

DOI: 10.35681/1560-9189.2020.22.4.225885

УДК 617.751

В. В. Петров, Є. Є. Антонов, Д. Ю. Манько, С. М. Шанойло

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

Двохелементні мікропризмові лінзи

Розглянуто оптичні параметри кругових мікропризмових заломлюючих пристроїв, які створені з двох ідентичних концентраторів світлових потоків із заданими граничними кутами заломлення променів. Виконано моделювання індикатрисы променів для двухелементних рефракційних елементів. Розраховано параметри зменшення світлопропускання лінійних двухелементних пристроїв, які використовуються в офтальмології для визначення кута рефракції променів.

Ключові слова: мікрорельєфна структура, двухелементний пристрій, коефіцієнт світлопропускання, рефракція променів, гомогенізація світлових потоків

Вступ

Мікропризмові лінзи Френеля сьогодні широко використовуються в прикладній оптиці для фокусування променів. У деяких випадках їхнє використання необхідне для формування у фокальній площині рівномірно освітленого кола. Для розрахунку геометричних параметрів таких концентруючих лінз можна використати методи, що розроблені авторами [1, 2] для моделювання фокусуєчих пристроїв з плоскими в перерізі конусними кільцевими рефракційними гранями. Найбільш перспективним для виготовлення таких пристроїв є метод алмазного мікрорізання [3, 4], за допомогою якого можна отримати практично дзеркальні робочі поверхні високої оптичної якості. Зокрема, таким методом було створено [2] ряд фокусуєчих мікропризмових пристроїв для застосування в системах керування рухомими об'єктами. Розглянемо можливість створення мікропризмової оптики з двох ідентичних мікрорельєфних структур, у чому є певні переваги.

Моделювання параметрів двухелементних кільцевих концентраторів потоків світла

У нашій попередній роботі [2] запропоновано алгоритм моделювання концентраторів світлових потоків, які створюються з декількох кільцевих заломлюючих зон шириною ΔR_k з відповідними кутами заломлення мікропризм α_k . Такі при-

© В. В. Петров, Є. Є. Антонов, Д. Ю. Манько, С. М. Шанойло

строї дозволяють формувати у фокальній площині F рівномірно освітлене світлове коло радіусом r_1 . Величина r_1 може бути досить великою, що визначається технічними вимогами до відповідного фокусувального пристрою. Однак, для застосування методу алмазного різання [3], який доцільно використовувати для виготовлення такої оптики, довжина робочих поверхонь мікропризм ($\Delta R_k / \cos \alpha_k$) або ширини кільцевих заломлюючих зон лінзи радіуси зон ΔR_k , перш за все, розмір першої рефракційної зони $\Delta R_1 = R_2 - R_1$, не можуть бути більшими за можливі розміри ріжучої кромки алмазного інструменту, які не перевищують $\approx 1,5$ мм. Тому необхідно формувати кожен мікропризм конусну зону $k = 1, 2, \dots, N$ концентратора з декількох кільцевих складових мікропризмових елементів, які сформовані з однаковими кутами заломлення мікропризм α_k . При цьому ширина ΔR_k складових елементів для кожної із кільцевих зон у сумі дорівнює вибраній ширині центральної зони лінзи $R_1 = r_1$, що забезпечується відповідним варіюванням глибини рельєфу h_k і кількості складових елементів концентратора N_k .

Для гомогенізації розподілу інтенсивності світла у світловому колі r_1 у фокусі лінзи необхідно створювати фокусувальну оптику таким чином, щоб пройдені заломлені промені не попадали в центральну частину з радіусом r_0 світлового кола радіусом r_1 . Темна зона в центрі фокальної площини при цьому буде освітлюватися за рахунок фокусування відбитих всередині рельєфу променів, а також за рахунок дифузного розсіювання променів на дефектах рельєфу, які завжди виникають при практичному виготовленні пристроїв. При моделюванні оптичних параметрів такої оптики необхідно відповідно змінювати ширини заломлюючих зон ΔR_k та кути рефракції мікропризмових кільцевих зон лінзи α_k , які в будь-якому випадку не повинні перевищувати граничні кути заломлення променів $\alpha_{k \max}$, за яких відбувається повне внутрішнє відбиття променів від поверхонь рельєфу.

Для зменшення кутів заломлення променів α_k у концентраторах світлових потоків можливо створювати такі фокусувальні пристрої з двох мікропризмових елементів. Перевагою цих структур перед одноелементними фокусувальними структурами в разі однакової сумарної призматичної дії пристроїв окрім того може бути менша глибина h_k мікропризмового рельєфу. При виготовленні фінішних виробів методом термопресування це забезпечує більш ефективне розділення металеві матриці-оригіналу та пластикового відбитку, що підвищує оптичну якість виробів.

Запропонований двохелементний фокусувальний пристрій складається з двох однакових плоских кільцевих концентраторів світла, які розміщені рельєфами назустріч один одному. Схема такого пристрою наведена на рис. 1, де f — фокусна відстань; n_0 та n_1 — показники заломлення середовища та матеріалу призмової структури, відповідно; R_k — радіуси плоских конусних кільцевих зон $k = 1, 2, \dots, N$; ΔR_k — ширини відповідних кільцевих зон лінзи, α_k — кути заломлення мікропризм; γ_k — кути спостереження k -зони з центральної точки фокусу F .

Кути падіння променів φ_{1k} на заломлюючі поверхні мікропризм дорівнюють кутам заломлення α_k , кути рефракції пройдених променів φ_{2k} для кожної призмової зони k визначаються за законом Снеліуса [5]. Метою розрахунків є отримання кутів $\alpha_k = \varphi_{1k}$ нахилу всіх плоских граней мікропризм, при яких для кожної зони відбувається фокусування паралельних променів пройденого світла в єдине центральне світлове кільце.

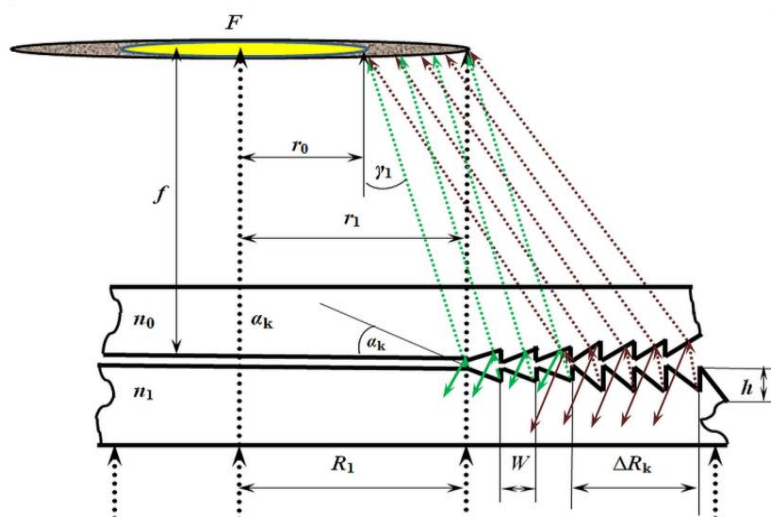


Рис. 1. Схема фокуруючого пристрою з двох однакових концентраторів світла, що обернені рельєфом один до одного

Для моделювання оптичних параметрів двохелементних мікропризмових фокуруючих структур було використано програму TracePro 7.3 [6], яка дозволяє відтворити трасування пройдених світлових потоків у наближенні геометричної оптики методом Монте-Карло. Схема моделювання пристрою для різних фокусних відстаней $f = 10\text{--}15, 20\text{--}25, 30, 35, 40, 45$ та 50 мм зображена на рис. 2.

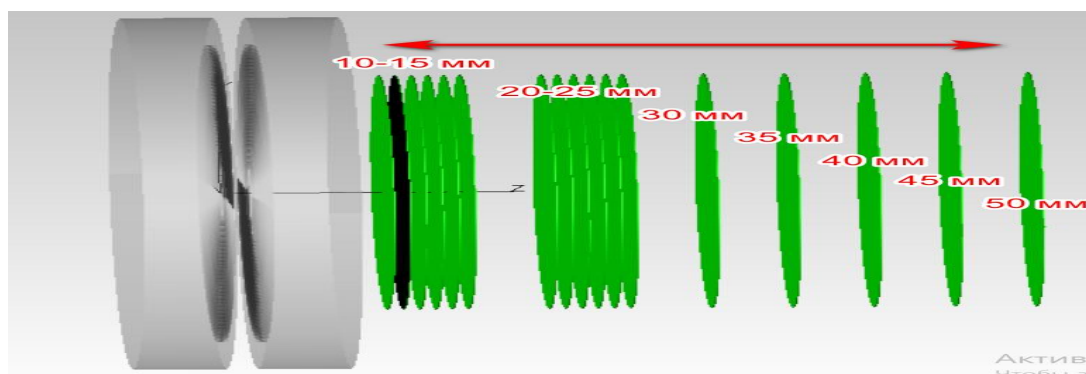


Рис. 2. Схема моделювання структури з двома концентраторами світла, що обернені рельєфом один до одного

За одинарну складову мікропризмової структури двохелементного концентратора було обрано розроблений концентратор світлових потоків, створений з 7 кільцевих зон шириною $\Delta R_k = 3,0$ мм, який розрахований для зеленої зони спектра з довжиною хвилі $\lambda = 0,532$ мкм і створює у фокальній площині рівномірно освітлене світлове коло з радіусом $r_1 = 4,5$ мм без центральної зони радіусом $r_0 = 1,5$ мм.

Джерело світла являє собою паралельний пучок променів, які рівномірно розповсюджуються в напрямку, перпендикулярному площині лінзи. Одну із промодельованих схем розповсюдження паралельних променів через двохелементний

концентратор для фокусної відстані $f = 10$ мм зображено на рис. 3. На схемах траєкторії променів червоним кольором позначені падаючі та заломлені пройдені промені, синім — відбиті та заломлені після відбиття.

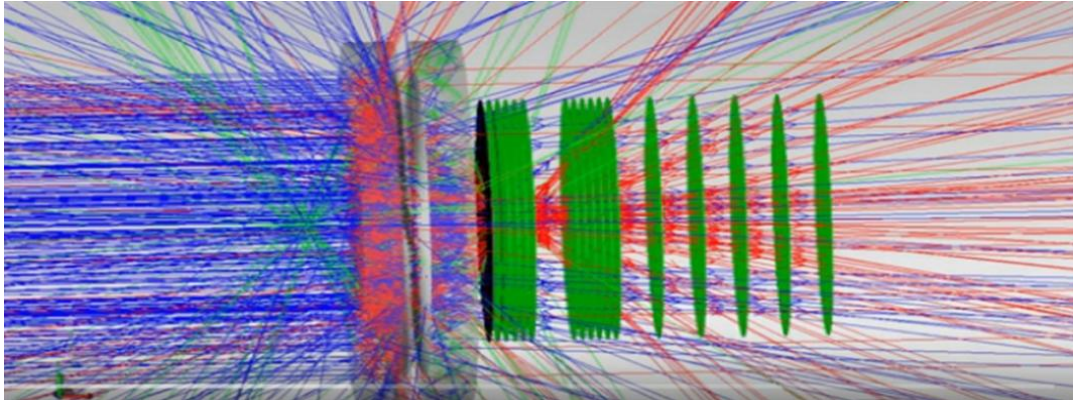


Рис. 3. Схема розповсюдження паралельних променів через двоелементний концентратор світла для $f = 10$ мм

Перш за все необхідно відзначити, що в модельованому спектрі випромінювання для двоелементного концентратора порівняно з одноелементним поряд з пройденими променями (червоні траси) з'являється набагато більше розсіяних променів (сині траси). Це пов'язано з тим, що пройдені промені після першого концентратора заломлюються на відповідні розрахункові кути α_k , внаслідок чого у фокальній площині відбувається концентрація заломлених променів з кільцевих зон лінзи відповідного діаметра $2R_k$ у світлові кола меншого розміру $2r_k$. Унаслідок цього процес заломлення променів від другої складової мікропризмової структури відбувається хаотичним чином, кути падіння та кути заломлення променів повністю не відповідають розрахунковим значенням для першої структури. Відповідно збільшується кількість відбитих променів взагалі без їхнього заломлення. Тому істотно збільшується ефективність розсіювання світла такою структурою, падає коефіцієнт світлопропускання τ_{np} , і створений двоелементний концентратор стає неефективним.

Деякі результати моделювання профілів потоків випромінювання для двоелементного концентратора, що отримані за допомогою програми TracePro 7.3 для відстаней спостереження $f = 10\text{--}30$ мм, наведено на рис. 4.

Легко помітити, що інтенсивність пройдених променів значно зменшена порівняно з раніше дослідженою одноелементною структурою [2]. На рис. 5 наведено сумарні результати моделювання структури променів, які дозволяють зробити певні висновки щодо можливості використання двоелементних фокусуєчих структур на практиці.

Очікуваний висновок полягає в тому, що для зведеного двоелементного концентратора, який складається з двох мікропризмових концентраторів певної оптичної дії, промені фокусуються на меншій фокусній відстані порівняно зі схемою з одноелементною лінзою Френеля такої ж самої дії. Так, фокусна відстань для двоелементного концентратора, що створений з двох однакових лінз фокусом $f = 20$ мм, складає приблизно $f \approx 14$ мм.

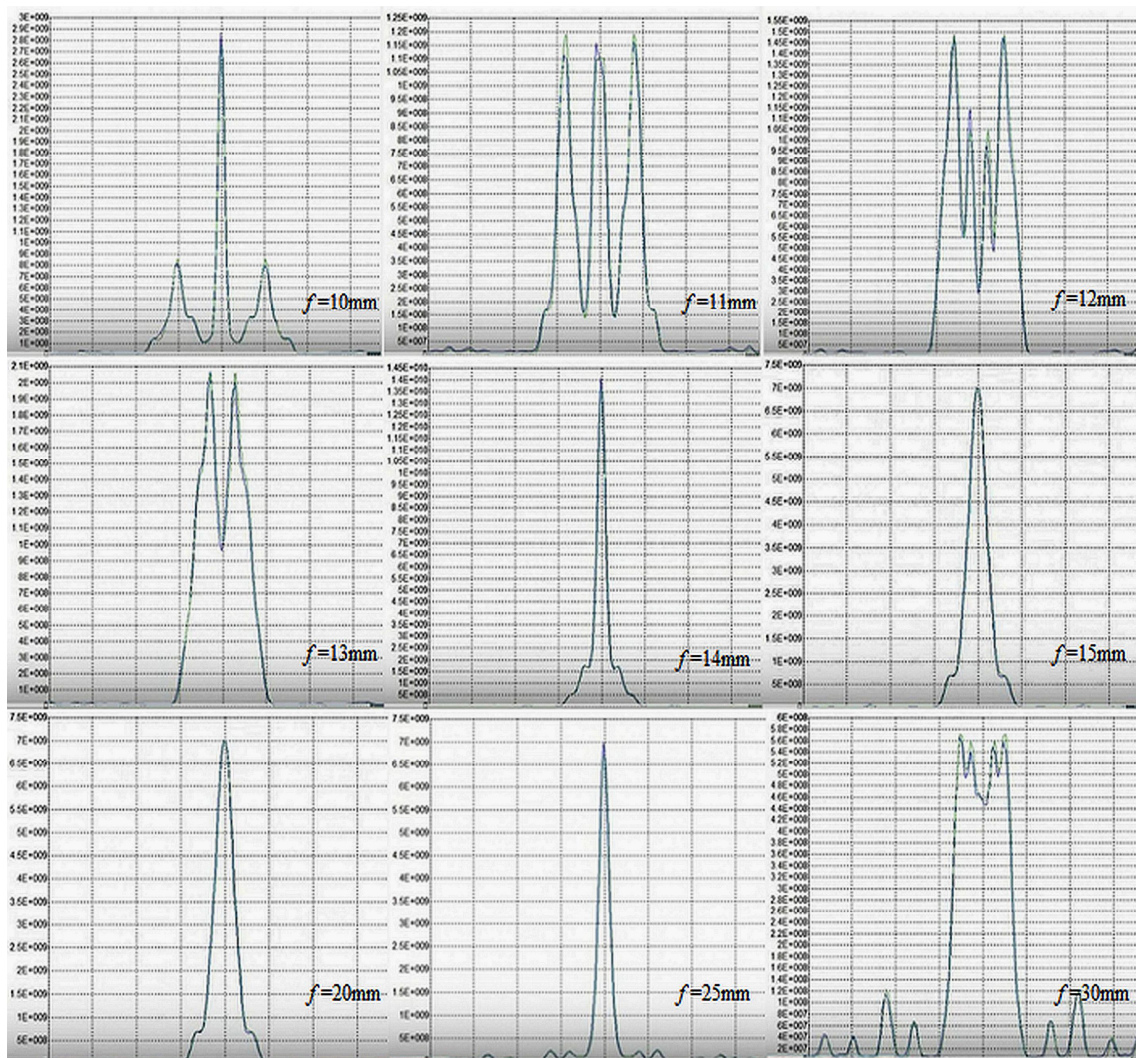


Рис. 4. Профілі променів, які пройшли через двохелементний концентратор для фокусних відстаней $f = 10\text{--}30\text{ мм}$

Однак, для зведеного концентратора спостерігається значно більша кількість розсіяного світла, що зменшує інтенсивність пройденого світла. Кількісно цей ефект легко визначити зі значень нормованих світлових потоків, які наведені на рис. 5. Світлопропускання τ_{np} для двохелементного пристрою внаслідок додаткового розсіювання променів зменшується до значень $\tau_{np} \approx 23\%$ порівняно з величиною $\tau_{np} \approx 71\%$ для одинарного концентратора, що повністю не задовольняє вимогам технічного завдання на розробку лінзового фокусуєчого мікропризмового елемента.

Таким чином, зазначені недоліки двохелементного концентратора світла, які полягають в низькому світлопропусканні τ_{np} унаслідок надлишкового розсіювання пройденого світла рефракційними гранями, повністю перевищують можливі переваги пристрою щодо спрощення процесу роз'єднання металевого штампа матриці та пластикового відбитку при здійсненні процесу термопресування кінцевих виробів. Тому двохелементні лінзові концентратори є повністю не придатни-

ми для застосування в різних керуючих пристроях для спостереження за рухомими об'єктами, і з цією метою такі концентратори не доцільно розробляти та виготовляти.

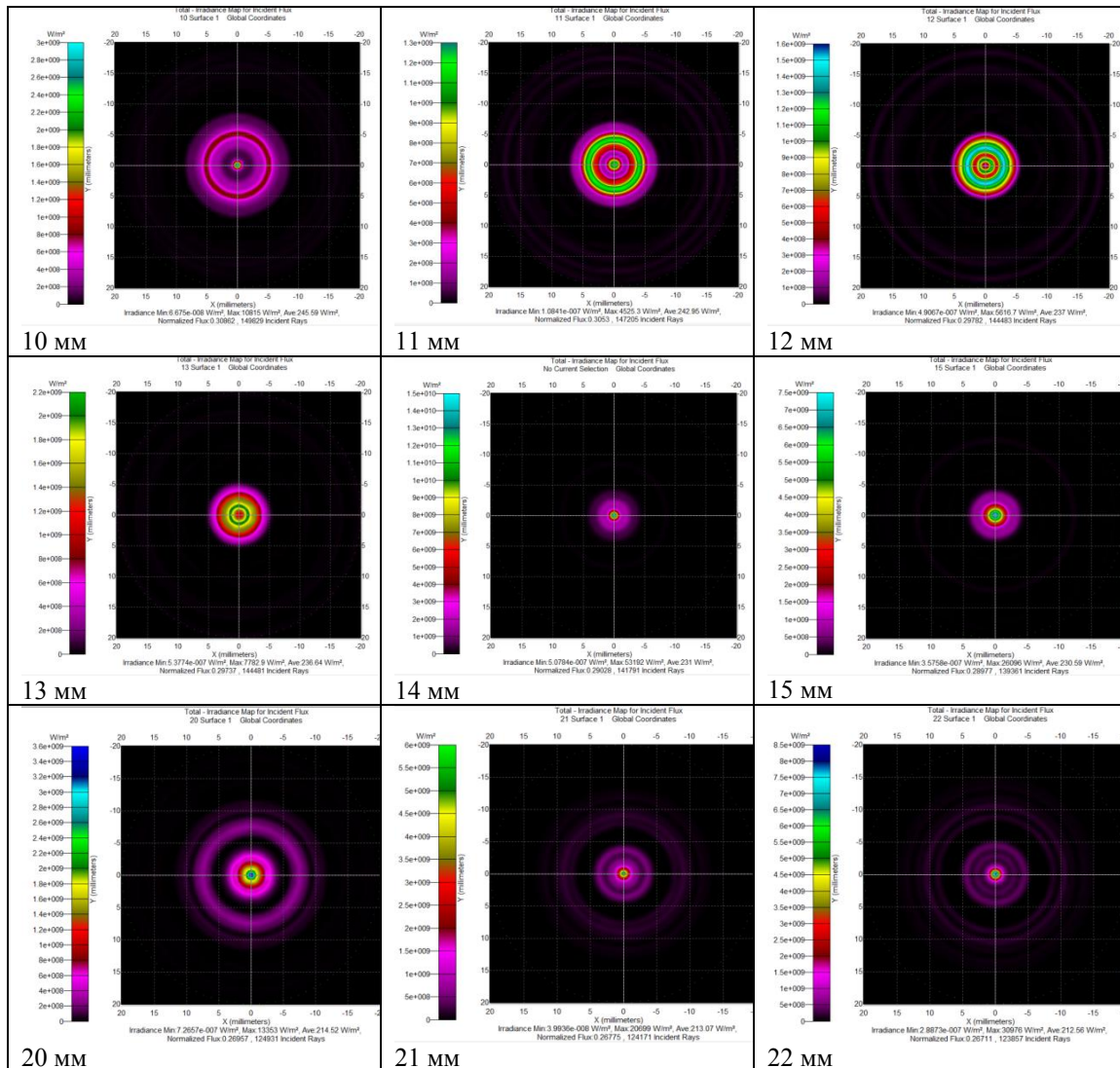


Рис. 5. Структура променів, які пройшли через двоелементний концентратор для фокусних відстаней $f = 10\text{--}22$ мм

Мікропризмові двоелементні лінзи для офтальмології

Мікропризмові рефракційні двоелементні пристрої, які запропоновано в роботі [7] для вимірювання кутів рефракції променів в офтальмології, відрізняються від двоелементних кільцевих концентраторів світла двома важливими особливостями: 1) офтальмологічна мікропризмова структура є одномірною лінійною, а не двомірною кільцевою; 2) кути заломлення мікропризм α_k є однаковими для всіх мікропризмових елементів структури.

Унаслідок цього пройдені промені, які падають на першу мікропризмову структуру під певним кутом φ_0 , заломлюються на кут $\varphi_1 = \sin^{-1}(n_1 \sin \alpha_k)$ [5] і падають на другий мікропризмовий елемент під одними і тими ж кутами падіння φ_2 . Тому зображення об'єктів, отримане із використанням такої лінзи, практично не спотворюється, а лише зміщується на певний визначений кут γ , що і використовується в офтальмологічній практиці для компенсації кутів косоокості.

У той же час, двохелементна офтальмологічна мікропризмовою структура, так званий компенсатор косоокості [7], має істотні переваги порівняно з аналогічним одноелементним пристроєм. Для мікропризмових компенсаторів косоокості, які сформовані з одинарних мікропризм, при повороті пристрою уздовж осі, напрямком якої співпадає з напрямком мікрорельєфу, виникає істотна зміна величини призматичної дії елемента, яка призводить до відповідної похибки при вимірюваннях кута косоокості, при цьому величина похибки пропорційна значенню призматичної дії (ПД) і для ПД = 20–30 призмових діоптрій (Δ) може становити 3–5 Δ . Залежність номінальної призматичної дії компенсатора від кута освітлення рельєфу наведено на рис. 6. Розрахункові та експериментальні дані [7] свідчать, що зміна величини призматичної дії Δ при повороті пристрою уздовж осі для двохелементних мікропризм майже в чотири рази менша порівняно з одноелементними мікропризмовими елементами. Таким чином, офтальмологічні двохелементні компенсатори дозволяють більш точно вимірювати кути косоокості під час діагностики стану зору пацієнтів.

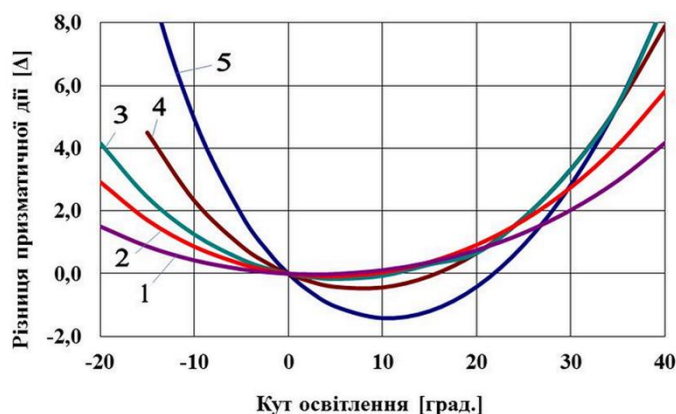


Рис. 6. Похибка вимірювань при повороті одинарної мікропризми вздовж осі залежно від величини призматичної дії: 1 — ПД = 5,0 Δ ; 2 — 10,0; 3 — 20,0; 4 — 28,0; 5 — ПД = 40,0 Δ

Проблемою при створенні двохелементних офтальмологічних мікропризм є виньєтування пройдених променів другим мікропризматичним елементом, що відповідно зменшує сумарний коефіцієнт світлопропускання τ_{np} цією структурою.

Зазначене екранування виникає внаслідок похилого падіння променів на другу рефракційну структуру. Мікропризмові елементи у симетричному компенсаторі косоокості [7] розміщуються рельєфом один до одного, тому пройдені світлові потоки після заломлення першою мікропризмою на кут φ_2 падають на другу мікропризму під кутом φ_3 не з боку утворюючої поверхні, а з боку рельєфу, тому після заломлення на кут φ_4 пройдений потік частково екранується виступами мікрорельєфу висотою h . Для заданого кроку мікрорельєфу W глибина рельєфу для певної мікропризми з кутом заломлення α_k становить $h_k = W \operatorname{tg} \alpha_k$.

Для нормального падіння променів на першу мікропризму відповідний кут падіння $\varphi_0 = 0$, тому кут падіння променів на внутрішню грань цієї призми $\varphi_1 = \alpha_k$, відповідно кут рефракції пройдених променів цією гранню $\varphi_2 = \sin^{-1}(n_1 \sin \alpha_k)$. Кут

падіння променів на другу мікропризму $\varphi_3 = 2\alpha_k - \varphi_2$, відповідний кут заломлення променя другою гранню:

$$\varphi_4 = \sin^{-1}(\sin \varphi_3 / n_1) = \sin^{-1}[\sin \{2\alpha_k - \sin^{-1}(n_1 \sin \alpha_k)\} / n_1], \quad (1)$$

тому відповідна зона екранування променів другим рельєфом $\Delta W = h_k \operatorname{tg}(\alpha_k - \varphi_4)$ становить:

$$\Delta W = W \operatorname{tg} \alpha_k \operatorname{tg}(\alpha_k - \sin^{-1}[\sin \{2\alpha_k - \sin^{-1}(n_1 \sin \alpha_k)\} / n_1]). \quad (2)$$

Для типового значення $W = 600$ мкм [1] та діапазону зміни кутів заломлення мікропризм $\alpha_k = 0,28\text{--}28,32$ град., який відповідає стандартному діапазону призматичної дії мікропризм ПД = 0,5–30,0 Δ у діагностичних наборах [1], для поліметилметакрилату ПММА (коефіцієнт заломлення $n_1 = 1,492$ для довжини хвилі $\lambda = 0,532$ мкм [8]), максимальна величина екранування, визначена згідно виразу (2), становить $\Delta W = 131,35$ мкм, тобто 21,89 %. Такий ефект призводить до зменшення коефіцієнта світлопропускання до значення $\tau_{np2} = 66,6$ % порівняно зі звичайним світлопропусканням одноелементного мікропризмового елемента, який згідно з формулами Френеля [1] для двох поверхонь ПММА становить $\tau_{np1} = 92,4$ %.

Оскільки величина призматичної дії симетричних компенсаторів косоюкості [7, 9] складається з дії двох мікропризм, сумарне максимальне значення ПД = 30,0 Δ для двохелементного компенсатора складається з призматичної дії двох мікропризм, кожна з яких становить лише ПД = 14,95 Δ , що відповідає кутам заломлення мікропризм $\alpha_{k \max} = 16,41$ град. Таким чином, для кроку рельєфу $W = 600$ мкм максимальна величина екранування становить лише $\Delta W = 35,35$ мкм, тобто 5,89 %, що практично не впливає на процес світлопропускання. Відповідний коефіцієнт світлопропускання для такого пристрою сумарною призматичною дією ПД = 30,0 Δ становить $\tau_{np2} = 80,3$ % і відповідно збільшується при зменшенні сили компенсатора до максимального значення $\tau_{np2} = 85,3$ %. Залежність величини екранування $\Delta W / W$ від призматичної дії мікропризм двохелементного компенсатора косоюкості для загального випадку наведено на рис. 7.

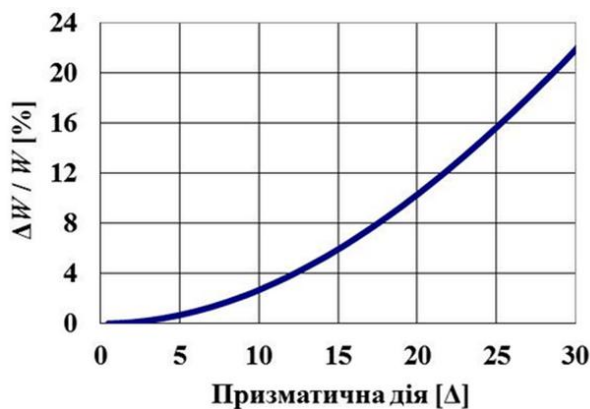


Рис. 7. Величина екранування пройдених світлових потоків залежно від величини призматичної дії мікропризм

Таким чином, двохелементні лінійні мікропризмові елементи для невеликих значень призматичної дії ПД < 15,0 Δ практично не погіршують свої світлопропусканні властивості, в той же час значно зменшується можлива похибка у вимірю-

ванні кутів косоокості, тому такі пристрої доцільно використовувати для достовірної діагностики дефектів зору.

Висновки

Розглянуто можливість створення мікропризмових кільцевих концентраторів світлових потоків з двох однакових елементів, що дає можливість зменшити кути заломлення мікропризм і відповідні глибини мікрорельєфу. Однак проведені дослідження показали, що для таких двоелементних пристроїв значно зменшується коефіцієнт світлопропускання, що не дозволяє їхнє ефективне використання на практиці.

У той же час, двоелементні мікропризмові лінійні структури, які використовуються в офтальмології, довели свою ефективність при проведенні надійної діагностики кутів косоокості. Процес екранування такими структурами пройдених світлових потоків практично не впливає на сумарний коефіцієнт світлопропускання при невеликих значеннях призматичної дії пристроїв.

1. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Мікропризми в офтальмології. Київ: Наук. думка, 2019. 224 с. ISBN 978-9660-00-1639-2.
2. Петров В.В., Антонов Є.Є., Зенін В.М., Манько Д.Ю., Шанойло С.М. Моделювання та дослідження параметрів концентраторів світлових променів. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2020. Т. 22. № 3. С. 3–13. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.3.218803>.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. Москва: Машиностроение, 1979. 344 с.
4. Brinksmeier E., Gläbe R., Schönemann L. Diamond Micro Chiseling of Large-Scale Retroreflective Arrays. *Precision Engineering*. 2012. Vol. 36. P. 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>
5. Ландсберг Г.С. Оптика. Москва: Наука, 1976. 928 с.
6. Software for design and analysis of illumination and optical systems. URL: <https://www.lambdare.com/tracepro/>
7. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Токалін О.О., Шанойло С.М. Оптичні властивості здвоєних мікропризмових елементів. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2012. Т. 14. № 4. С. 7–17.
8. Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers. *Acta Physica Polonica A*. 2009. Vol. 116. P. 585–587. URL: <http://www.refractiveindexes.info>.
9. Петров В.В., Крючин А.А., Риков С.О., Сергієнко М.М., Антонов Є.Є., Коробов К.В., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Діагностична лінійка симетричних мікропризмових компенсаторів косоокості. Патент України № 76872. Бюл. № 2. 25.01.2013.

Надійшла до редакції 04.12.2020