

УДК 535.241.5

**В. В. Петров, А. А. Крючин, Є. Є. Антонов,  
О. О. Токалін, С. М. Шанойло**  
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113, Київ, Україна

## Оптичні властивості здвоєних мікропризмових елементів

*Виконано розрахунки оптичних параметрів офтальмологічних симетричних мікропризмових компенсаторів, що складаються з двох однакових мікропризмових елементів. Проведено порівняльний аналіз хроматичних ефектів для оптичних компенсаторів з одинарних мікропризм і симетричних компенсаторів. Визначено вплив параметрів компенсаторів на гостроту зору пацієнта при діагностиці зору для різних типів компенсаторів. Запропоновано метод створення послаблювачів зору для офтальмологічних застосувань на основі мікрорельєфних структур відповідного профілю.*

**Ключові слова:** мікропризмовий елемент, крок мікрорельєфу, хроматизм, дифракція світла, гострота зору, послаблювач світла.

Призматичні оптичні пристрої широко використовуються в офтальмологічній практиці, причому в останні роки традиційні скляні призми все частіше замінюються компактними мікропризмовими елементами. Так, розроблений діагностичний набір КК-42 [1] для діагностики косоокості, складається із 42-х мікропризмових планарних елементів Френеля — оптичних компенсаторів косоокості з призматичною дією від 0,5 до 30,0 призмових діоптрій (ПД). Компенсатори по черзі встановлюються в пробну офтальмологічну оправу, автоматично займають необхідне положення для діагностики і дають можливість точно вимірювати кут косоокості ока пацієнта. Однак, зазначений метод не зовсім зручний, він не дозволяє швидко змінювати компенсатори з різною призматичною дією, вимагає багато часу на діагностування і тому не дозволяє провести діагностику косоокості у малих дітей і важких хворих, коли проблематичне використання пробної оправы.

Більш зручним для діагностики косоокості методами призмової скіаскопії виявився набір діагностичних лінійок оптичних компенсаторів косоокості [2], з допомогою якого для діагностування потребується значно менший час. Кожна з лінійок набору складається з 5-ти мікропризмових компенсаторів з одинарних мікропризм, рельєф яких герметично захищений спеціальними плоскими пластинками. Набір включає в себе 5 лінійок таких компенсаторів для діапазонів 1–5 ПД,

6–10 ПД, 12–20 ПД, 22–30 ПД і 30–50 ПД. Використовуються лінійки шляхом їхнього розміщення по черзі перед оком пацієнта в одному визначеному положенні, а саме рельєфом до пацієнта, перпендикулярно осі зору.

Однак при використанні зазначеної традиційної лінійки в іншому положенні, а саме, рельєфом від пацієнта, виникає значна похибка у величині призматичної дії мікропризмових компенсаторів, особливо для великих значень ПД. Крім того, неточності встановлення лінійки з компенсаторами навіть на невеликі кути відносно перпендикулярного напрямку значно змінюють значення призматичної дії компенсаторів і вносять відповідні помилки в отримані значення кута косоокості. Тому виникла необхідність розробки компенсаторів косоокості та відповідних лінійок компенсаторів, призматична дія яких менш чутлива до поворотів мікропризмових елементів. Поставлена задача вирішується таким чином, що кожний мікропризмовий оптичний компенсатор косоокості формується одночасно двома планарними мікропризмовими елементами однакової призматичної дії, причому пари елементів розміщуються рельєфами назустріч один одному (рис. 1) і створюють таким чином симетричний мікропризмовий елемент.

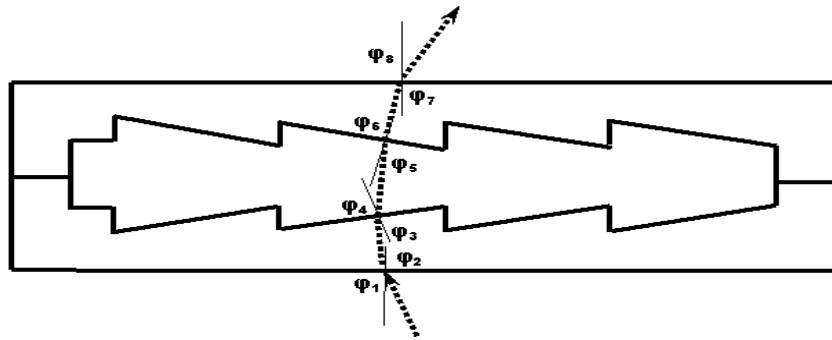


Рис. 1. Схема проходження променів через симетричний мікропризмовий елемент

### Алгоритм розрахунків симетричних мікропризмових структур

Розрахунки оптичних параметрів симетричних елементів зі здвоєними мікропризмами базуються на використанні закону Снелліуса [3],

$$n_1(\lambda) \sin \varphi_1 = n_2(\lambda) \sin \varphi_2, \quad (1)$$

де  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  — кути падіння та заломлення світла в першому та другому середовищах. Вираз (1) дозволяє визначити відповідні кути заломлення  $\varphi_1 - \varphi_8$  променів (рис. 1), а також розглянути хроматичні ефекти шляхом врахування залежності коефіцієнта заломлення  $n$  від довжини хвилі світла  $\lambda$ . Значення  $n(\lambda)$  наведено у відомих таблицях Палика [4].

Розрахунки кутів заломлення променів згідно (1) свідчать, що для мікропризмових компенсаторів косоокості, які сформовані з одинарних мікропризм, при повороті пристрою вздовж осі, що співпадає з напрямком мікрорельєфу, виникає істотна зміна величини призматичної дії елемента, яка призводить до відповідної похибки у вимірюваннях кута косоокості (рис. 2), при цьому величина похибки

пропорційна значенню призматичної дії і для  $ПД = 20\text{--}30$  може сягати  $3\text{--}5$   $ПД$ . У той же час розрахункові та експериментальні дані свідчать (рис. 3), що зміна величини призматичної дії при повороті призми менша майже в чотири рази для випадку, коли відповідна величина призматичної дії оптичного компенсатора косокутості створюється двома однаковими мікропризмовими елементами.

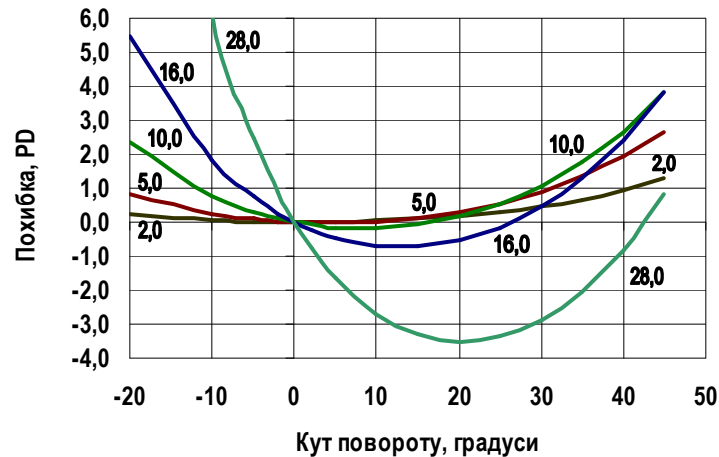


Рис. 2. Похибка вимірювань при повороті одинарної мікропризми вздовж осі залежно від величини призматичної дії  $ПД = 2,0, 5,0, 10,0, 16,0$  та  $28,0$

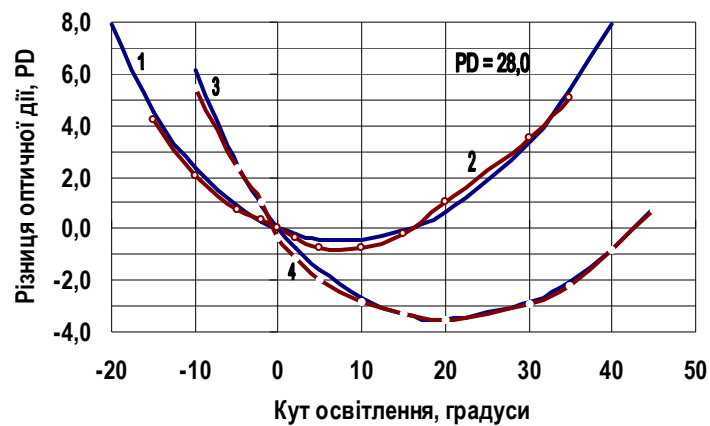


Рис. 3. Порівняльні характеристики симетричної здвоєної (криві 1, 2) та одинарної (криві 3, 4) мікропризми  $ПД = 28,0$  (криві 1, 3 — розрахунки; криві 2, 4 — експеримент)

Кожний симетричний мікропризмовий компенсатор виготовляється зі спеціальної пластмаси, прозорої для видимого спектрального діапазону. Крок мікрорельєфу всіх мікропризмових елементів становить  $W = 600$  мкм, який є оптимальним для зменшення дифракційних ефектів і виключення процесу дискретизації зображень. Зрозуміло, що при розвороті симетричного компенсатора на  $180$  градусів величина призматичної дії не змінюється, що впливає з самого принципу формування компенсатора з двох однакових мікропризм, і тому елемент є дійсно

симетричним стосовно його розвороту на 180 градусів. Змінюється лише напрям призматичної дії, що, зокрема, є корисним при визначенні напрямку горизонтальної косоокості зору.

Дві мікропризми в компенсаторі герметично з'єднані одна з одною методом ультразвукового зварювання таким чином, що мікрорельєф розміщується всередині пристрою, не контактує із зовнішнім середовищем і тому захищений від забруднень і пошкоджень у процесі експлуатації пристрою. Мікропризмові елементи розраховуються, виготовляються та з'єднуються в єдиний оптичний блок таким чином, щоб витрати світла всередині елемента були мінімальними.

Для зручності вимірювань кутів горизонтальної і вертикальної косоокості пропонуються окремі діагностичні лінійки таких оптичних компенсаторів [5], що виготовлені зі здвоєних мікропризм. Кожну лінійку формує група з 6-ти фіксованих симетричних мікропризматичних компенсаторів косоокості для певного діапазону зміни призматичної дії (рис. 4).



Рис. 4. Набір діагностичних лінійок симетричних компенсаторів косоокості ДНСК-1

Група з 5-ти діагностичних лінійок створює набір лінійок симетричних компенсаторів косоокості ДНСК-1: три лінійки (I, II, III) — для вимірювань кутів горизонтальної косоокості, та дві лінійки (IV, V) — для кутів вертикальної косоокості. Номінали мікропризм у лінійках для горизонтальних кутів становлять: (I) — 1, 2, 4, 6, 8, 10 *ПД*; (II) — 12, 14, 16, 18, 20, 25 *ПД*; (III) — 30, 35, 40, 45, 50, 55 *ПД*. Лінійки для вертикальних кутів: (IV) — (догори) та (V) — (донизу) мають такі номінали: 5, 10, 15, 20, 25, 30 *ПД*.

### Гострота зору для симетричних мікропризматичних компенсаторів косоокості

Важливою характеристикою зору є її гострота  $G$ . Значення  $G = 1,0$  визначається як можливість розподіляти зображення шириною в 1 кутову хвилину з відстані 5 метрів при яскравості тестової таблиці  $E \geq 160$   $\text{кд/м}^2$  [6]. Відомо, що на гостроту зору  $G$  впливають багато чинників [7], у цій роботі розглянемо саме вплив хроматичних явищ і дифракційних ефектів.

Результати розрахунків хроматичних явищ для одинарних і здвоєних мікропризматичних структур згідно (1) свідчать, що хроматичні ефекти, які впливають на чіткість зорового образу та на відповідну гостроту зору  $G$ , мають однакову величину для одинарних і здвоєних симетричних елементів (рис. 5) і визначаються лише значенням призматичної дії елемента. Таким чином, не відбувається погіршення гостроти зору  $G$ , що пов'язане з хроматичними явищами, при використанні здвоєних мікропризм порівняно з випадком одинарних мікропризматичних елементів.

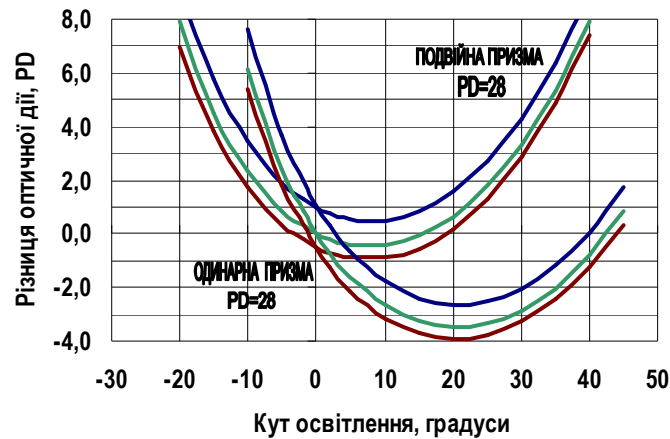


Рис. 5. Хроматичні ефекти при повороті здвоєної та одинарної мікропризми вздовж осі для призматичної дії  $PD = 28,0$

Більш важливою фізичною причиною погіршення гостроти зору  $G$  виявляється дифракція світла на періодичній мікропризмовій структурі. Для компенсаторів, що сформовані з одинарних мікропризм, такий ефект розглянуто в нашій попередній роботі [7]. Для випадку здвоєних мікропризм дифракційне розширення променя, що відбувається на першому призматичному елементі, додатково збільшується при проходженні другого елемента. Для математичного визначення цього явища знову можна використати відомі формули [8] з урахуванням цього додаткового розширення:

$$I_{\Sigma}(\varphi) = \int I_{\varphi} d\varphi,$$

$$I_{\varphi} = I_0 (\sin A \sin NB) (A \sin B)^{-1}, \quad (2)$$

де  $I_{\varphi}$  — розподіл інтенсивності після проходження променя через першу мікропризму;  $I_0$  — амплітуда світлового потоку від однієї щілини дифракційної ґратки в напрямку кута спостереження  $\varphi = 0$ ;  $A = (\pi S / \lambda) \sin\varphi$ ;  $B = (\pi D / \lambda) \sin\varphi$ ;  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання;  $D$  — період ґратки;  $S$  — розмір однієї щілини;  $N$  — кількість щілин у ґратці.

Сумарний дифракційний ефект для подвійної мікропризми визначиться шляхом інтегрування розподілу інтенсивності після проходження першої мікропризми (вираз (2)) по всіх кутах спостереження  $\varphi$  в діапазоні від  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  після проходження другої мікропризми.

Для відпрацювання моделі розглянемо випадок освітлення здвоєної мікропризми призматичною дією  $PD = 12,0$  з кроком мікрорельєфу  $W = 400$  мкм, монохроматичним когерентним випромінюванням з довжиною хвилі  $\lambda = 633$  нм. Типову картину дифракційних явищ після проходження променя через першу мікропризму для цього випадку показано на рис. 6. Інтегральний вигляд ефекту в зоні першого дифракційного максимуму практично співпадає з інтерференційною картиною (крива 3).

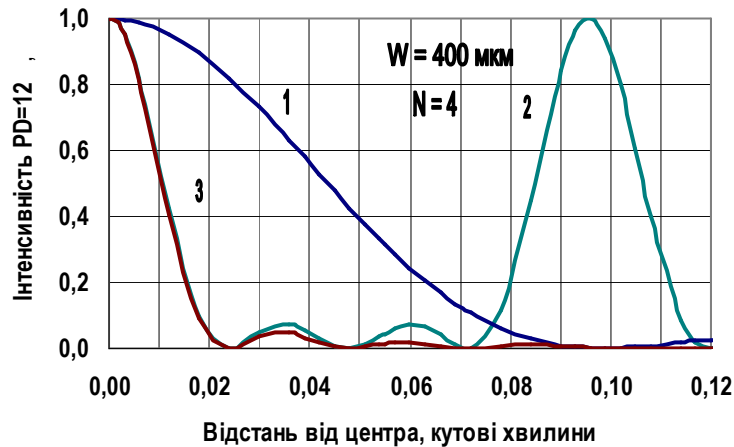


Рис. 6. Дифракційні ефекти для одинарної мікропризми призматичною дією  
 $PD = 12,0$ : 1 — дифракція; 2 — інтерференція; 3 — сумарний ефект

Для монохроматичного когерентного світла відбувається концентрація випромінювання в певних максимумах (крива 3, рис. 6), тому реальний внесок в інтегральну картину розподілу інтенсивності дають лише декілька компонент, і інтегрування по кутах падіння (вираз (2)) для другої мікропризми в цьому випадку зводиться до простого складання дифракційних явищ. Тому необхідно врахувати додаткове розширення променя всього від трьох компонент, що відповідають кутам спостереження  $\varphi = 0,000$ ;  $0,035$  та  $0,060$  кутових хвилин, практично же, понад 96 % інтенсивності сконцентровано в першому інтерференційному максимумі.

Для білого некогерентного світла, звичайно, буде існувати лише дифракційна складова ефекту (крива 1, рис. 6). Тому відбувається лише розмиття первинних променів без утворення інтерференційних максимумів, і типова картина розподілу інтенсивності світла після проходження зведеної мікропризми подібна дифракційній кривій для першої призми (крива 1 на рис. 6), а величина розширення при незмінному кроці рельєфу визначається лише оптичною силою мікропризми. В подальшому це питання буде розглянуто нами більш детально.

### Ослаблювач гостроти зору

В останні роки для лікування диплопії у лікувальних окулярах все частіше використовується так звані фільтри Бангертера [9] — напівпрозорі пластикові плівки з градуйованим пропусканням, які легко фіксуються на поверхні окулярних лінз аналогічно еластичним призмам Френеля. Фільтри Бангертера дозволяють позбавитися від диплопії, при цьому дозволяють досягнути периферійної фузії і мають достатньо привабливий косметичний вигляд [10].

Такі фільтри також можуть застосовуватися для вирівнювання гостроти зорового образу для обох очей. Дійсно, при використанні окулярів з мікропризмовою лінзою одночасно із заломленням променів відбувається також і деяке погіршення гостроти зору пацієнта.

Необхідно вирівнювати саме зменшення гостроти зору, а не інтенсивності, тому що зменшення інтенсивності променя практично виявляється однаковим для звичайного окулярного скла без призми і для рефракційного скла з призматичною складовою. Так, з формул Френеля [8] випливає, що для всіх кутів падіння  $\varphi_1 < 50\text{--}55^\circ$  коефіцієнт відбиття променя від поверхні практично однаковий. Тому як для плоского пластика, так і для поверхні з мікропризмовим рельєфом з максимальними кутами заломлення призми  $\alpha \sim 25\text{--}30^\circ$ , що відповідає максимальним величинам призматичної дії (50–60 ПД) мікропризм, які застосовуються в офтальмології, втрати інтенсивності променя для зазначених обох випадків однакові і для двох найбільш популярних в офтальмології пластиків становлять 8,0 % (поліметилметакрилат) та 10,2 % (полікарбонат).

Один з варіантів таких градуйованих послаблювачів гостроти зору можливо створити саме на ефекті дифракції білого світла на періодичних мікрорельєфних структурах. Картина розподілу інтенсивності після проходження такого послаблювача аналогічна тій, що показана на рис. 6 (крива 1). Для білого світла величина розширення зображення визначається тільки дифракцією і тому пов'язана з кроком мікрорельєфу. Змінюючи крок, можливо створити градуйовані послаблювачі для певного світлопропускання. Для уникнення послаблення загальної інтенсивності світла, який проходить через такий пристрій, зона поверхні з мікрорельєфом повинна складати невелику частку від загальної площі послаблювача. Так, типовими параметрами послаблювача може бути крок мікрорельєфу  $W = 200\text{--}400$  мкм і ширина штриха  $D = 10$  мкм, що відповідає втратам інтенсивності 2,5–5,0 %.

Проведені експерименти підтверджують реальну можливість створення послаблювачів гостроти зору на ефекті дифракції без істотного впливу на величину інтенсивності світла, що проходить через такий пристрій. Для ілюстрації на рис. 7 наведено зображення оптичного послаблювача світла, який виготовлено за наведеним принципом з такими параметрами: кут мікрорельєфу  $\alpha = 70^\circ$ , глибина рельєфу  $H = 10$  мкм. Крок рельєфу  $W$  становив 100, 200, 400 та 800 мкм, причому кожному значенню  $W$  відповідає своє значення послаблення  $\Delta I$  інтенсивності, яке змінюється від мінімального до максимального  $\Delta I = 15\text{--}20$  %.



Рис. 7. Послаблювач білого світла на принципі дифракційного розширення зображень

## Висновки

Запропоновано алгоритм розрахунків характеристик мікрорельєфних симетричних елементів, що складаються з двох однакових мікропризмових структур. Визначено вплив хроматичних явищ і дифракційних ефектів на оптичні характеристики таких структур. Запропоновано метод створення послаблювачів зору для офтальмологічних застосувань шляхом формування на плоскій прозорій поверхні



мікропризмового рельєфу певної форми, крок якого значно більший за ширину рельєфу.

1. Патент 25549 України, А61В 3/08. Пристрій для діагностики косоокості / В.В. Петров, М.М. Сергієнко, С.О. Риков, С.М. Шанойло, М.В. Шевколенко, А.А. Крючин, Є.Є. Антонов: заявник Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України. — № u200704035; заявл. 12.04.2007; опубл. 10.08.2007. — Бюл. № 12.

2. Патент 66105 України А61В 3/08. Діагностична лінійка мікропризмових компенсаторів косоокості / В.В. Петров, А.А. Крючин, С.О. Риков, М.М. Сергієнко, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло, М.В. Шевколенко; заявник Ін-т проблем реєстрації інформації НІАН України. — № u201106463; заявл. 23.05.2011; опубл. 26.12.2011. — Бюл. № 24.

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

4. *Palik E.D.* Handbook of Optical Constants of Solids [Електронний ресурс] / E.D. Palik. — Academic Press, Inc., 1998. — Режим доступу: <http://knovel.com/web/portal/browse/display>

5. *Діагностична* лінійка симетричних мікропризмових компенсаторів косоокості / В.В. Петров, А.А. Крючин, С.О. Риков, М.М. Сергієнко, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло, М.В. Шевколенко, А61В 3/08; заявка на Патент України № u201205126 від 25.04.2012 р.; позитивне рішення від 08.10.2012, № 21606/ЗУ/12.

6. *Урмахер Л.С.* Оптические средства коррекции зрения / Л.С. Урмахер, Л.И. Айзенштат. — М.: Медицина, 1990. — 256 с.

7. *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.

8. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

9. *Bangerter A.* Die Okklusion in der Pleoptik und Orthoptik / A. Bangerter / Klin Monatsbl Augenheilkd. — 1960. — Vol. 136. — P. 305–331.

10. *Iacobucci I.L.* Management of Binocular Diplopia Due to Maculopathy with Combined Bangerter Filter and Fresnel Prism / I.L. Iacobucci, B.A. Furr, S.M. Archer // American Orthoptic Journal. — 2009. — Vol. 1. — P. 93–97.

Надійшла до редакції 10.10.2012