

УДК 535.241

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

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

Хроматизм світла, дифракція та гострота зору в мікропризмових лінзах Френеля

Для мікропризмових елементів Френеля розроблено методи кількісної оцінки впливу хроматизму світла та дифракції на гостроту зображення, яке спостерігає пацієнт через мікропризму. Визначено внесок зазначених ефектів для мікропризмових лінз різної призматичної дії та розраховано відповідні залежності для білого світла. Запропоновано метод відтворення гостроти зору пацієнта шляхом використання кольорових світлофільтрів.

Ключові слова: мікропризмовий елемент Френеля, спектральна чутливість, дифракційні явища, гострота зору.

Одним з неприємних ефектів при застосуванні мікропризмових елементів корекції зору в офтальмології є зниження гостроти зору, яке відчуває пацієнт при діагностиці. Перш за все це пов'язано з відбиттям променя світла від поверхонь елементів та оптичними дефектами в матеріалі мікропризм. Однак існують й інші об'єктивні причини, пов'язані з фундаментальними фізичними властивостями світла, які вносять значно суттєвіший вплив до зазначеного ефекту.

Відомо, що проходження білого світла через призмові структури супроводжується дисперсією внаслідок хроматизму світла. Фізичним поясненням цього ефекту є залежність коефіцієнта заломлення світла n в заломлюючому середовищі від довжини хвилі λ . Найявні експериментальні дані свідчать, що використання заломлюючих призмових елементів Френеля в офтальмології призводить до зниження гостроти зору, яке спостерігається при дослідженнях пацієнта. Для ілюстрації на рис. 1 наведено зображення нитки розжарювання лампи безпосередньо в фокусі лінзи (рис. 1,а) та при використанні мікропризмового компенсатора косоокості призмовою дією 10 PD (рис. 1,б).

Легко помітити, що одночасно зі зміщенням зображення призмою має місце його розмиття та появлення райдужного забарвлення зображення нитки лампи. Саме хроматизм безпосередньо пов'язаний з гостротою і контрастністю образу, що спостерігає пацієнт через мікропризму.

© В. В. Петров, Є. Є. Антонов, С. М. Шанойло

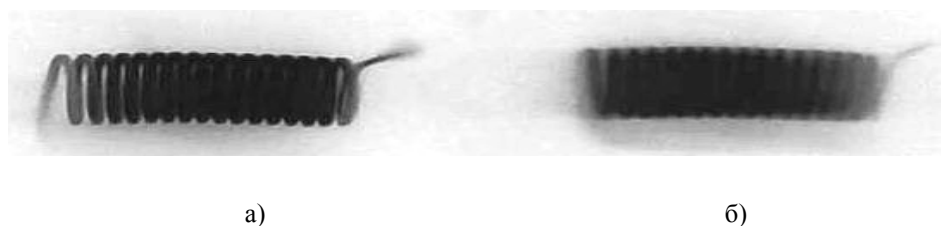


Рис. 1. Зображення об'єкта через мікропризмову структуру

Іншою причиною, яка додатково призводить до зниження гостроти зору є те, що елементом корекції зору є не заломлююча призма великих розмірів з обов'язково присутнім явищем хроматизму, а мікропризмовою структурою Френеля, в якій присутня крім хроматизму і дифракція білого світла на регулярному мікрорельєфі. Внаслідок цього зображення ще більш розмивається в напрямку, перпендикулярному штрихам ґратки.

Математично явище хроматизму для мікропризми можна врахувати за допомогою звичайного закону Снелліуса з урахуванням залежності коефіцієнта заломлення n від довжини хвилі світла λ :

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

де φ_1 та φ_2 — кути розповсюдження світла в першому та другому середовищах.

Раніше [1] нами було детально досліджено інтерференційні явища для монохроматичного когерентного світла з довжиною хвилі $\lambda = 6328$ А. Врахування дифракційних явищ для білого світла виявляється більш складним. Фактично мікропризма Френеля являє собою дифракційну ґратку, ефективний крок якої при постійному кроці рельєфу зменшується зі зростанням призматичної сили елемента, а кут відхилення $\varphi = 0$ залежить від довжини хвилі λ . Для розрахунків було використано відомі формули для дифракційної складової структури променя світла для плоскої дифракційної ґратки [1]:

$$I(\lambda, \varphi) = I_0 (\sin(\pi S / \lambda) \sin \varphi / (\pi S / \lambda)), \quad (2)$$

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 [2].

Деякі результати розрахунків згідно (1), (2) для мікропризми, виготовленої з поліметилметакрилату ($n_e = 1,492$), призматичною дією $PD = 1,0$ та $PD = 30$ для довжин хвиль 4044 А, 5461 А, 6328 А і 7664 А світлового діапазону наведено на рис. 2.

Результати розрахунків свідчать, що при малих кроках рельєфу $W = 100$ – 200 мкм і при малих кутах мікропризм, що відповідають $PD < 5$ – 6 , розмиття зображення здебільш пов'язано з дифракцією світла на штрихах ґратки, і гострота зору зменшується внаслідок цього (рис. 2,а). Усунути цей небажаний ефект можливо шляхом збільшення кроку до $W = 800$ – 1000 мкм. У той же час, розрахунки для ве-

ликих кутів мікропризм ($PD > 20-22$) свідчать, що розмиття картини в цьому випадку пов'язано саме з дисперсією світла, а внесок дифракції малий. Тому зменшення кроку мікрорельєфу до $W = 600$ мкм порівняно з кроком $W = 800$ мкм істотно не змінює ширину зони розмиття зображення (рис. 2,б), але зі зменшенням кроку мікрорельєфу відповідно зменшується дискретність образу, що реєструє людське око, і тому підвищується гострота зору. Таким чином, оптимальним можна вважати виготовлення мікрорельєфу оптичних компенсаторів косоюкості саме з кроком $W = 500-600$ мкм.

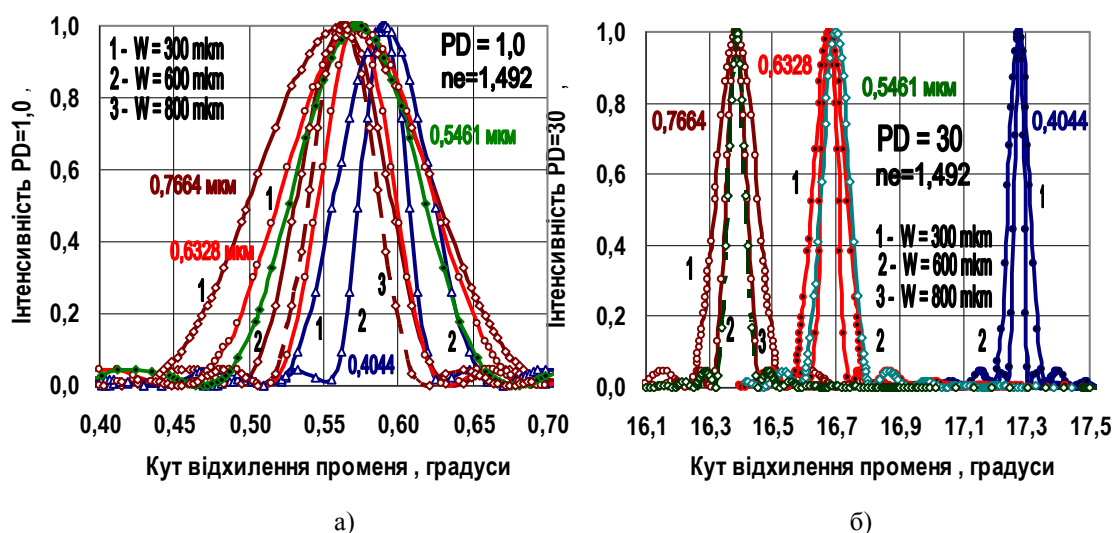


Рис. 2. Хроматичні ефекти для різних мікропризм:
1 — крок рельєфу $W = 300$ мкм; 2 — 600 мкм; 3 — 800 мкм

При спостереженні кольорових об'єктів людське око не однаково сприймає різні зони спектра світлового діапазону [3]. Так, якщо прийняти чутливість людського ока $K(\lambda)$ для довжини хвилі $\lambda = 5550$ А за одиницю, то наприклад, чутливість ока для $\lambda = 4600$ А та $\lambda = 6500$ А становить 0,06 та 0,10 відповідно. Тому при моделюванні дисперсійних явищ для мікропризмових елементів у офтальмології необхідно враховувати спектральну чутливість людського ока, або так звану відносну спектральну світлову ефективність $K(\lambda)$, графік якої наведено на рис. 3.

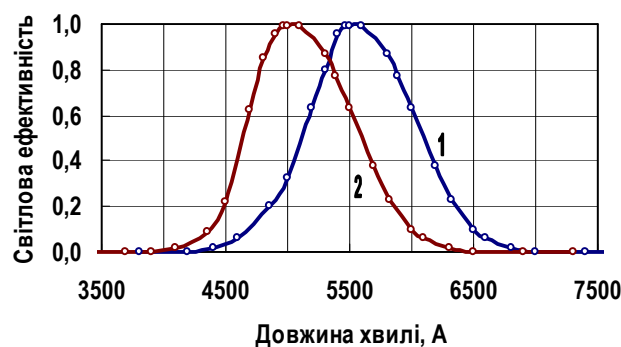


Рис. 3. Усереднена спектральна світлова ефективність: 1 — денне світло; 2 — сутінки

Якщо скорегувати проведені розрахунки дисперсійних явищ для мікропризмових елементів на усереднену криву чутливості зору $K(\lambda)$, то, наприклад, для мікропризми $PD = 30$ для декількох довжин хвиль у діапазоні $k_\lambda = (4600\text{--}6500)$ А, результати свідчать (рис. 4), що усереднене людське око практично не бачить світло з довжинами хвиль, коротшими за $\lambda < 4000$ А та довгими за $\lambda > 7000$ А. Тому реально зона хроматизму для мікропризми $PD = 30$ становить $0,4^\circ$ або близько $0,7 PD$, при тому, що кут $\varphi = 0$ для цієї призми становить $16,7^\circ$. Таким чином, зона розмиття зображення становить близько $2,3 \%$, що значно перевищує встановлені допуски на номінали мікропризмових елементів.

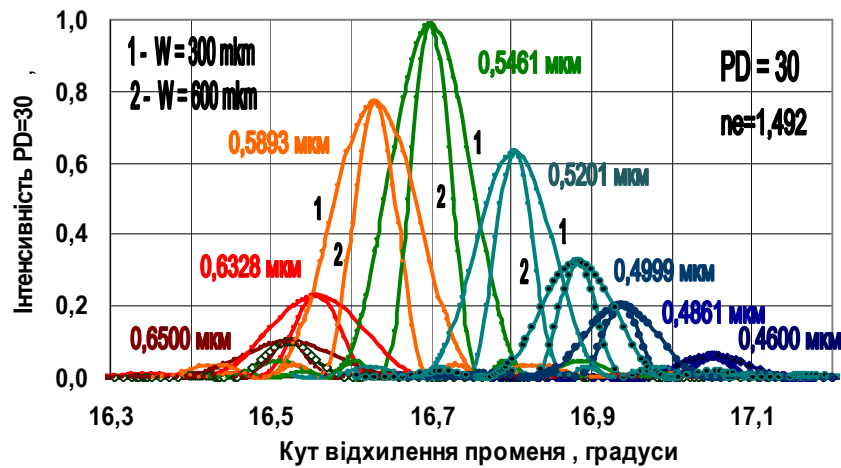


Рис. 4. Хроматичні ефекти для мікропризми $PD = 30$ з урахуванням коефіцієнта чутливості людського ока: 1 — крок рельєфу $W = 300$ мкм; 2 — $W = 600$ мкм

Самим простим засобом корекції хроматизму є використання відповідних світлофільтрів, які відсікають периферійні зони спектра. Підбір світлофільтрів необхідно здійснювати таким чином, щоб відрізалися саме червона та фіолетова зони, тому що всі стандартні дані щодо коефіцієнта заломлення n_e частіше за все наводяться саме для зелено-жовтої зони з довжиною хвилі $\lambda = 5461$ А [3]) (довжина хвилі «е»), і розрахунки величини призматичної дії елементів Френеля здійснювались раніше [1] саме для цієї області спектра.

Для розрахунків впливу світлофільтрів можна використати відомі формули для коефіцієнта пропускання світла τ' з урахуванням відбиття світла на двох поверхнях фільтра:

$$\tau'_\lambda = (1 - k_a)^2 \tau_\lambda = (1 - k_a)^2 (10 - k_\lambda h), \quad (3)$$

де k_a — коефіцієнт відбиття світла від границі розподілу; k_a — коефіцієнт поглинання світла з довжиною хвилі λ в матеріалі фільтра; h — товщина фільтра. Значення τ_λ та k_λ наведено, наприклад, у каталозі кольорового скла [4]. Графік залежності (3) для оптимальних у нашому випадку синє-зелених СЗС22 і СЗС23 в комбінації з жовтими ЖС17 та ЖС18 світлофільтрами наведено на рис. 5.

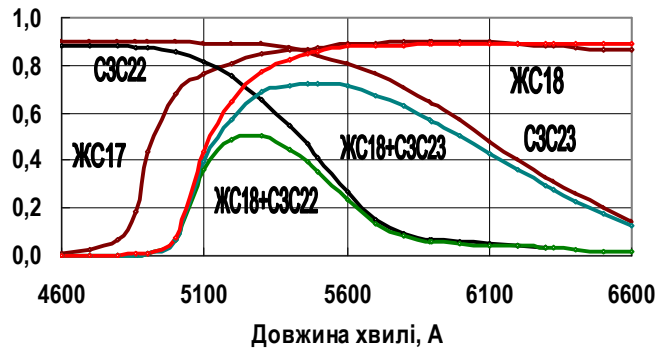


Рис. 5. Коефіцієнт пропускання τ_λ для деяких світлофільтрів

Результати розрахунків згідно (1), (2) з урахуванням (3) і світлової ефективності $K(\lambda)$ для комбінації світлофільтрів ЖС17+ЖС23 та ЖС18+ЖС22 наведено на рис. 6.

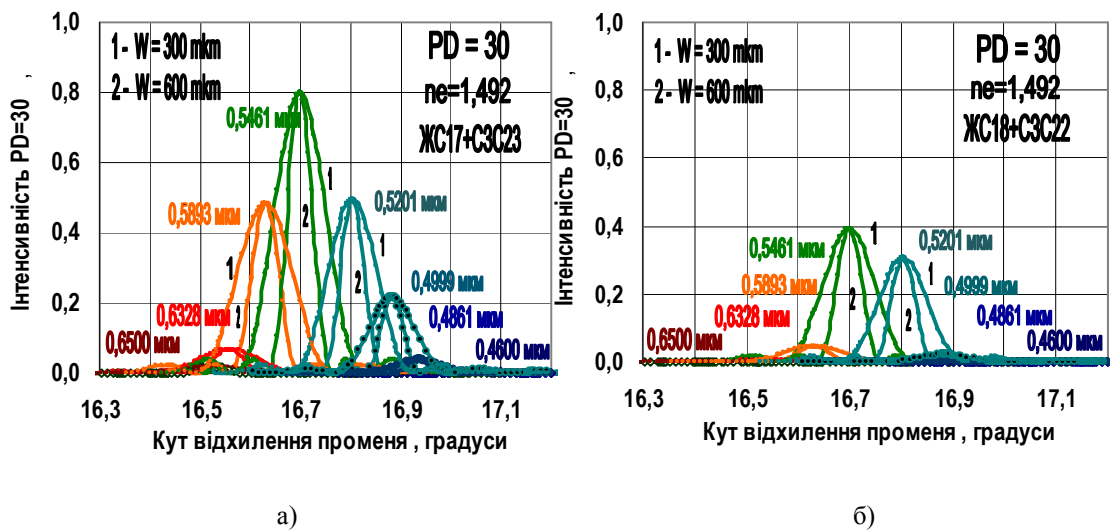


Рис. 6. Хроматичні ефекти для мікропризми $PD = 30$ при застосуванні різних комбінацій світлофільтрів: 1 — крок рельєфу $W = 300$ мкм; 2 — 600 мкм

Використання відповідних світлофільтрів дозволяє відрізати фіолетову та червону складові хроматизму, тим самим зменшити вплив дисперсії світла і відповідно підвищити гостроту зору. Однак, при цьому помітно зменшується освітленість об'єкта внаслідок поглинання світла в матеріалі фільтрів. Враховуючи, що діагностика дефектів зору лікарями-офтальмологами повинна здійснюватися в стандартних умовах при фіксованій освітленості пробної таблиці $E = 700$ лк, тому при застосуванні кольорових мікропризмових елементів необхідно відповідним чином збільшувати освітленість таблиці. Можна рекомендувати при діагностиці зору використовувати комбінацію світлофільтрів ЖС18+ЖС22. Однак більш зручним, безумовно, було б використання кольорових оптичних компенсаторів косо-

окості, які виготовляються безпосередньо з кольорових оптичних пластмас необхідної марки або з білого поліметилметакрилату з додаванням відповідних барвників з метою оптимізації оптичних властивостей мікропризмових структур.

У той же час відзначимо, що зазначене зниження гостроти зору безпосередньо не пов'язано з точністю вимірювань кута косоокості за допомогою мікропризмових лінз Френеля. Розрахунки свідчать, що крива хроматизму залежно від довжини хвилі з урахуванням спектральної ефективності людського ока практично симетрична відносно довжини хвилі $\lambda = 5461$ А (рис. 4). Оскільки всі розрахунки кутів заломлення мікропризм і величин призматичної дії елементів Френеля здійснюються саме для цієї зелено-жовтої зони спектра, зміщення зображення образу, який спостерігає пацієнт при діагностиці, також симетрично відносно розрахункового кута відхилення зображення $\varphi = 0$. Тому явище хроматизму в будь-яких мікропризмових структурах безумовно існує і може знижувати гостроту зору, але цей ефект суттєво не впливає на достовірність вимірювання кута косоокості.

Таким чином, досліджено вплив хроматизму на оптичні характеристики мікропризмових елементів корекції зору, отримано кількісні характеристики розширення зображення внаслідок дифракції білого світла на мікропризмах Френеля, запропоновано методи практичного розрахунку зазначених явищ та їхньої корекції.

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

2. *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>

3. *Анализ информации отраженного от ретрозеркал света* / В.В. Петров, В.Г. Кравец, А.А. Крючин [и др.] // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2005. — Т. 7, № 3. — С. 17–24.

4. *Вейнберг И.* Каталог цветного стекла [Электронный ресурс] / И. Вейнберг. — Режим доступа: <http://nehudlit.ru/books/detail8974.html>

Надійшла до редакції 02.03.2010