

УДК 617.751

Є. Є. Антонов

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

Хроматизм і кольорові фільтри для мікропризм Френеля

Розраховано модельну структуру білого світла для мікропризм з жовто-синіми та зелено-синіми фільтрами ЖС-17, ЖС-18 та ЗС-8, які використовуються для зменшення зони хроматичних аберацій. Досліджено вплив фільтрів на контраст і зону хроматизму оптичних об'єктів із використанням електронного методу реєстрації роздільної здатності тестових штрихових зображень. Отримані експериментальні дані підтверджують теоретичну можливість зменшення хроматичних аберацій мікропризм за допомогою кольорових світлофільтрів.

Ключові слова: жорсткі мікропризми Френеля, контраст зображень, гострота зору, хроматизм, кольорові фільтри.

Вступ

Мікропризми Френеля є пристроями з мікроструктурованою оптикою, що дозволяють точно контролювати рефракцію променів світла [1, 2]. Протягом останніх двох десятиліть мікропризми Френеля широко використовуються в офтальмології [3–6]. Такі пристрої привертають усе більший науковий інтерес як лікарів-офтальмологів, так і дослідників-оптометристів [5–8].

Застосування мікропризм Френеля завжди знижує роздільну здатність і контраст сформованих оптичних зображень [9–12]. При офтальмологічних застосуваннях завдяки цьому також зменшується гострота зору досліджуваних хворих, важливим фактором є саме контраст тестових офтальмологічних таблиць, оскільки гострота зору залежить від контрасту оптичних таблиць. Для вимірювання контрасту тестових зображень запропоновано новий електронний метод [13], який дозволяє точно виміряти роздільну здатність тестових зображень. За цим методом було отримано порівняльні оптичні характеристики [13] монопризм компанії «Gulden Ophthalmics» (США), гнучких плівок з мікрорельєфом «3МTMPress-OnTM» компанії «3М» (США) та модифікованих жорстких мікропризм із захищеним мікрорельєфом, розроблених і виготовлених Інститутом проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України [2]. Зараз такі пристрої широко використовуються в Україні для діагностики та лікування косоокості у дітей [8].

© Є. Є. Антонов

Основною причиною зниження контрасту є хроматизм білого світла, який виникає при рефракції променів різної довжини хвилі на призмочових поверхнях. Для зменшення зони хроматизму можна використовувати кольорові фільтри, які усувають синю та червону зони видимого спектра. Однак фільтри також впливають на контраст зображень, тому необхідно оцінити такий ефект кількісно. Основною метою даного дослідження було отримання зміни величини зони хроматизму та контрасту тестових зображень при використанні мікропризм Френеля зі світлофільтрами та без них. Це необхідно для відокремлення впливу призм і фільтрів на зниження контрасту, що важливо для діагностики захворювань очей [3, 4, 9, 10].

Експериментальна установка

Схема експериментальної установки для визначення впливу мікропризм на контраст та зону хроматизму оптичних об'єктів показана на рис. 1. Як джерело випромінювання було обрано стандартну лампу розжарювання типу А з яскравісною температурою $T_A = 2856$ °К (1). Для формування на екрані (7) зображень штрихових тестових об'єктів (3) МІРА # (2–5) [2], далі будуть позначатися ($M_2 - M_5$), використовувався проєкційний конденсор (4) з фокусною відстанню $f = 90$ мм і діаметром $D = 50$ мм, а також матове скло (2). Зображення (8) штрихових елементів об'єкта МІРА (3) на екрані імітують оптотипи тестових офтальмологічних таблиць з необхідним збільшенням (f_2/f_1), де f_1 та f_2 — відстані від конденсора (4) до об'єкта МІРА (3) та до екрана (7), відповідно. Досліджувані призми (5) встановлювались у заданому положенні на оптичній осі стэнда. Фільтри, зазвичай, розміщувались безпосередньо перед призмами.

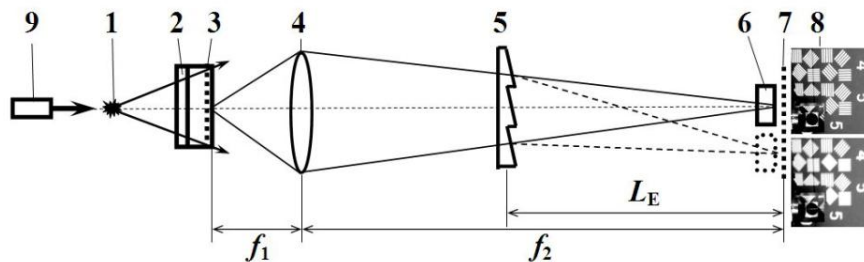


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 — джерело білого світла; 2 — матове скло; 3 — тестовий штриховий об'єкт МІРА; 4 — фокуруючий конденсор; 5 — досліджувані призми та фільтри; 6 — фотодетектор; 7 — екран; 8 — тестові зображення на екрані; 9 — лазер для юстирування

В області екрана (7) інтенсивність зображень (8) штрихів МІРА без фільтрів та з фільтрами реєструвалась фотоприймачем (6) для визначення впливу фільтрів на роздільну здатність V_A оптотипів. Як детектор зображень (6) використовувався кремнієвий фотодіод ФД288А [2] із щілинною діафрагмою шириною $S_R = 0,45$ мм. Діод переміщувався по екрану (8) для лінійного сканування зображень з точністю позиціонування ± 10 мкм. Для юстирування оптичної системи та визначення необхідних положень досліджуваних призм і фільтрів використовувався «зелений» лазер (9) з довжиною хвилі $\lambda = 0,532$ мкм.

Світловий потік проходить через досліджувані мікропризми (5), які розміщені на певній відстані L_E від екрана. Величина L_E визначалася з критерію подібності [2], який встановлює ідентичність даних традиційних офтальмологічних досліджень з результатами електронних вимірів інтенсивності тестових штрихів МІРА.

Фактично визначення роздільної здатності V_A здійснюється шляхом реєстрації змін контрасту k_A тестових оптотипів. Тому вплив фільтрів можна отримати безпосередньо з контрасту зображень. Значення контрасту k_A вимірювалися залежно від призматичної дії PD призм для певного тестового елемента M_K з лінійним періодом смуг D_A , який відповідає лінійному розміру зображення на екрані $D_S = D_A f_2 / f_1$, або кутовій роздільній здатності $\gamma_S = f(\lambda)$, з лінійною зоною хроматизму ΔD_S або кутовою зоною $\Delta \gamma_S$.

Експериментальні дані з контрасту

Зменшення роздільної здатності тестових зображень при використанні мікропризм було отримано раніше [9–12] традиційним методом опитування пацієнтів. Використовувалися стандартні тестові офтальмологічні таблиці з висококонтрастними оптотипами з контрастом $k_A = 96,0\text{--}98,0\%$. Найвні дослідження [8] впливу мікропризм на контрастну чутливість k_A також були проведені з використанням традиційних методів візометрії, тобто шляхом опитування пацієнтів, які розглядали оптотипи тестових таблиць. На рис. 2 (крива 1) наведені дані [8] щодо контрасту k_A для модифікованих мікропризм Френеля [2]. Зрозуміло, що точність методики вимірювань [8] була недостатньо високою, оскільки не помічено впливу на контраст k_A мікропризм з малою призматичною дією $PD = 5,0\text{--}18,0$ призматичних діоптрій (Δ).

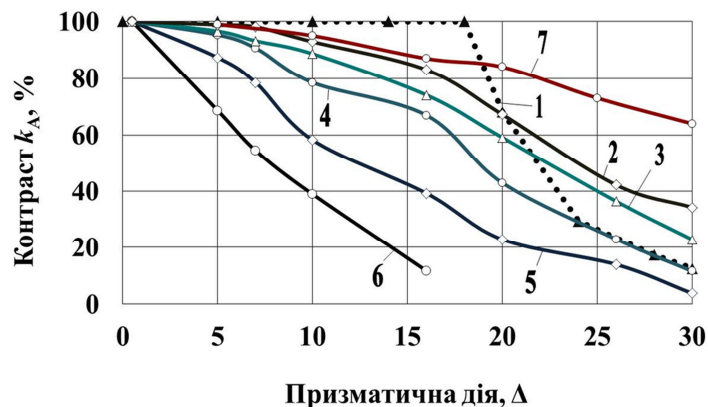


Рис. 2. Вплив мікропризм на контраст оптотипів: 1 — дані [8]; 2 — кут $\gamma_2 = 5,20'$, контраст $k_{A02} = 90,1\%$; 3 — $\gamma_3 = 4,37'$, $k_{A03} = 88,0\%$; 4 — $\gamma_4 = 3,47'$, $k_{A04} = 87,5\%$; 5 — $\gamma_5 = 2,45'$, $k_{A05} = 79,0\%$; 6 — $\gamma_6 = 1,55'$, $k_{A06} = 48,8\%$; 7 — $\gamma_7 = 5,20'$, $k_{A07} = 98\%$

Деякі наші дані щодо впливу модифікованих мікропризм Френеля на контраст k_A тестових зображень, які отримані електронним методом [13], також наведені на рис. 2 (криві 2–7). Початкові значення контрасту k_{A0} відповідають різним тестовим елементам H_j об'єкта МІРА M_4 [2], що мають різні періоди штрихів D_A і відповідні лінійні розміри D_S та кутові роздільні здатності γ_S їхніх зображень на

екрані. Досліджено оптичні типи M_4H_1 з кутовою роздільною здатністю $\gamma_2 = 5,20'$ і контрастом $k_{A0} = 90,1\%$ (крива 2); $\gamma_3 = 4,37'$, $k_{A0} = 88,0\%$ (крива 3); $\gamma_4 = 3,47'$, $k_{A0} = 87,5\%$ (крива 4); $\gamma_5 = 2,45'$, $k_{A0} = 79,0\%$ (крива 5) і з кутом $\gamma_6 = 1,55'$, $k_{A0} = 48,8\%$ (крива 6).

Наведені значення контрасту було отримано для відстані між призми та екраном $L_E = 51$ см. Для зручності криві 2–6 нормовані до початкового значення контрасту $k_{A0} = 100\%$. Найбільша кореляція з даними [8] (рис. 2, крива 1) спостерігалася для кривих 2–4, тобто для тестових штрихів з найбільшими кутовими відстанями $\gamma_S \approx 3\text{--}5'$, коли вплив хроматичних аберацій мінімальний.

Для визначення впливу дифракції на контраст k_A аналогічні дослідження були нами проведені для монопризм «Gulden Ophthalmics» (США), для яких немає дифракції. Ці дані також показані на рис. 2 (крива 7) для тестового елемента M_4H_{03} ($D_{A7} = 143$ мкм, $\gamma_7 = 5,20'$, $k_{A0} = 98\%$). Отриманий вплив монопризм помітно менший за дані [8], а також за наші результати для модифікованих мікропризм (криві 2–6). Цей факт, вочевидь, обумовлений відсутністю дифракційного впливу на контраст k_A для монопризм. Зниження контрасту k_{A7} (крива 7) забезпечує саме хроматизм білого світла, що в рівній мірі впливає на значення k_A як для мікропризм, так і для монопризм.

Отримані результати щодо зниження контрасту k_A детально розглянуто в роботі [14]. Основні висновки полягають в тому, що контраст оптичних типів на екрані не змінюється, доки зона хроматизму на екрані в лінійних ΔD_S або кутових $\Delta \gamma_S$ одиницях менш лінійного D_S або кутового γ_S періоду тестових штрихів.

Аналогічно, пацієнт не помічає зміни контрасту при встановленні мікропризм, доки розмір оптичних типів на його сітківці γ_C перевищує зону хроматичних аберацій $\Delta \gamma_C$. При збільшенні призматичної дії, коли $\Delta \gamma_C$ зростає і наближається до значення γ_C , контраст k_A за даними пацієнтів [8] починає зменшуватися.

При розміщенні мікропризм у стандартній тестовій офтальмологічній оправі на відстані $D_0 \approx 20$ мм від рогівки ока пацієнта з гостротою зору $V_C = 1,0$, що відповідає роздільній здатності $\gamma_C = 1,0'$, зона хроматизму такою ж шириною $\Delta \gamma_C = 1,0'$ на сітківці реалізується для мікропризм $PD \approx 14,0\text{--}20,0$ Δ. Отже, для призм більшої дії отримане зниження контрасту k_A обумовлено не тільки хворобою ока пацієнта, але й самими призмиами. Цей ефект слід враховувати шляхом спеціальних калібрувальних випробувань з призмиами для здорового ока з метою отримання даних для порівнянь результатів перед вимірюванням контрасту для хворого ока.

Математичне моделювання хроматичних явищ

Отримані результати свідчать, що основною причиною зниження контрасту та роздільної здатності зображень при використанні призм є хроматизм білого світла, який виникає при рефракції променів різної довжини хвилі на призмових поверхнях. Тому необхідні кількісні дані щодо цього ефекту та пошук шляхів його зменшення.

Явище хроматизму для будь-якої призмової структури можна визначити із закону Снелліуса [15] з урахуванням залежності показника заломлення n від довжини хвилі λ :

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

де φ_1 та φ_2 — кути проходження променів світла в призмі та в середовищі; $n_1(\lambda)$ та $n_2(\lambda)$ — показники заломлення для призми та для середовища для певної довжини хвилі λ . Використовуючи формулу (1), можна визначити зона хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ для будь-яких двох значень довжин хвиль λ_1 та λ_2 залежно від кута рефракції призми α_R :

$$\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R = \theta_{R1} - \theta_{R2} = \sin^{-1}\{\sin\alpha_R n_1(\lambda_1)/n_2(\lambda_1)\} - \sin^{-1}\{\sin\alpha_R n_1(\lambda_2)/n_2(\lambda_2)\}. \quad (2)$$

Для зменшення значення $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ використовуються відповідні кольорові фільтри [2]. Вплив фільтрів можна розрахувати, зменшивши світловий потік для певної довжини хвилі λ , що проходить через призму, на коефіцієнт пропускання світла фільтрами $\tau(\lambda)$. Для видимого діапазону спектра найбільш придатними для зменшення зони хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ є жовто-сині ЖС-17 та ЖС-18, синьо-жовто-зелені ЖЗС-18 та ЖЗС-19, а також зелено-синій ЗС-8 фільтри [2]. Характеристики цих фільтрів для їхньої товщини $\delta = 3,0$ мм наведені на рис. 3.

Для математичного моделювання явищ хроматизму видимий спектральний діапазон можна розподілити на декілька зон, наприклад, що відповідають лініям Фраунгофера в спектрі Сонця. Кутове положення $\gamma(\lambda)$ кожної лінії визначається показником заломлення $n(\lambda)$ для певної довжини хвилі λ . Використовувались значення $n(\lambda)$ з роботи [16]. Доцільно починати моделювання з мікропризми $PD = 30,0$ Δ, яка створює найбільшу зону хроматизму. Кути рефракції $\gamma(\lambda)$ кожної лінії λ розраховувались для призми з поліметилметакрилату (ПММА), який для $\lambda = 0,56$ мкм має показник заломлення $n_e = 1,492$, тобто заломлюючий кут призми $\alpha_R = 28,27713$ град. Дифракційне розширення для кожної довжини хвилі λ можна врахувати за відомими формулами для дифракції [15], розрахунки виконано для кроку мікрорельєфу $W = 600$ мкм.

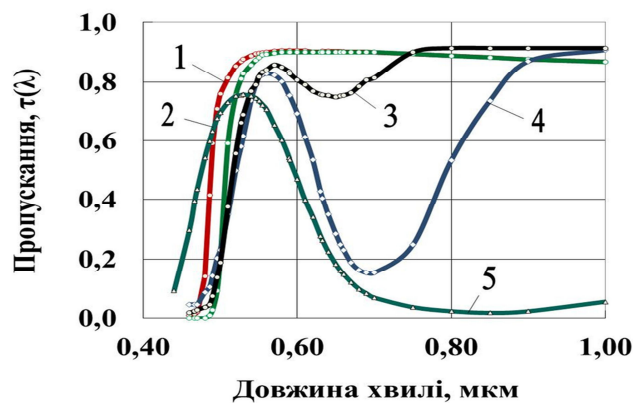


Рис. 3. Коефіцієнт пропускання $\tau(\lambda)$ для деяких фільтрів:
1 — ЖС-17; 2 — ЖС-18; 3 — ЖЗС-19; 4 — ЖЗС-18; 5 — ЗС-8

Реальний сонячний спектр у видимій області апроксимується функцією Планка $r(\lambda, T)$ з температурою $T_B = 5800$ °К [17]. Саме така функція $r(\lambda, 5800$ К) та усереднена спектральна чутливість ока людини $k_H(\lambda)$ [15] враховувались під час моделювання явищ хроматизму для людського ока. Відповідні дані щодо $n(\lambda)$ та $k_H(\lambda)$ наведені в таблиці.

Показник заломлення $n(\lambda)$ [16] та спектральна чутливість $k_H(\lambda)$ [15]

| λ , мкм | 0,4668 | 0,4861 | 0,4958 | 0,5270 | 0,5461 | 0,5600 | 0,5893 | 0,6328 | 0,6561 | 0,680 | 0,800 | 0,900 | 1,000 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $n(\lambda)$ | 1,499 | 1,497 | 1,496 | 1,494 | 1,493 | 1,492 | 1,490 | 1,489 | 1,488 | 1,487 | 1,484 | 1,483 | 1,482 |
| $k_H(\lambda)$ | 0,080 | 0,180 | 0,270 | 0,810 | 0,987 | 0,995 | 0,760 | 0,240 | 0,070 | 0,017 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Для спектрального діапазону $\lambda = 0,4668\text{--}0,6561$ мкм модельований дифракційний розподіл інтенсивності сонячного світла, як це бачить око людини, наведений на рис. 4 для випадку відсутності фільтрів (крива 1) та для жовто-синього ЖС-17 і ЖС-18 світлофільтрів (криві 2, 3). При моделюванні спектрів товщина фільтрів $\delta = 3,0$ мм.

Модельований розподіл спектра з фільтрами (криві 2, 3) практично не виявляє випромінювання з довжиною хвилі, меншою за $\sim 0,45$ мкм, тобто інтенсивність світла в зелено-синій області спектра значно зменшується. Таким чином, використання жовто-синіх фільтрів має зменшити зону хроматизму з боку «синьої» зони видимого спектра.

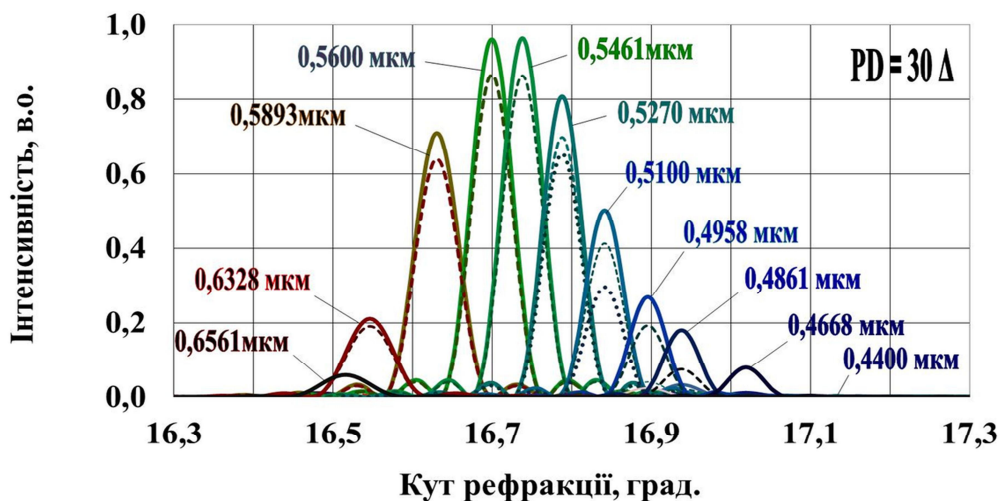


Рис. 4. Вплив жовто-синіх фільтрів на сформовані візуальні зображення:
1 — без фільтрів (суцільні лінії); 2 — фільтр ЖС-17 (тонкі пунктирні лінії);
3 — фільтр ЖС-18 (товсті пунктирні лінії)

Зона хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$, розрахована для видимого спектрального діапазону $\Delta\lambda_C = 0,4668\text{--}0,6561$ мкм для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$, зробленої з ПММА ($n_e = 1,492$ для $\lambda = 0,56$ мкм), дорівнює $\approx 0,51$ град. або в діоптріях $\approx 0,96 \Delta$. Для меншої призматичної дії зона $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ зменшується прямо пропорційно значенню Δ . З урахуванням спектральної чутливості ока $k_H(\lambda)$ діапазон $\Delta\lambda_C$ зменшується до значення $\Delta\lambda_H = 0,4861\text{--}0,6328$ мкм, а зона хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ для призми $PD = 30,0 \Delta$ — до $0,39$ град. або $\approx 0,75 \Delta$.

Відзначимо, що навіть така зона хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R = 0,75 \Delta$ значно перевищує встановлений допуск на номінал цієї мікропризми [2], який дорівнює $0,15 \Delta$, і при проведенні будь-яких досліджень стану зору, хроматичні аберації повинні якимось враховуватись у загальному спостережуваному зменшенні контрасту k_A .

При використанні світлофільтрів спектральний діапазон максимальної чутливості людського ока зменшується. На рис. 5 наведено модельований розподіл інтенсивності світла Сонця, як це бачить людське око, через призму $PD = 30,0 \Delta$ без фільтрів (крива 1) та з використанням фільтрів ЖС-17 (крива 2), ЖС-18 (крива 3) та ЗС-8 (крива 4). Кут рефракції $\gamma = 16,7$ відповідає довжині хвилі $\lambda = 0,56$ мкм.

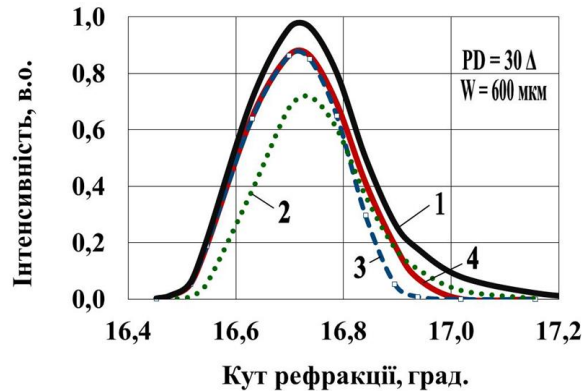


Рис. 5. Вплив світлофільтрів на зону хроматизму для призми $PD = 30,0 \Delta$:
1 — без фільтрів; 2 — фільтр ЖС-8; 3 — ЖС-18; 4 — ЖС-17

Модельований для людського ока спектр свідчить, що енергія випромінювання з жовто-синіми фільтрами дійсно може переміщуватися до довгохвильової зони спектра. Зокрема, для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ з фільтром ЖС-18 (крива 2) зона максимальної чутливості ока зміщена в червону область на $0,1$ град., або $\approx 0,16 \Delta$. Проте це невелике зміщення порівнянне з установленими допусками [2] на номінали мікропризм. Зелено-синій фільтр ЗС-8 (крива 3) більш помітно зменшує інтенсивність світла в червоній і синій зонах спектра, тому контрастність k_A зображень із цим фільтром відповідно збільшується.

При моделюванні хроматизму для випадку електронної реєстрації інтенсивностей слід враховувати реальну структуру білого світла, що використане при експериментах. Розподіл сонячного світла у видимій області у верхній частині атмосфери Землі [17] ілюструється на рис. 6 (крива 1) і може бути апроксимований інтенсивністю чорного тіла з температурою $T_B = 5800$ °К [17]. Функція Планка для $T_B = 5800$ °К показана на рис. 6 (крива 3). На рис. 6 (крива 2) також представлено сонячний спектр зі смугами поглинання H_2O на рівні моря. У наших експериментах як джерело випромінювання використовувалася лампа розжарювання компанії «Philips» типу А з вольфрамовою ниткою з яскравісною температурою $T_A = 2856$ °К. Її спектр показаний на рис. 6 (крива 4).

Крім того, необхідно враховувати спектральну чутливість $k_D(\lambda)$ реєструючого фотодіода замість усередненої спектральної чутливості $k_H(\lambda)$ ока людини. Для реєстрації інтенсивностей світла було обрано діод ФД288А [2] (рис. 7, крива 1) з найбільшою площею чутливості серед можливих кремнієвих фотодіодів ФД24К (рис. 7, крива 2), S10X10 (крива 3), LXD-44MQ (крива 4) та ВРW21R (крива 5).

Рис. 7 (крива 6) відображає спектральну чутливість $k_H(\lambda)$ усередненого людського ока вдень [15]. Для моделювання структури хроматизму також враховувалася

спектральна випромінювальна здатність $\varepsilon(\lambda, T)$ вольфраму [18] для $T = 2850$ °К (рис. 7, крива 7).

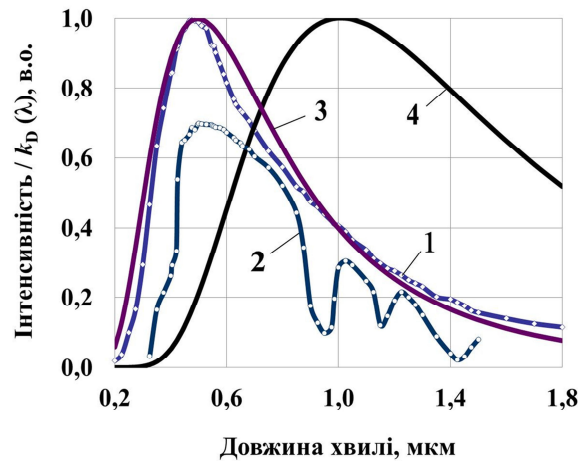


Рис. 6. Деякі розподіли білого світла: 1 — спектр Сонця поза атмосферою Землі; 2 — спектр Сонця на рівні моря; 3 — чорне тіло при $T_B = 5800$ °К; 4 — чорне тіло при $T_A = 2856$ °К

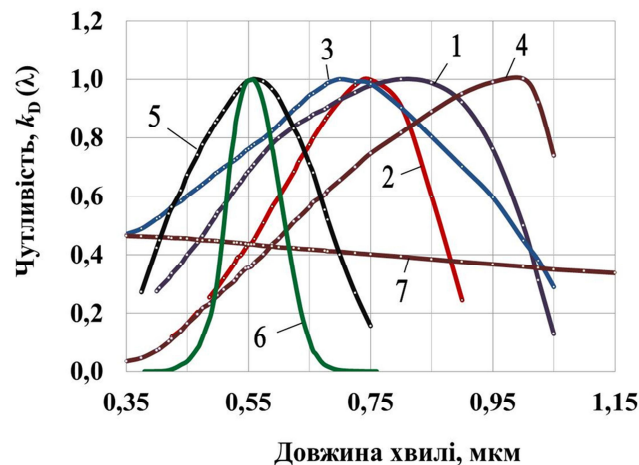


Рис. 7. Спектральна чутливість $k_D(\lambda)$ деяких фотодіодів: 1 — ФД288А; 2 — ФД24К; 3 — S10X10; 4 — LXD-44MQ; 5 — BPW21R; 6 — спектральна чутливість ока людини $k_H(\lambda)$; 7 — випромінювальна здатність $\varepsilon(\lambda, T)$ вольфраму для $T = 2850$ °К

Таким чином, розподіл інтенсивності білого світла на поверхні фотодетектора розраховувався за формулою:

$$r(\lambda, T) = \tau(\lambda) k_D(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) c_1 / \lambda^5 [\exp(c_2 / 2856) - 1]^{-1}, \quad (3)$$

де $\tau(\lambda)$ — коефіцієнт світлопропускання, який враховує поглинання світла та його відбиття від обох поверхонь призм і фільтрів [2]; $k_D(\lambda)$ — спектральна чутливість фотодіода ФД288А; $\varepsilon(\lambda, T) = 0,435$ — спектральна випромінювальна здатність вольфраму для $T_A = 2850$ °К [17]; константи $c_1 = 3,7418 \times 10^{-16}$ [Вт/м²] та $c_2 = 1,4388 \times 10^{-2}$ [м°К].

Модельований розподіл інтенсивності білого світла для реального джерела випромінювання для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ з кроком рельєфу $W = 600$ мкм без фільтрів (суцільні лінії) та з зелено-синім фільтром ЗС-8 (пунктирні лінії) наведено на рис. 8 для спектрального діапазону $\Delta\lambda = 0,44\text{--}1,00$ мкм, який відповідає кутам рефракції променів $\gamma = 17,07\text{--}16,31$ град. Розрахований розподіл білого світла для фотодіода помітно відрізняється від модельованої структури хроматизму для людського ока. Використання зелено-синього фільтра ЗС-8 (пунктирні лінії) помітно зменшує інтенсивність білого світла в червоній зоні спектра $\gamma = 16,5\text{--}16,6$ град., тому може зменшити хроматизм і для людського ока.

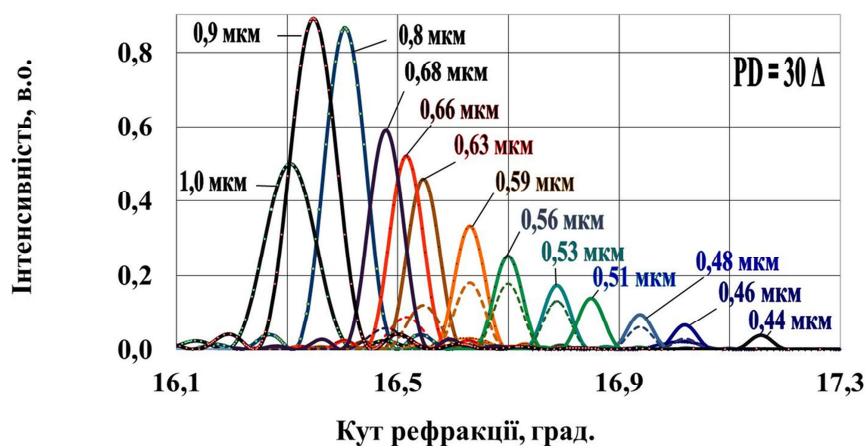


Рис. 8. Вплив зелено-синього фільтра ЗС-8 на модельовану структуру спектра: без фільтра (суцільні лінії); з фільтром (пунктирні лінії)

Більш чітко ефект фільтрів для спектрального діапазону $\Delta\lambda = 0,44\text{--}1,00$ мкм виявляється з розрахункових даних, які показано на рис. 9. Крива 1 відображає інтенсивності спектра, що отримані згідно формули (3) за відсутності фільтрів. Найбільший вплив на хроматизм пов'язаний з фільтром ЗС-8 в інфрачервоній і червоній зонах спектра (крива 2). Розрахований вплив світлофільтрів ЖС-18 і ЖС-17 у синій зоні (крива 3, 4) значно менший і навряд чи може бути зареєстрований експериментально.

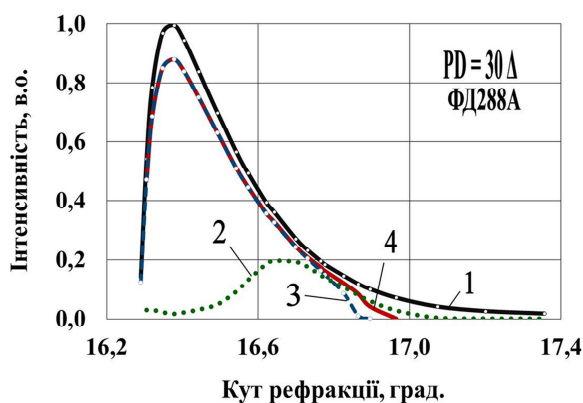


Рис. 9. Модельована структура хроматизму для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ для фотодіода ФД288А: 1 — без фільтрів; 2 — ЗС-8; 3 — ЖС-18; 4 — ЖС-17

Розрахунки свідчать, що зміна температури лампи розжарювання в діапазоні $T_A = 2600\text{--}3000\text{ }^\circ\text{K}$ не впливає істотно на модельовані спектри хроматизму. Тому похибки у вимірюванні яскравісної температури поверхні вольфраму в лампі розжарювання не привносить помітних змін у модельовані структури спектрів.

Експериментальні дані з хроматизму

Експериментальні дослідження впливу фільтрів на розподіл інтенсивності білого світла після призм здійснювалися на першому етапі методом [19], аналогічно вимірюванням роздільної здатності тестових штрихових зображень. Досліджено зображення на екрані найбільших оптичних тестових МІРИ M_5 [2] через мікропризми з фільтрами та без них. Досліджувані мікропризми розміщувалися на відстані $L_E = 50$ см від поверхні фотоприймача ФД288А з шириною реєструючої щілини $S_R = 0,45$ мм. Точність лінійного сканування складала 10 мкм. Для відстані $L_E = 50$ см, яка відповідає критерію подібності [2], це значення еквівалентно $\approx 0,002$ Δ . Всі експерименти проводилися з паралельним пучком білого світла. Фільтри мали товщину $\delta = 3,0$ мм і розміщувалися перед досліджуваними мікропризмами.

Розподіл інтенсивності зображень тестових штрихів M_5H_{01} на екрані без фільтрів для мікропризми $PD = 30,0$ Δ наведено на рис. 10,а (суцільна лінія). Аналогічні дані для $PD = 10,0$ Δ (суцільна лінія) показані на рис. 10,б. Невелика мікропризма $PD = 0,5$ Δ використовувалась в якості еталонної (пунктирні товсті лінії). Всі інтенсивності нормовані на 100 % для зручності порівняння результатів. Розподіл інтенсивності тестових штрихів для призми $PD = 0,5$ Δ на рис. 10,а показаний для кута рефракції призми $PD = 30,0$ Δ , тобто для кута $\gamma = 16,7$ град. Аналогічно, дані на рис. 10,б для призми $PD = 0,5$ Δ розміщені для кута рефракції для призми $PD = 10,0$ Δ , тобто для кута $\gamma = 5,7$ град.

Фільтри ЖС-17 та ЖС-18 зменшують інтенсивність світла, що проходить через них у видимій області, приблизно на 17–18 %, що пояснюється додатковим відбиттям світлового потоку від двох поверхонь фільтра і поглинанням синьої зони спектра.

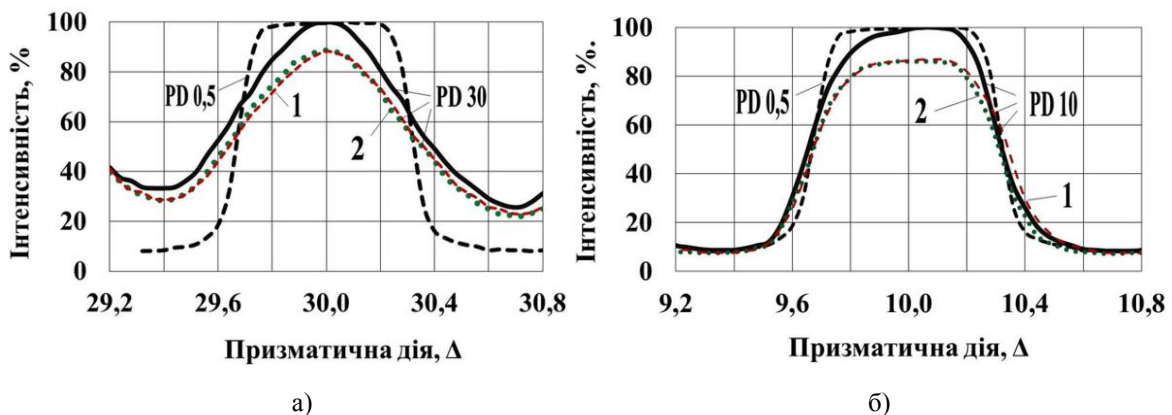


Рис. 10. Інтенсивності тестових штрихів M_5H_{01} для мікропризми $PD = 0,5$ Δ (товсті пунктирні лінії), $30,0$ Δ (а), $10,0$ Δ (б) без фільтрів (суцільні лінії) та з фільтрами ЖС-17 (крива 1 — тонкі пунктирні лінії) та ЖС-18 (крива 2 — крапки)

Однак отримані дані показали, що вплив обох фільтрів у випробуваних умовах практично ідентичний для досліджуваних призм. Крім того, вплив фільтрів на форму спектральних контурів інтенсивності, що нормовані на 100 %, взагалі відсутній (рис. 11).

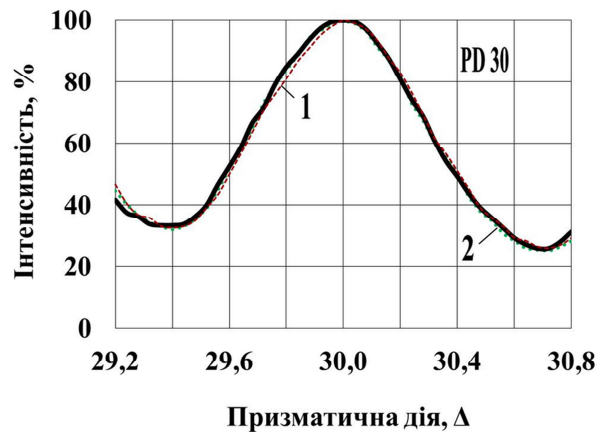


Рис. 11. Спектр тестових штрихів M_5H_{01} для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ без фільтрів (суцільна лінія), з фільтрами ЖС-17 (крива 1 — тонкі пунктирні лінії) та ЖС-18 (крива 2 — крапки)

Останнє явище можна пояснити суперпозицією різних зон зображення M_5H_{01} на поверхні фотоприймача. Наші розрахунки проводилися для різних спектральних зон, кожна з яких вважалася надзвичайно тонкою в порівнянні з напівширинами дифракційних контурів спектральних ліній. Експериментально зареєстровані на екрані контури хроматизму ΔD_A ширше відстані між тестовими штрихами D_A навіть для найбільшого тестового елемента M_5H_{01} . Отже, необхідно більш детально розглянути вплив апаратної функції реєстраційного пристрою та змінити умови експериментів.

Так, були проведені спеціальні експерименти зі стандартною спектральною щілиною типу УФ-2, яка використовується при спектроскопічних вимірюваннях [14]. Щілина УФ-2 розміщувалася на оптичній осі замість тестового об'єкта МІРА (рис. 1, позиція 3) та освітлювалася тим самим джерелом випромінювання чорного тіла з температурою $T_A = 2856 \text{ }^\circ\text{K}$. Були проведені експерименти для максимально можливої відстані $L_E = 67 \text{ см}$ для збільшення лінійного розміру зони хроматизму ΔD_S на екрані.

Експериментальна установка за своєю оптичною схемою, по суті, схожа на монохроматор, який має вхідну одиночну щілину УФ-2 з шириною S_D та реєструючу щілину S_R фотодетектора, яка розміщена в площині екрана. Зображення щілини УФ-2 проектується на екран з лінійним розміром $D_S = f_2 / f_1 S_D$. Коефіцієнт збільшення оптичної схеми $f_2 / f_1 \approx 20,5$, тому щілина з шириною $S_D = 15\text{--}120 \text{ мкм}$ формує світловий контур на екрані розміром $D_S = 0,31\text{--}2,46 \text{ мм}$ або в призмових діоптріях $\approx 0,046\text{--}0,365 \Delta$ при розміщенні призм на відстані $L_E = 67 \text{ см}$.

Апаратна функція $F_S(x)$ установки для різної ширини S_D щілини УФ-2 для відстані $L_E = 67 \text{ см}$ показана на рис. 12. Наведені експериментальні дані отримані для білого світла без призм і фільтрів.

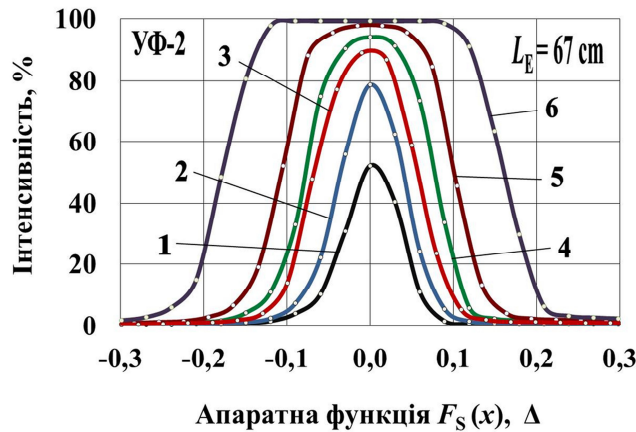


Рис. 12. Апаратна функція $F_S(x)$ експериментальної установки:
1 — $S_D = 10$ мкм; 2 — 20 мкм; 3 — 30 мкм; 4 — 45 мкм; 5 — 60 мкм; 6 — 100 мкм

Для отримання реального спектрального розподілу спектра на екрані $F(x)$ необхідно враховувати апаратну функцію нашої установки $F_S(x)$ із використанням відомої функції згортки [15]

$$F(x) = \int F_R(x') F_S(x - x') dx, \quad (4)$$

де $F(x')$ — досліджувана інтенсивність світла в точці x' , а $F_S(x - x')$ — апаратна функція нашої установки для $x = x'$.

Для великих значень S_D , коли $D_S = f_2 / f_1 S_D \gg S_R = 0,45$ мм на експерименті вимірюється не структура хроматизму, а апаратна функція $F_S(x)$ установки. Для $D_S \ll S_R$ реєструюча щілина S_R усереднює спектр світла в межах своєї ширини, але відображає в деякій мірі реальний розподіл спектра $F(x)$.

Для $D_S \approx S_R$ апаратна функція $F_S(x)$ є трикутною і легко обчислюється. Для реалізації цього випадку в наших умовах вхідна щілина УФ-2 повинна мати ширину $S_D \approx 22$ мкм. Однак відповідний розмір щілини на екрані $D_S = 0,45$ мм $\approx 0,07$ Δ для $L_E = 67$ см є набагато меншим порівняно з розрахунковою зоною хроматизму $\approx 0,9$ Δ для мікропризми $PD = 30,0$ Δ .

Щілина $S_D = 30$ мкм для призми $PD = 30,0$ Δ формує видимий людським оком контур хроматизму на екрані $\Delta D_A \approx 1,0$ Δ , який набагато більше, ніж апаратна функція $F_S(x)$. Тому можна вважати зареєстрований контур інтенсивності близьким до реального, і всі основні вимірювання біли виконані з шириною щілини $S_D = 30$ мкм без корекції отриманих даних на апаратну функцію $F_S(x)$. Призми розміщувалися на максимально можливій відстані $L_E = 67$ см, тому переміщення на екрані $\Delta D_S = 1$ мм для цього випадку еквівалентно $\Delta PD = 0,15$ Δ . Деякі з отриманих результатів для мікропризми $PD = 30,0$ Δ показані на рис. 15. Кутове положення $\gamma = 16,7$ град. відповідає довжині хвилі $\lambda = 0,56$ мкм.

Отриманий експериментально розподіл хроматизму (рис. 13) за структурою схожий на розрахункові дані, показані на рис. 9. Різниця в зоні малих кутів γ між даними на рис. 9 та рис. 13 пояснюється саме впливом апаратної функції стелу $F_S(x)$, особливо для інфрачервоної зони спектра ($\gamma = 16,1$ – $16,4$ град.). Розраховане зменшення області хроматизму $\Delta \gamma_S$ та її зміщення в червону зону для кутів $\gamma = 16,5$ – $16,9$ град. (рис. 5) не реєструється експериментально, це обумовлено

спектральною чутливістю $k_D(\lambda)$ використаного фотодіода ФД288А, яка має максимум при $\lambda = 0,8$ мкм або $\gamma = 16,39$ град. (рис. 7, крива 1). Експериментальні дані для ліній видимого спектра $\Delta\lambda = 0,46-0,65$ мкм ($\gamma = 16,5-16,9$ град.) з фільтрами та без них практично збігаються, результати важко аналізувати через дуже малі відмінності між інтенсивністю світла з фільтрами та без них.

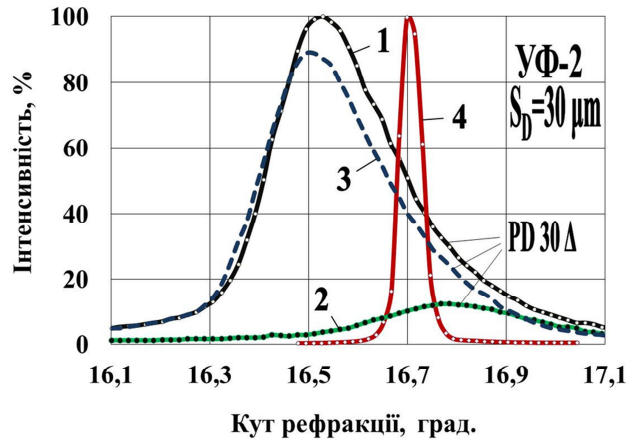


Рис. 13. Зона хроматизму на екрані для щілини УФ-2 для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$:
1 — без фільтрів; 2 — фільтр ЗС-8; 3 — ЖС-18; 4 — апаратна функція $F_S(x)$

Необхідні більш точні кількісні вимірювання з фотодіодами, подібними до типів S9219 (фірма «Hamamatsu», Японія) або BPW21R (фірма «Vishay», Польща) що імітують характеристики людського ока та мають максимальну спектральну чутливість на довжині хвилі $\lambda = 0,56$ мкм (рис. 10, крива 5). Розрахована структура хроматизму для діода BPW21R показана на рис. 14. Очікуваний ефект фільтрів у темно-синій зоні спектра ($\lambda = 0,41-0,48$ мкм або $\gamma = 16,8-17,1$ град.) може бути істотним.

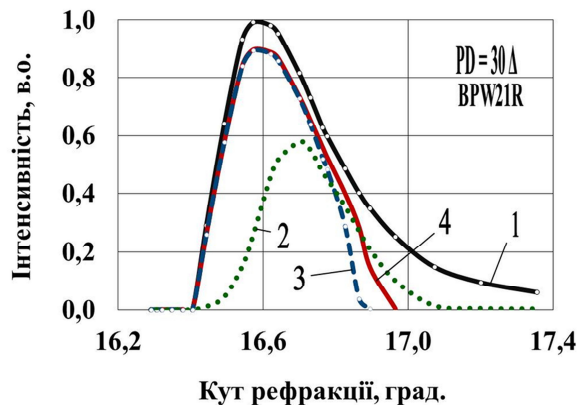


Рис. 14. Модельований розподіл білого світла для мікропризми $PD = 30 \Delta$ для фотодіода BPW21R: 1 — без фільтрів; 2 — ЗС-8; 3 — ЖС-18; 4 — ЖС-17

Реально отримані для фотодіода BPW21R експериментальні дані показали, що зменшення зони хроматизму при використанні фільтра ЖС-18 становить $\approx 0,2$ град., або ≈ 10 . Зелений фільтр ЗС-8 зменшує хроматизм майже в 3 рази (рис.

15). Різниця розрахункових даних і результатів вимірювань зумовлена відхиленням реальної спектральної чутливості діода BPW21R від паспортних даних.

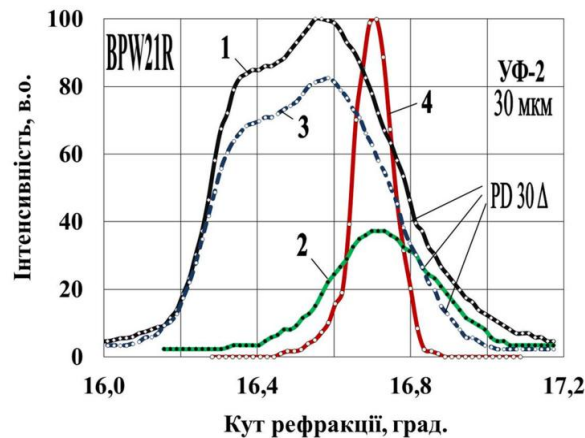


Рис. 15. Зона хроматизму на екрані для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ для фотодіода BPW21R: 1 — без фільтрів; 2 — фільтр ЗС-8; 3 — ЖС-18; 4 — апаратна функція $F_s(x)$;

Отримані експериментальні дані для видимого діапазону спектра безперечно показали можливість зменшення зони хроматизму мікропризм при використанні зелено-синього фільтра ЗС-8. Жовто-сині фільтри ЖС-17 та ЖС-18 також помітно зменшують зону хроматизму.

Отже, дослідження хроматичних явищ необхідно продовжити із використанням спеціальних фотореєструючих пристроїв, які імітують чутливість людського ока. Отримані дані для видимого спектра для діода ФД288А безперечно показали можливість зменшення зони хроматизму при використанні зелено-синього фільтра ЗС-8. Для жовто-синіх фільтрів ЖС-17 та ЖС-18 отримані сигнали знаходяться на рівні шумів. Проте експериментальні результати якісно підтвердили можливість зменшення зони хроматизму мікропризм за допомогою кольорових світлофільтрів.

Висновки

Досліджено вплив світлофільтрів на контраст тестових зображень, що сформовані мікропризмами Френеля. Математичне моделювання довело можливість значного зменшення зони хроматизму при використанні зелено-синіх фільтрів типу ЗС-8. Цей ефект, у свою чергу, збільшує контраст тестових зображень. Експериментальні дані також підтвердили зменшення зони хроматизму мікропризм при використанні жовто-синіх фільтрів ЖС-17 та ЖС-18. Отримані дані важливі тому, що жовті фільтри використовуються на практиці саме для збільшення контрасту зображень. Кількісний вплив кольорових фільтрів на зону хроматизму та на контраст тестових зображень необхідно додатково дослідити за допомогою фотореєструючих пристроїв, що більш точно імітують спектральну чутливість людського ока.

1. Fu M.L., Hu W.J., Le Z.C., Manko D.Y., Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Petrov V.V. Design and Fabrication of Rigid Fresnel Prisms for Complex Treatment of Strabismus in Children. *Guangzi Xuebao / Acta Photonica Sin.* 2017. 46. P. 18–25.

2. Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Fu Mingley, et al. Microprisms: Optical Parameters and Monitoring. Kyiv: Akadempriodyka, 2015. 146 p.
3. Choi K., Chung S., Lee K. The Prismatic Effect on Stereoacuity in Intermittent Exotropia. *Yonsei Medical Journal* 2010. **51**(1). P. 117–120.
4. Jivraj I., Pate V. Treatment of Ocular Motor Palsies. *Curr Treat Options in Neurol.* 2015. **17**(3). P. 1–15.
5. Shishavan A.A., Nordin L., Tjossem P., Abramoff M.D., Toor F. PMMA-based ophthalmic contact lens for vision correction of strabismus, Metamaterials, Metadevices, and Metasystems. International Society for Optics and Photonics. 2016.
6. Rowe F.J., Conroy E.J., Bedson E., et al. A pilot randomized controlled trial comparing effectiveness of prism glasses, visual search training and standard care in hemianopia. *Acta Neurologica Scandinavica*. 2017. **136**(4). P. 310–321.
7. Jung J.H., Peli E.. Impact of high power and angle of incidence on prism corrections for visual field loss. *Optical Engineering*. 2014. **53**(6). P. 061707.
8. Mellina V. Effect of Modified Fresnel Prisms on Visual Acuity and Contrast Sensitivity in Children. *Archive of Ukrainian Ophthalmology*. 2016. **4**(1). P. 36–39 (in Ukrainian).
9. Katz M. Contrast sensitivity through hybrid diffractive, Fresnel, and refractive prisms, *Optometry Journal of the American Optometric Association*. 2004. **75**(8). P. 509–516.
10. Katz M. Visual Acuity through Fresnel, Refractive and Hybrid Diffractive/Refractive Prisms. *Optometry Journal of the American Optometric Association*. 2004. **75**(8). P. 503–508.
11. Wright D., Firth A.Y., Buckley D. Comparison of the visual effects of Fresnel prisms in normal and amblyopic eyes. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology & Strabismus*. 2008. **12**(5). P. 482–486.
12. Griffiths H.J., Cotton S.H. A Comparison of the Effect of 3M Fresnel Prisms and Trusetal Prism Foil on Visual Function. *British and Irish Orthoptic Journal*. 2010. **7**. P. 45–48.
13. Petrov V.V., Antonov E.E., Fu M.L., et.al. Investigation of optical characteristics of rigid protected and traditional elastic Fresnel microprisms using electronic method for measuring visual acuity. *Optics and Laser Technology*. 2018. **107**. P. 15–23.
14. Риков С.О., Антонов Є.Є., Мелліна В.Б., Алєєва Н.М. Вплив модифікованих мікропризм Френеля на контрастну чутливість органу зору. *Архів офтальмології України*. 2017. **5**(1). С. 44–49.
15. Wolf E., Born M. Principle of Optics. Cambridge Univ. Press., 1999.
16. Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*. 2009. **116**. P. 585–587.
17. Allen C.W. Astrophysical Quantities. 3rd.ed. The Athlone Press, University of London, 1973.
18. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник/под ред. А.Е.Шейндлина. Москва: Энергия, 1974, 472 с.
19. Є.Є.Антонов. Роздільна здатність і призматична дія мікропризмових елементів Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2013. Т. 15. № 2. С. 7–16.

Надійшла до редакції 28.02.2019