216,732
	13	0,50			11,70	13,200000	0,273009	15,64	0,2696	0,9630	0,409017	23,434974	23,435	0,50000	0,54	66,565	216,732
	14	0,50	15,700000	15,700 - 13,700	13,70	13,700000	0,318748	18,26	0,3134	0,9496	0,458208	26,253408	23,435	0,50000	0,56	66,565	216,732
	15	0,50			13,70	14,200000	0,318748	18,26	0,3134	0,9496	0,458208	26,253408	26,253	0,50000	0,56	63,747	246,510
	16	0,50			13,70	14,700000	0,318748	18,26	0,3134	0,9496	0,458208	26,253408	26,253	0,50000	0,56	63,747	246,510
	17	0,50			13,70	15,200000	0,318748	18,26	0,3134	0,9496	0,458208	26,253408	26,253	0,50000	0,56	63,747	246,510
	18	0,90	17,300000	17,300 - 15,700	15,70	15,700000	0,354380	20,30	0,3470	0,9379	0,492203	28,201131	26,253	0,53333	0,61	63,747	246,510
	19	0,90			15,70	16,233333	0,354380	20,30	0,3470	0,9379	0,492203	28,201131	28,201	0,53333	0,61	61,799	285,984
	20	0,90			15,70	16,766667	0,354380	20,30	0,3470	0,9379	0,492203	28,201131	28,201	0,53333	0,61	61,799	285,984
	21	0,90	18,900000	18,900 - 17,300	17,30	17,300000	0,389097	22,29	0,3794	0,9253	0,521832	29,898780	28,201	0,53333	0,62	61,799	285,984
	22	0,90			17,30	17,833333	0,389097	22,29	0,3794	0,9253	0,521832	29,898780	29,899	0,53333	0,62	60,101	306,665
	23	0,90			17,30	18,366667	0,389097	22,29	0,3794	0,9253	0,521832	29,898780	29,899	0,53333	0,62	60,101	306,665
	24	1,20	20,200000	20,200 - 18,900	18,90	18,900000	0,416599	23,87	0,4047	0,9145	0,542976	31,110255	29,899	0,43333	0,51	60,101	306,665
	25	1,20			18,90	19,333333	0,416599	23,87	0,4047	0,9145	0,542976	31,110255	31,110	0,43333	0,51	58,890	261,509
	26	1,20			18,90	19,766667	0,416599	23,87	0,4047	0,9145	0,542976	31,110255	31,110	0,43333	0,51	58,890	261,509
	27	1,20	21,500000	21,500 - 20,200	20,20	20,200000	0,443448	25,41	0,4291	0,9033	0,561737	32,185148	31,110	0,43333	0,51	58,890	261,509
	28	1,20			20,20	20,633333	0,443448	25,41	0,4291	0,9033	0,561737	32,185148	32,185	0,43333	0,51	57,815	272,728
	29	1,20			20,20	21,066667	0,443448	25,41	0,4291	0,9033	0,561737	32,185148	32,185	0,43333	0,51	57,815	272,728
	30	1,60	22,400000	22,400 - 21,500	21,50	21,500000	0,461646	26,45	0,4454	0,8953	0,573445	32,855968	32,185	0,45000	0,54	57,815	272,728
	31	1,60			21,50	21,950000	0,461646	26,45	0,4454	0,8953	0,573445	32,855968	32,856	0,45000	0,54	57,144	290,628
	32	1,60	23,300000	23,300 - 22,400	22,40	22,400000	0,479519	27,47	0,4614	0,8872	0,584187	33,471448	32,856	0,45000	0,54	57,144	290,628
	33	1,60			22,40	22,850000	0,479519	27,47	0,4614	0,8872	0,584187	33,471448	33,471	0,45000	0,54	56,529	297,526
	34	2,00	23,800000	23,800 - 23,300	23,30	23,300000	0,489308	28,04	0,4700	0,8827	0,589763	33,790907	33,471	0,25000	0,30	56,529	297,526
	35	2,00			23,30	23,550000	0,489308	28,04	0,4700	0,8827	0,589763	33,790907	33,791	0,25000	0,30	56,209	167,303
	36	2,00	24,300000	24,300 - 23,800	23,80	23,800000	0,498996	28,59	0,4785	0,8781	0,595072	34,095130	33,791	0,25000	0,30	56,209	167,303
	37	2,00			23,80	24,050000	0,498996	28,59	0,4785	0,8781	0,595072	34,095130	34,095	0,25000	0,30	55,905	169,232
	38	2,00	24,800000	24,800 - 24,300	24,30	24,300000	0,508583	29,14	0,4869	0,8734	0,600127	34,384740	34,095	0,25000	0,30	55,905	169,232
	39	2,00			24,30	24,550000	0,508583	29,14	0,4869	0,8734	0,600127	34,384740	34,385	0,25000	0,30	55,615	171,081
	40	2,00			24,30	24,800000	0,518069	29,68	0,4952	0,8688	0,604937	34,660342	34,385	0,24744	0,30	55,615	171,081

Рис. 13. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #33

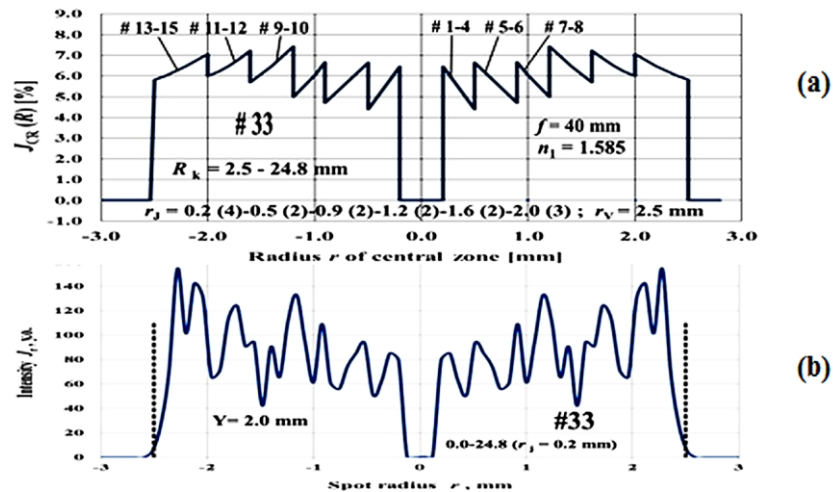


Рис. 14. Схема оптимізації фокусування (а) і змодельований профіль пройденого світлового потоку (б) для лінзи #33 ($f_0 = 40 \text{ мм}$; радіус $r_v = 2,5 \text{ мм}$; світловий діаметр $D_L = 50 \text{ мм}$)

Таким чином, наступною задачею є практичне виготовлення лінзи-оригіналу #33 і штамп-матриці #33m для тиражування масиву лінз. Сподіваємося, що для реально виготовленої лінзи, для якої виникає розширення фокального зображення внаслідок розсіювання світла на наявних дефектах мікрорельєфу, експериментально отриманий розподіл освітленості при всіх радіусах зображення r_j стане більш гомогенним порівняно з модельованим і розрахунковим профілями.

Параметри діафрагмованих плоско-фокусувальних лінз

Розглянуті лінзи #31 і #32-с1 повністю задовольняють вимогам гомогенного освітлення поверхні фотоперетворювача. При цьому для використання в сонячному модулі масиву лінз, кожену лінзу діаметром $D_L = 50 \text{ мм}$ необхідно діафрагмувати до квадратної форми з максимально можливим розміром $35 \times 35 \text{ мм}^2$. У цьому випадку можливо компактне розміщення масиву таких лінз в єдиному модулі без втрат світлового потоку. На рис. 15 наведено зображення такої діафрагмованої лінзи #32с1m-#04 до квадрату розміром $35 \times 35 \text{ мм}^2$.

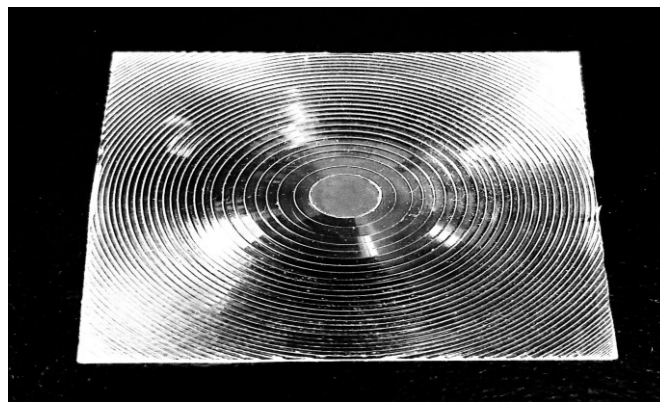


Рис. 15. Загальний вигляд лінзи #32с1m-#05 квадратної форми розміром $35 \times 35 \text{ мм}^2$ з фокусом $f_0 = 25 \text{ мм}$ і радіусом $r_v = 2,5 \text{ мм}$

Модель діагностичного сонячного модуля, створеного з 4-х квадратних лінз, зображено на рис. 16. Кожна із застосованих лінз виготовлена шляхом термопресування заготовок з оптичного полікарбонату товщиною $\delta = 2,0$ мм із використанням штамп-матриці зі сплаву W-95, яка сформована методом алмазного мікроточіння згідно визначеного алгоритму переміщення різця [8] на модернізованому верстаті типу 6P82.



Рис. 16. Блок із чотирьох лінз #32c1-#(07-10) для модуля сонячного фотоперетворювача на основі кремнію: $f_0 = 25$ мм, $r_V = 2,5$ мм, розмір кожної лінзи 35×35 мм²

Для зменшення втрат світла при освітленні поверхні фотоперетворювача, яка має форму квадрату, фокальну гомогенну світлову пляму доцільно трансформувати також до квадратної форми. Такий випадок можна реалізувати шляхом зменшення відстані спостереження L_0 для певної лінзи відносно номінального значення $L_0 = f_0$. Дійсно, для лінзи, діафрагмованої до квадрату, форма плями, звичайно, також є квадратною і її розмір наближається до розміру квадратної лінзи при мінімальних відстанях спостереження L_0 . В точці фокусу для $L_0 = f_0$ фокальна пляма набуває номінальної круглої форми з практично розрахунковим розміром плями $L_S = 2 r_V$. Зменшуючи відстань спостереження L_0 відносно значення $L_0 = f_0$ можливо отримати різні розміри та форми світлової плями, які наближаються до квадратної.

Результати експериментального дослідження оптичних характеристик одичної «сонячної» лінзи #32c1-#05 ($D_L = 50$ мм, $f = 25$ мм, $r_V = 2,5$ мм), а також аналогічної лінзи #31m-#06 ($D_L = 50$ мм, $f = 40$ мм, $r_V = 1,5$ мм), діафрагмованих до квадратної форми розміром 35×35 мм², наведено на рис. 17. Лінзи отримані методом термопресування із використанням відповідних металевих штамп-матриць #32c1m і #31m.

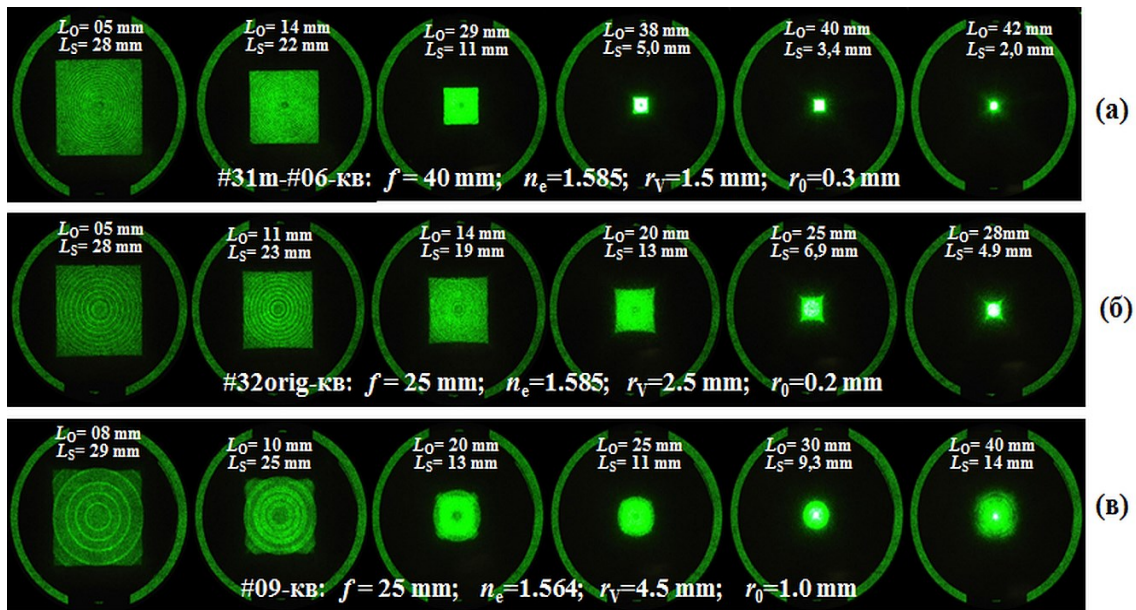


Рис. 17. Зображення на екрані для лінз #31m-#06кв (а), #32с1m-#05кв (б), #9кв (в), діафрагмованих до розміру $35 \times 35 \text{ мм}^2$, залежно від відстані спостереження L_0

Отримані дані свідчать, що шляхом варіювання відстанню спостереження L_0 можна отримати майже гомогенні зображення квадратної форми від розмірів L_S , які практично дорівнюють розмірам самої лінзи $35 \times 35 \text{ мм}^2$, до номінальних розмірів $L_S = 3,0 \text{ мм}$ (лінза #31m-#06) або $L_S = 5,0 \text{ мм}$ (лінза #32с1m-#05). Гомогенне освітлення поверхні в формі квадрату з необхідним для стандартної кремнієвої комірки розміром $L_S = 5,0 \text{ мм}$, наприклад, лінза #31m-#06 створює при відстані спостереження $L_0 \approx 39 \text{ мм}$, а лінза #32с1m-#06 — при відстані $L_0 \approx 27 \text{ мм}$.

Для іншої лінзи #09кв з фокусом $f = 25 \text{ мм}$, яку створено для систем автоматичного керування рухомими об'єктами [1], номінальний радіус фокальної світлової плями $r_V = 4,5 \text{ мм}$. Лінзу було діафрагмовано до максимально можливого розміру $35 \times 35 \text{ мм}^2$, аналогічно до лінзи #31m-#06кв. Тенденція формування квадратної фокальної плями при зменшенні відстані L_0 аналогічна до попередньої і ілюструється на рис. 17,в. Однак за допомогою такої лінзи неможливо створити площу освітлення квадратної форми розміром $5,0 \times 5,0 \text{ мм}^2$. Мінімальна зона освітлення діаметром $L_S = 9,3 \text{ мм}$ реалізується при відстані спостереження $L_0 = 30 \text{ мм}$, але пляма має круглу форму, і при освітленні квадратної поверхні розміром $5,0 \times 5,0 \text{ мм}^2$ виникають значні втрати потоку світла. При номінальній відстані $L_0 = 25 \text{ мм}$ фокальна світлова пляма нагадує квадратну, але розмір її становить $L_S = 11,3 \text{ мм}$, що неприйнятне для кремнієвих фотоперетворювачів з одиничною фотоперетворюючою коміркою розмірами $5,0 \times 5,0 \text{ мм}^2$.

Висновки

Розроблено методику розрахунків параметрів плоско-фокусувальних лінз для сонячних модулів, в яких використовуються фотоелектричні перетворювачі на основі кристалічного кремнію. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. Методом алмазного лезового мікроточіння на основі розра-

хункових параметрів сформовано тестові зразки «сонячних» лінз, а також виготовлено відповідні штамп-матриці для тиражування лінз методом термопресування.

Модернізовано методи комп'ютерного моделювання ходу заломлених променів через створені лінзи, для моделювання фокального зображення лінз було застосовано відповідні розрахункові дані. Отримані результати моделювання дозволили оптимізувати параметри трансформуючої оптики та створити плоско-фокусувальні лінзи, що придатні для використання в сонячних модулях.

Методом лазерної діагностики досліджено тестові зразки створених лінз. Результати досліджень підтвердили відповідність отриманих параметрів реально виготовлених лінз розрахунковим даним і результатам комп'ютерного моделювання.

1. Antonov E.E., Fu M.L., Petrov V.V., Manko D.Yu., Rong K.H. Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*. 2021. Vol. 29, No. 24. P. 3895–38970. <https://doi.org/10.1364/OE.438590>.

2. Antonov E.E., Lapchuk A.S., Petrov V.V., Tokalin O.A., Zenin V.N. Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2022. Vol. 25, No. 3. P. 315–322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.

3. Chen Y., Pu Shiliang, Hou Mingming, Li Linhan, Liu Sinan, Li Dapeng, Yi Fei. Lightweight and efficient beam-shaping metalens for converting Gaussian beams into 2D flat-top beams. *Optics Express*. 2025. Vol. 33, No. 5. P. 11555–11573, #555456. <https://doi.org/10.1364/OE.555456>.

4. Antonov E.E., Lysenko V.S., D.Yu.Manko, I.A.Martynyuk, Petrov V.V., Zenin V.N. Plane-Focusing Fresnel Lenses for Oblique Incidence of Light Rays. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2025. Vol. 27, No. 2. P. 183–193. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.02.183>.

5. Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*. 2009. Vol. 116. P. 585–587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.

6. Brinksmeier E., Glabe R., Schonemann L. Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. 2012. 36. P. 650–657; <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>.

7. Tan N.Y.J., Lim Z.H., Zhou G., Liu K., Kumal A.S. Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Opt. Express*. 2021. 29, No. 22. P. 36516–36534. <http://doi.org/10.1364/OE.436290>.

8. Zenin V.M., Антонов Є.С. Особливості розрахунку геометричних параметрів алмазного різця для формування кільцевих лінз Френеля. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2024. Т. 26, № 2. С. 73–80. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316913>.

9. Image J Program. UPL: <https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>

10. Sachenko A.V., Gorban A.P., Kostylyov V.P., Serba A.A., Sokolovskiy I.O. Comparative analysis of photoconversion efficiency in the Si solar cells under concentrated illumination for the standard and rear geometries of arrangement of contacts. *Semiconductors*. 2007. Vol. 41, No. 10. P. 214–223. <https://doi.org/10.1134/S106378260710017X>.

11. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Korkishko R.M., Vlasiuk V.M., Sokolovskiy I.O., Dvernikov B.F., Chernenko V.V., Evstigneev M.A. Simulation and characterization of planar high-efficiency back contact silicon solar cells. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2021. Vol. 24, No. 3. P. 319–327. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.319>.

12. Gorban A.P., Kostylyov V.P., Sachenko A.V., Serba A.A. The efficiency limit for diffusion silicon solar cells at concentrated illumination. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 1999. 2, No. 2. P. 45–49. <https://doi.org/10.15407/spqeo2.02.045>.

13. Korkishko R., Vlasiuk V., Kostylyov V., Chernenko V., Dvernikov B. Optimization of silicon solar cell design for use under concentrated solar irradiation. *Technology and Design in Electronic Equipment*. 2024. 1-2. P. 3–10. <https://doi.org/10.15222/kea2024.1-2.03>.

14. Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon H. Karam H. III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. 2009. **2**. P. 174–192. <https://doi.org/10.1039/b809257e>.

15. Baig H., Heasman K.C., Mallick T.K. Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. **12**. P. 5890–5909. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.020>.

16. SOLIDWORKS 2020. URL: <http://www.solidworks.com>

17. Software for design and analysis of illumination and optical systems: URL: <https://www.lambdares.com/tracepro/>

Надійшла до редакції 21.11.2025