

В. В. Петров, С. М. Шанойло, Є. Є. Антонов, А. С. Лапчук

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

Шляхи поліпшення оптичних характеристик мікропризмових структур

Проведено аналіз шляхів поліпшення оптичних характеристик мікропризмових світлоповертальних структур, які використовуються в офтальмології та дорожньому господарстві. Розглянуто технології формування мікропризмового рельєфу на прозорих оптичних матеріалах. Досліджено методи оптимізації спектральних характеристик і компенсації хроматичних явищ для світлоповертальних структур корекції зору.

Ключові слова: світлоповертальний елемент, кут освітлення, коефіцієнт відбиття, дифракція білого світла, хроматизм.

Результатом впровадження наукових напрацювань, що отримані при виконанні комплексу фундаментальних і прикладних досліджень Інституту проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України в галузі створення систем оптичного запису інформації, є розробка технологій та прецизійного обладнання для виробництва мікропризмових структур. Зокрема, в останні роки розроблено процеси алмазного різання мікрорельєфу на металевих дисках-оригіналах, впроваджено методи гальванічного вирощування відповідних робочих матриць з нікелю та виготовлення кінцевих виробів методами термопресування та лиття під тиском, запропоновано методики оптимізації параметрів мікропризмових елементів і контролю їхніх параметрів [1].

Подальшим напрямком досліджень є підвищення якості та істотного поліпшення робочих характеристик мікропризмових виробів, які за функціональними ознаками та їхнім призначенням можна розподілити на дві великі групи: 1) світлоповертальні елементи для дорожньо-транспортного господарства; 2) мікропризмові структури Френеля для офтальмології. Для першої групи виробів основною задачею подальших досліджень є підвищення ефективності світлоповертання. Сьогодні звичайними на ринку мікропризмових катафотів є елементи з коефіцієнтом світлоповертання $R(\varphi_0) = 800\text{--}900$ кд/(лк.м²), тому також звичайними є надвисокі вимоги до обладнання та інструменту для виготовлення оригіналів таких пристроїв. Допуски на кутові геометричні розміри мікропризм вимірюються кутовими секундами, а шорсткість світловідбиваючих граней не повинна бути гіршою за 0,05 мкм. Зазначені параметри, перш за все, забезпечуються якістю ріжучого інструменту, за допомогою якого виготовляються диски-оригінали мікропризмових структур.

Для забезпечення такого високого рівня продукції, останнім часом в ІПРІ НАН України було радикально переобладнано станцію виготовлення спеціального алмазного ріжучого інструменту. Сьогодні станцію оснащено високоточними оптичними контроль-

но-вимірювальними системами. Відпрацьовано технологію заточування граней різця та розроблено методу, яка дозволяє здійснювати попередній та кінцевий контроль величини корекції кута заточування. Система забезпечує виготовлення різців з кутами заточування в межах від 30° до 90° з максимальним відхиленням кута від заданого не більше 10 кутових секунд. Для будь-яких світлоповертальних елементів вирішення проблеми поліпшення робочих характеристик пов'язано також із підвищенням якості оптичних поверхонь мікрокубічної структури. Тому в останній час було також радикально перероблено станцію виготовлення дисків-оригіналів і технологію гальванічного вищущування відповідних робочих матриць з нікелю.

Для групи мікропризмових виробів в офтальмології основним є усунення причин, які погіршують гостроту зору, що спостерігається у пацієнта або хворого при застосуванні таких виробів для діагностики та корекції зору. До таких причин можна віднести шорсткість заломлюючих поверхонь мікропризм, дисперсію та дифракцію світла на мікропризмових структурах.

Разом з тим, проблема якості мікропризмових приладів, окрім вирішення питань створення вдосконаленого інструменту та технологічного обладнання, безпосередньо пов'язана з розробкою нових технологій проектування, теоретичною проробкою нових конструкцій та оптимізації параметрів виробів з мікропризмовим рельєфом. Розглянемо більш детально роботи ІПРІ НАН України з напрямку фізичного моделювання сучасних високоефективних мікропризмових пристроїв.

Асиметричні світлоповертальні елементи

Відомо, що асиметричні світлоповертальні елементи створюються шляхом формування на твірній плоскій поверхні двох груп канавок трикутного профілю — широкої з кроком W та кутом $\beta = 90^\circ$ і вузької з кроком L та кутом $\alpha = 25\text{--}35^\circ$. Величина цього кута залежить від робочого кута освітлення φ_0 світлоповертача. Головною перевагою таких елементів є те, що їхню робочу поверхню $S(\varphi_0)^*$ шляхом підбору співвідношення (W/L) для певного кута освітлення φ_0^* можна створити максимальною, тобто вся твірна поверхня світлоповертача є робочою. Звичайно, що при зміні кута освітлення φ_0 величина ефективної поверхні $S(\varphi_0)/S(\varphi_0)^*$ зменшується, і для її оптимізації необхідно знову відповідним чином скорегувати співвідношення кроків широкої та вузької канавок (W/L) .

Одним із дуже важливих параметрів дисків-оригіналів саме асиметричних світлоповертачів є величина відповідного кута вузької канавки рельєфу [1], який забезпечується кутом ріжучої грані алмазного різця. Значення цього кута має бути таким, щоб світлоповертальна поверхня катафота була максимальною. Зокрема, кут ріжучої грані різця α , якому відповідає кут вузької канавки рельєфу, не повинен перевищувати кут φ_1 , під яким потік світла розповсюджується в матеріалі катафота. У випадку, коли $\alpha > \varphi_1$ частина бокових поверхонь $S^*(\varphi_1)^*$ катафота, оптимізованого для певного кута освітлення φ_0^* , взагалі не може бути сформована таким різцем. Величину додаткового зменшення S_1 ефективної поверхні такого світлоповертача можна визначити, як $(W)^2(\text{tg}\alpha - \text{tg}\varphi_1)/2$, де W — крок широкої канавки рельєфу [1]. Відповідний коефіцієнт k_1 зменшення ефективної поверхні катафота S^* , оптимізованого для кута освітлення φ_0^* можна визначити як

$$k_1 = (S^* - S_1)/S^* = (3\text{tg}\varphi_1^* - \text{tg}\alpha)/2\text{tg}\varphi_1^*, \quad (1)$$

де $\varphi_1^* = \sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/n_1)$, а n_1 — коефіцієнт заломлення матеріалу світлоповертача.

Ефективна поверхня $S(\varphi_0)/S^*$ асиметричного світлоповертального елемента в цьому випадку дорівнює:

$$S(\varphi_0)/S^* = (S(\varphi_0)/S^*)_0 [1,0 - (1 - k_1) (\varphi_1/\varphi_1^*)],$$

де для $L^* < L$: $(S(\varphi_0)/S^*)_0 = \text{tg} \{ \sin^{-1}[(\sin \varphi_0) / n_1] \} / \text{tg} \{ \sin^{-1}[(\sin \varphi_0^*) / n_1] \}$; (2)

для $L^* > L$: $(S(\varphi_0)/S^*)_0 = \text{tg} \{ \sin^{-1}[(\sin \varphi_0^*) / n_1] \} / \text{tg} \{ \sin^{-1}[(\sin \varphi) / n_1] \}$.

Графік залежності ефективної поверхні (2) для двох кутів різця α проілюстровано на рис. 1. Суцільні лінії на графіках відповідають куту різця, що співпадає з кутом освітлення мікрорельєфу φ_1 для кожного з кутів оптимізації φ_0^* , пунктирні криві розраховані для незмінного кута різця, при цьому на рис. 1,а кут α дорівнює 30° , на рис. 1,б кут α дорівнює 40° . Розрахунки, які наведено на рис. 1, зроблено для коефіцієнта $n_1 = 1,585$, оскільки світлоповертачі для дорожніх катафотів найчастіше за все виробляються з полікарбонату.

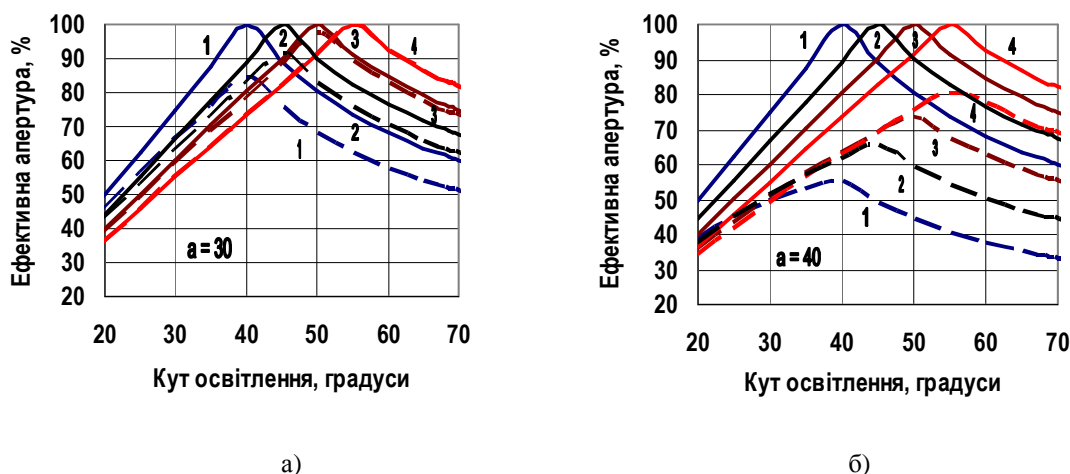


Рис. 1. Ефективна поверхня світлоповертального елемента для кутів оптимізації $\varphi_0^* = 40^\circ$ (крива 1), 45° , 50° (2) та 55° (4): а) кут заточування різця $\alpha = 30^\circ$; б) кут $\alpha = 40^\circ$

Можна побачити, що ефективна поверхня катафота істотно залежить від вибору кута ріжучої грані різця: при малих кутах оптимізації катафотів (φ_0^*) зменшення ефективної поверхні $S(\varphi_0)/S^*$ може становити десятки відсотків. Таким чином, світлоповертальні характеристики та ефективну поверхню асиметричних катафотів можна значно підвищити лише за рахунок оптимального вибору кута вузької канавки мікрорельєфу, яка повністю визначається кутом ріжучої грані різця.

Відзначимо, що асиметричний світлоповертальний елемент має істотний недолік, який полягає в низькій ефективності світлоповертання при малих кутах освітлення твірної поверхні мікрокубів. Для усунення цього недоліку застосовують комбінацію асиметричних катафотів, так званий «повний куб», в якій твірні поверхні двох серій катафотів нахилені назустріч одна до одної під кутом $30\text{--}40^\circ$ відносно нормалі до твірної поверхні елемента. Для виготовлення асиметричного світлоповертального елемента для далекої відстані (800–1000 м) крок нарізки широкої канавки з кутом 90° повинен стано-

вити приблизно $W = 2000$ мкм. Враховуючи, що для кожного кута освітлення φ_0 існує оптимальне співвідношення [1] між кроками серій широких і вузьких канавок асиметричного катафота (W/L) (рис. 2), при якому величина його ефективної поверхні $S(\varphi_0)/S^*$ максимальна, то для кроку широкої канавки $W = 2000$ мкм при куті освітлення $\varphi_0 = 35^\circ$ крок вузької канавки L повинен становити близько 776 мкм.



Рис. 2. Співвідношення між кроками L і W , при якому коефіцієнт активної апертури дорівнює 100 % для системи «полікарбонат–повітря»

Отже технологія виготовлення катафота типу «повний куб» для кута оптимізації $\varphi_0 = 35^\circ$ для $W = 2000$ мкм та $L = 766$ мкм може бути визначена наступним чином:

1) на першому етапі в необхідній кількості виготовляються заготовки — металеві пластини товщиною $\delta \approx 635$ мкм. Величина δ визначається кроком вузької канавки L та кутом оптимізації φ_0 , а саме $\delta = L \cos \varphi_0$. Ширина пластин Π дорівнює ширині матриці, яку необхідно виготовити, а кількість пластин N визначає довжину цієї матриці. Тому, наприклад, при ширині пластин $\Pi = 200$ мм для отримання прямокутної матриці розміром $\Pi N = 200 \times 200$ мм необхідно виготовити пластини кількістю $N = 314$;

2) виготовлені 314 пластин складаються разом, і їхні торцеві поверхні фрезеруються під кутом 35° відносно подовжньої осі кожної з пластин для отримання похилої поверхні;

3) на отриманій похилій поверхні алмазним різцем формується з кроком $W = 600$ мкм широка канавка з кутом $\beta = 90^\circ$. Після цього пластини складаються попарно назустріч одна одній вершинами разом, з метою отримання рифленої двомірної структури;

4) по вершинах отриманої структури алмазним різцем прорізається серія канавок з кутом, що дорівнює подвійному куту оптимізації φ_0 , у нашому випадку — з кутом $\varphi = 70^\circ$, з метою створення необхідних груп кутових відбивачів;

5) на заключному етапі з отриманої структури методами гальванопластики створюється робоча нікелева матриця, яка використовується для виготовлення вдосконалених катафотів методами термопресування або литва під тиском. Така технологія дозволяє отримати катафоти, що мають максимальний коефіцієнт активної апертури і можуть працювати при великих кутах освітлення (навіть при $\varphi_0 = 50\text{--}60^\circ$), що дуже важливо для дорожніх катафотів.

Симетричні світлоповертальні елементи

За коефіцієнтом активної апертури асиметричні катафоти мають істотну перевагу перед так званими прямими (симетричними) [1], мікрорельєф яких симетричний відносно нормалі до твірної поверхні. Однак, симетричні катафоти більш технологічні при виготовленні, і тому вони продовжують використовуватися для ряду практичних засто-

сувань (дорожні знаки, світлоповертальні стрічки, маркери для автошляхів). Сучасна модернізація цих добре відомих світлоповертальних приладів полягає в застосуванні в одному пристрої комбінацій симетричних елементів з різними кутовими характеристиками. За цими методами створені симетричні катафоти, в яких відбиття променя для центральної зони розраховано для далекої відстані спостереження (800–1000 м), а периферійні зони відбивають промінь світла на значно меншу відстань, але в більш широкому куті відбиття (2–3 градуси). Відзначимо, що за відповідним розрахунком кутів нахилу граней симетричного катафота та підбором кроку нарізки можна виготовити катафот, який однаково ефективно працює в далекій та близьких зонах і який є досить універсальним для різних практичних потреб. На рис. 3 наведено діаграми освітленості у відбитому промені деяких симетричних елементів, одна клітина на графіках відповідає 20 кутових хвилинам.

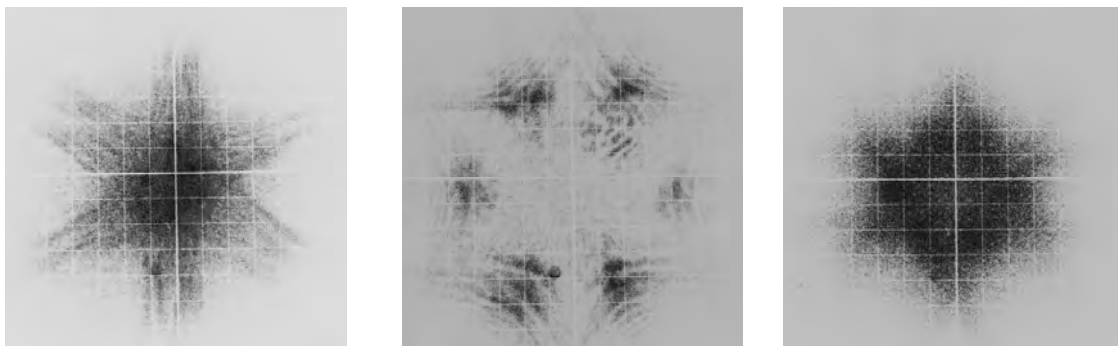


Рис. 3. Картини відбиття променя для різних світлоповертальних елементів:
а), б) різні зони світлоповертача фірми «WITAL» (Польща);
в) оптимізований симетричний катафот СК600 (ІПРІ НАН України)

Шляхом змінення кута нахилу однієї з трьох пар робочих поверхонь симетричного світлоповертача відносно традиційного розрахункового кута канавки рельєфу $\alpha_p = 70^\circ 31' 44''$ можна отримати катафоти, характеристика відбиття яких істотно несиметрична у вертикальній та горизонтальній площинах. Для прикладу на рис. 4 наведено фотографію матриці (рис. 4,а) та картину відбиття променя (рис. 4,б) для симетричного катафота компанії «Reflective Ireland Ltd.», для якого картина відбиття променя значно розширена в горизонтальній площині.



Рис. 4. Матриця (а) та структура відбитого променя (б) катафота компанії «Reflective Ireland Ltd.»

При відповідному виборі кроку нарізки мікрорельєфу симетричного світлоповертального елемента W , який не повинен бути меншим за 150–200 мкм, можна значно розширити зону відбиття променя без появи дифракційного структурування картини освітлення.

Проблема хроматизму в мікропризмових лінзах

Для підвищення оптичної якості групи мікропризмових виробів для офтальмології основним є усунення причин, які погіршують гостроту зору пацієнта. Звичайні призматичні лінзи з оптичного скла використовуються лише для невеликих значень призматичної дії ($PD < 10\text{--}12$). Для більших значень PD призми виявляються занадто товстими та важкими, тому використання їх в окулярах практично неможливе. Крім того, для великих значень призматичної дії звичайні скляні призми мають великі хроматичні абеерації, що істотно зменшує розподільчу здатність і знижує гостроту зору, яка спостерігається при їхньому використанні. Мікропризмові лінзи Френеля вирішують проблему надмірної ваги та товщини, але хроматизм є невід'ємною характеристикою білого світла, і проблема розмиття зображення внаслідок дисперсії світла в призмах залишається.

Для покращення оптичних характеристик мікропризм можуть використовуватися призми з кольорового скла або додаткові світлофільтри [3]. Ефект корекції хроматизму світлофільтрами проілюстровано на рис. 5, на якому наведено розрахункову картину [3] спектрального розподілу заломленого променя після проходження білого світла через мікропризму оптичною силою $30PD$ (рис. 5,а). Наявність світлофільтрів зменшує зону хроматизму майже в 2 рази до 0,3 градусів (рис. 5,б), при тому, що кут відхилення центральної зони променя світла з довжиною хвилі $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ становить близько $\varphi = 16,73^\circ$.

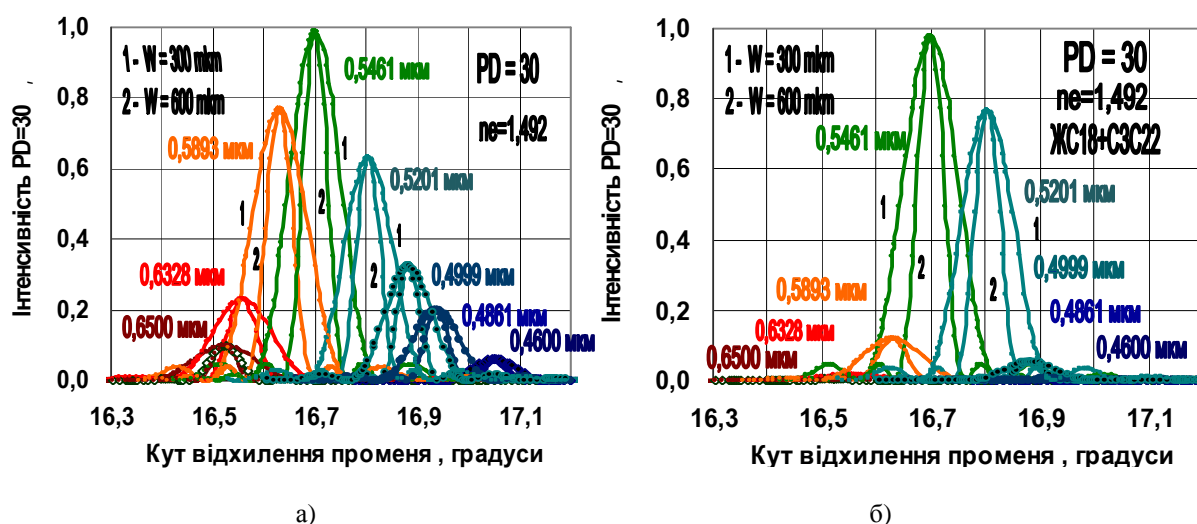


Рис. 5. Хроматичні ефекти для мікропризми $PD = 30$: а) без світлофільтрів; б) при застосуванні комбінації світлофільтрів ЖС18+СЗС22: 1 — крок рельєфу $W = 300$ мкм; 2 — 600 мкм

При розрахунках дифракційної складової структури променя білого світла було використано відомі формули для плоскої дифракційної ґратки [4]:

$$I(\lambda, \varphi) = I_0 (\sin (\pi S / \lambda) \sin \varphi / (\pi S / \lambda)), \quad (3)$$

де I_0 — амплітуда потоку в напрямку кута $\varphi = 0$; λ — довжина хвилі; S — ширина щілини. При цьому було враховано залежність показника заломлення світла n від довжини хвилі λ .

Більш ефективним засобом боротьби з надмірним хроматизмом є використання комбінованих композитних призм, так званих гризм [4], в яких дифракційний рельєф зроблено безпосередньо на поверхні рефракційної призми. Для великих призмових діоптрій ($PD > 18-20$) композитні призми виявляються більш тонкими, прозорішими та мають більшу оптичну якість порівняно не тільки з стандартними скляними призмами, а навіть і з Френелівськими пресованими призмами.

Така композитна призма являє собою комбінацію рефракційної призми великої призматичної дії та дифракційної амплітудно-фазової ґратки, розрахованої таким чином, що промінь світла певної довжини хвилі λ проходить через дифракційну ґратку без додаткового заломлення. Робота структури засновується на тому ефекті, що напрям заломлення променя світла призмою та напрям відхилення цього променя ґраткою протилежні один одному, тому відбувається компенсація кутів відхилення променів [5]. Якщо через таку структуру проходить біле світло, то хроматизм, що виникає при проходженні світла, може бути повністю скомпенсований.

Для застосування в офтальмології зручно використовувати не власне гризми, а композитні призмові структури, виготовлені на окремих поверхнях таким чином, щоб обидва рельєфи (як великий рефракційний з кроком W , так і малий дифракційний з кроком D та глибиною H) були розміщені всередині пристрою і таким чином були захищені від зовнішніх забруднень і пошкоджень (рис. 6).

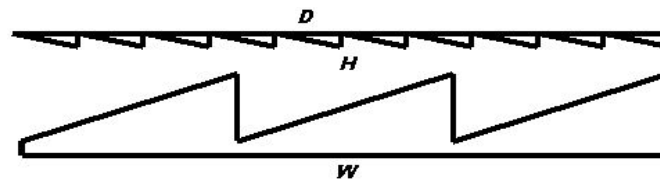


Рис. 6. Схема композитної призми (гризми)

Зазначені дві призмові структури працюють за різними принципами. Структура з великим рефракційним кроком працює за рефракційним принципом. Він впливає з того, що структура використовує різні дифракційні порядки для різних довжин хвиль за причини великої глибини рельєфу. Світло різних довжин хвиль використовує різні дифракційні порядки і завдяки цьому залишається в зоні рефракційного кута, внаслідок чого дисперсія одного дисперсійного порядку не грає значної ролі. Структура з малим дифракційним кроком повинна працювати в одному дифракційному порядку, тому глибина її повинна бути незначна. Як правило, різниця набігу фаз на центральній хвилі дорівнює λ , а значить вона працює в першому дифракційному порядку. За причини використання тільки одного дифракційного порядку ширина елементів не зменшує роздільну здатність оптичної системи. Кутова дисперсія для першого дифракційного порядку запишеться як

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{D}. \quad (4)$$

Таким чином, кут відхилення зростає з довжиною хвилі, тобто вона має дисперсію, що обернена до рефракційних призм. Вибираючи крок D достатньо малим, можна зробити дисперсію дифракційного порядку достатньо великою, щоб компенсувати дисперсію рефракційної лінзи. Умову компенсації можна записати як

$$\frac{1}{D} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (5)$$

На рис. 7 показано результати розрахунку дисперсії кута відхилення (хроматичної аберації) для трьох варіантів: 1) для призми без дифракційного елемента; 2) для призми з дифракційним елементом, оптимізованим для максимального зменшення хроматичної аберації для зеленого світла з довжиною хвилі $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ (крок ґратки $D = 20,7 \text{ мкм}$, глибина рельєфу $H = 1,11 \text{ мкм}$); 3) для призми з мінімальним відхиленням для видимого спектра хвиль ($D = 16,9 \text{ мкм}$, $H = 1,11 \text{ мкм}$). Розрахунки було виконано для оптимального кроку рефракційної призми $W = 600 \text{ мкм}$, призматична дія елемента становила $PD = 30$, а коефіцієнт заломлення $n = 1,492$ (поліметилметакрилат). При розрахунках використовувалися дані Палика [6] щодо залежності коефіцієнта заломлення n_e від довжини хвилі λ для поліметилметакрилату.

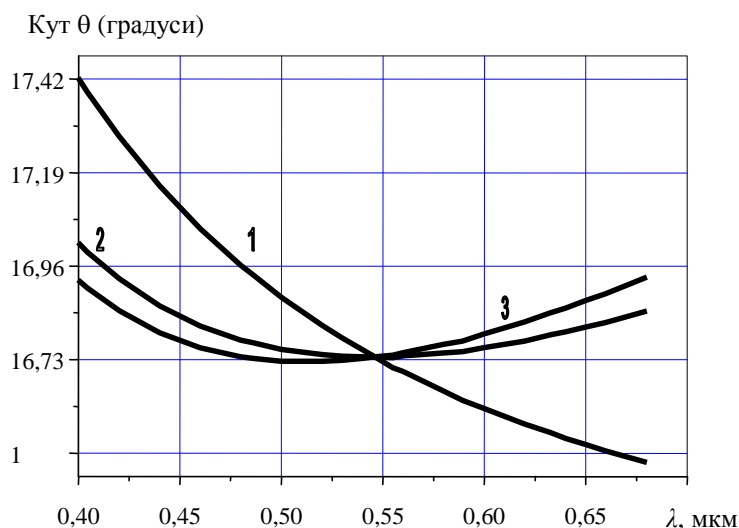


Рис. 7. Зменшення хроматичної аберації за допомогою дифракційного елемента для призми $PD = 30$, $H = 1,11 \text{ мкм}$: 1 — без дифракційного елемента ($\Delta\theta \approx 0,016$); 2 — повна компенсація хроматичної аберації для зеленого світла $D = 20,7 \text{ мкм}$ ($\Delta\theta \approx 0,005$); 3 — оптимізація за мінімумом відхилення $D = 16,9 \text{ мкм}$ ($\Delta\theta \approx 0,005$)

З представлених графіків видно суттєве (більше ніж у 3 рази) зменшення хроматичної аберації у випадку використання додаткового дифракційного елемента. Таким чином, для рефракційної призми призматичною дією $PD = 30$ з кроком $W = 600 \text{ мкм}$ шляхом застосування додаткової дифракційної ґратки з кроком $D = 20,7 \text{ мкм}$ та глибиною мікрорельєфу $H = 1,11 \text{ мкм}$ можна забезпечити проходження зеленого променя з довжиною хвилі $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ під тим кутом заломлення, який визначений першою рефракційною призмою без додаткового заломлення. В той же час відбувається компенсація хроматичних ефектів для синього та червоного діапазону спектра шляхом зміщення

відповідних променів дифракційною ґраткою в сторони, протилежні сторонам зміщення променів призмою.

Висновки

Проведено аналіз шляхів підвищення якості мікропризмових світлоповертальних структур різних типів. Запропоновано методика розрахунків характеристик асиметричних світлоповертальних елементів залежно від зміни параметрів ріжучого інструменту. Досліджено можливості компенсації хроматичних явищ для мікропризмових елементів у офтальмології шляхом використання амплітудно-фазових дифракційних ґраток.

1. *Світлоповертання: проблеми та досягнення* / В.В. Петров, С.М. Шанойло, Є.Є. Антонов [та ін.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 3–15.

2. *Технология изготовления и методика применения в офтальмологии микропризмных элементов Френзеля* / В.В. Петров, Н.М. Сергиенко, С.А. Рыков [та ін.] // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т.10, № 3. — С. 5–17.

3. *Петров В.В. Хроматизм світла, дифракція та гострота зору в мікропризмових лінзах Френеля* / В.В. Петров, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 1. — С. 49–54.

4. *Loewen E. Diffraction Grating Handbook* / E. Loewen. — [6-th ed.] — Newport Corporation, 2005. — 269 p.

5. US Patent 6,934,084, Int.Cl. G02B 5/18. Thinner, Lighter and Lower Abberation Prisms for Ophthalmic Applications / Ranjana Pandya; Aug. 23, 2005.

6. *Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids* / E.D. Palik. — San Diego: Academic Press, 1998.

Надійшла до редакції 04.06.2010