

УДК: 535.241.5

Є. Є. Антонов

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

Роздільна здатність і призматична дія мікропризмових елементів Френеля

Розглянуто методи вимірювання гостроти зору та роздільної здатності тестових таблиць в офтальмології та фізиці. Створено експериментальний стенд для вимірювання роздільної здатності зображень з використанням штрихових мір. Досліджено залежність роздільної здатності зображень, що формуються за допомогою мікропризмових елементів Френеля, від величини призматичної дії таких елементів. Запропоновано алгоритм визначення гостроти зору за роздільною здатністю тестових зображень.

Ключові слова: мікропризмовий елемент, тестова штрихова міра, гострота зору, кут заломлення, коефіцієнт відбиття, дифракція світла, хроматизм.

Однією з найважливіших характеристик мікропризмових елементів Френеля є роздільна здатність зображень, що формуються за їхньою допомогою. При використанні таких елементів у офтальмології це особливо важливо, тому що роздільна здатність визначає гостроту зору, яку виявляє пацієнт при обстеженнях, а від правильного визначення гостроти залежить відповідне лікування захворювань органу зору.

Гострота зору залежить від багатьох факторів: оптичної якості матеріалу мікропризм, дефектів всередині та на поверхні, внутрішніх напружень, що призводять до локальних змін показника заломлення матеріалу. Існують також суто фізичні фактори: дифракція на мікрорельєфі та хроматичні ефекти внаслідок дисперсії білого світла.

Вплив хроматизму та дифракції на роздільну здатність зображень було детально розглянуто в роботі [1]. Визначено що такий вплив може бути досить значним для мікропризм з призматичною дією $PD \geq 20\text{--}30$ призмових діоптрій (Δ). На рис. 1. наведено приклад розрахунків хроматичних явищ для мікропризми $PD = 30\Delta$ (а) та залежність величини зони хроматизму (б) для променів з довжиною хвилі $7650\text{--}4050 \text{ \AA}$ від величини призматичної дії Δ за даними [1].

© Є. Є. Антонов

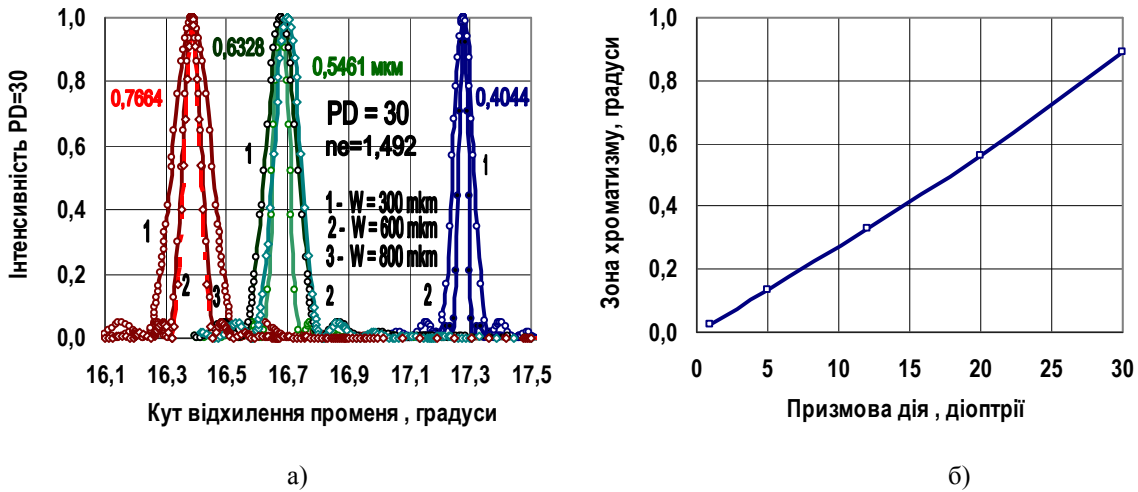


Рис. 1. Приклад розрахунків хроматичних явищ для призми $PD = 30\Delta$ (а) та залежність величини зони хроматизму від величини призматичної дії (б)

Для зменшення впливу хроматичних ефектів у роботі [1] було запропоновано декілька методів, а саме: 1) використання кольорових світлофільтрів; 2) рефракційно-дифракційні ґратки; 3) використання для виготовлення мікропризм оптичних матеріалів з великим числом Аббе:

$$K_{AB} = (n_D - 1)/(n_F - n_C) * 100, \quad (1)$$

де n_D — коефіцієнт заломлення для зеленої зони спектра; n_F — коефіцієнт для синьої зони; n_C — коефіцієнт для червоної зони. Найчастіше для виготовлення елементів використовується поліметилметакрилат ($K_{AB} = 58$) та пластик CR-39 ($K_A = 58$), у той час як для полікарбонату коефіцієнт Аббе $K_{AB} = 32$, для полістиролу — $K_{AB} = 30$, для матеріалу SAN значення $K_{AB} = 36$ [2].

Метою роботи є детальні дослідження впливу величини призматичної дії мікропризмових елементів Френеля на роздільну здатність зображень, що формуються за допомогою таких елементів..

Вимірювання гостроти зору в офтальмології

В офтальмології широко використовується поняття гостроти зору V , що визначається величиною мінімального кута розрізнення ока або мінімальною відстанню між двома точками образу, за якою точки образу сприймаються оком пацієнта окремо (minimum separabile) [3]. Фактично це є роздільна здатність образу. Однак на практиці найчастіше використовують здатність органа зору розрізняти дрібні елементи образу (minimum visibile). Для визначення цієї величини в офтальмології використовують спеціальні тестові таблиці з певними знаками стандартних розмірів, так званими опто типами (літерами алфавіту, певними символами, кільцями або фігурами).

Існують різні системи побудови таких таблиць. У країнах СНГ найчастіше використовуються відомі таблиці Сивцева-Головіна [4], які створені за принципом десятичної арифметичної прогресії, при цьому гостроті нормального зору $V_C = 1,0$ відповідають літери або кільця, які видно під кутом $\gamma = 5$ кутових хвилин ($5'$), а їхні дрібні деталі — під кутом $\gamma = 1'$ з відстані $d = 5$ м. Це відповідає можливості індивідууму розділити на цій таблиці, наприклад, два штриха літери «Ш», відстань між якими становить $1'$, або в лінійних одиницях — $1,4441$ мм. Висота літер, які відповідають значенню $V_C = 1,0$, становлять $H \sim 7,25$ мм, відповідні розміри всіх букв або кілець у відповідних строках таблиці для інших значень гостроти зору V_C визначаються як $H = G/V$.

Існує й інша таблиця для відстані 5 м, розроблена Монуайе за принципом арифметичної прогресії. Таке значення вибрано тому, що для людського ока при еметропії нескінченність починається саме на цій відстані, і при розташуванні предмета не ближче 5 метрів на сітківці ока збираються практично паралельні промені. Зазвичай діагностика гостроти зору V_C починається з визначення верхньої строки таблиці, яку пацієнт чітко бачить з відстані 5 м, при цьому дослідження проводять для кожного ока окремо: спочатку визначають гостроту зору правого (OD), потім лівого (OS).

В англійських країнах широко використовуються таблиця, яка вперше була розроблена за принципом «minimum visibile» Г. Снелленом [4]. У таблиці Снеллена кожна літера спостерігається під кутом 5 кутових хвилин ($5'$), а її мінімальні деталі — під кутом $1''$ для певної відповідної відстані d . Гострота зору визначається у вигляді дроби $V_S = d/D$, де в чисельнику стоїть відстань d , з якої розглядається таблиця (зазвичай 20 футів $\sim 6,1$ м), а в знаменнику — відстань D , з якої пацієнт з гостротою зору $V_S = 1,0$ повинен розрізняти деталі літер певного рядка таблиці під кутом $\gamma = 1'$. Для метричних таблиць Снеллена всі відстані вимірюються в метрах, у цьому випадку $d = 6$ м, і значенню $V_S = 20/20$ відповідає величина $V_S = 6/6$. Перехід від дробів Снеллена до десятичних дробів Сивцева-Головіна здійснюється простим діленням чисельника на знаменник, тобто гостроті зору $V_S = 20/20$ або $V_S = 6/6$ відповідає величина $V_C = 1,0$, а наприклад, значенню $V_S = 20/200$ дорівнює $V_C = 0,1$.

Існують і таблиці, що побудовані за принципом геометричної прогресії, які вважаються найбільш точними для визначення гостроти зору для $V_C \leq 0,5$. Однак відзначимо, що для всіх цих різних таблиць є одна спільна риса — знаки рядка, які відповідають гостроті зору $V_C = 1,0$ і спостерігаються оком під кутом 1 кутова хвилини. Такому куту спостереження відповідає зображення тестових знаків на задній поверхні сітчатки ока розміром $D_E \approx 10$ мкм.

Іншою важливою характеристикою для визначення гостроти зору є контрастність K_A зображень на тестових таблицях, яка вимірюється наступним чином [5]:

$$K_A = (I_F - I_A)/I_F * 100 \%, \quad (2)$$

де I_F — інтенсивність фону таблиці, а I_A — інтенсивність певного опто типу. Значення K_A залежить від яскравості таблиці F_T . Встановлено, що F_T повинна становити не менш ніж 160 кд/м², що відповідає освітленості 150 – 300 лк [4, 5], яка залежить від коефіцієнта відбиття світла від фону таблиці. Вважається, що наступне

збільшення значення F_T не впливає на величину контрастності зображення та на гостроту зору. Стандартне значення контрастності тестових таблиць K_A становить 95–97 %.

Відзначимо, що в усіх випадках на практиці визначається не мінімальний кут розрізнення зорового образу, а вимірюється в умовних одиницях досить абстрактна величина гостроти зору V , причому виключно суб'єктивним способом через тестові таблиці на основі опитувань вражень пацієнтів. При цьому результати таких опитувань залежать від багатьох чинників, перш за все, освітленості таблиць, контрастності літер на загальному фоні, часу розглядання оптичних фізичного стану і навіть індивідуальних особливостей пацієнтів, тому що діаметр колбочок на очному дні у різних людей різний, і чим менший цей діаметр, тим гострота зору краще. Таким чином, процедура визначення гостроти зору в офтальмології досить консервативна і за своєю суттю суб'єктивна.

Використання для корекції зору окулярів з лінзами та мікропризмовими елементами також впливає на гостроту зору пацієнтів, тому що, перш за все, змінюється освітленість зорового образу внаслідок відбиття частини світла від поверхні лінз окулярів.

Певно, першим послідовним дослідженням проблеми визначення гостроти зору в офтальмології при використанні мікропризм Френеля залежно від величини їхньої призматичної дії є робота Сюзанни Вероні-Тротман [6] з Нью-Йоркського Медичного університету. Автор [6] досліджувала роздільну здатність звичайних скляних призм, так званих «вафельних» жорстких призм з акрилу, та гнучких мембранних мікропризм з полівінілхлориду силою 5Δ, 8Δ, 10Δ, 12Δ, 15Δ, 20Δ, 25Δ та 30Δ методом клінічного обстеження 25-ти пацієнтів віком від 6-ти до 39-ти років, які мали гостроту зору $V_S = 20/20$ за тестовою таблицею Снеллена з корекцією та без корекції зору. Пацієнти у випадковому порядку коментували ефект призм, результати аналізувалися незалежними експертами та оброблялися біостатистиком [6].

Відома таблиця зниження гостроти зору Л.К. Дембського [7] з Кримського центру реабілітації зору, який аналогічним традиційним методом обстеження пацієнтів визначив зниження гостроти зору при використанні перших експериментальних зразків мікропризм Френеля, виготовлених у 2007–2008 рр. в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України. Деякі з результатів вимірювань Л.К. Дембського наведено в таблиці.

Призмові діоптрії, Δ	Зниження гостроти зору, %
5	10
7	10
10	20
15	40
20	50
25	60
30	70

Аналогічні дослідження заниження гостроти зору V_C при використанні мікропризм традиційним методом призмової страбометрії з тестовими таблицями виконувала М.В. Шевколенко [8] з Центру мікрохірургії ока (м. Київ). Заниження гостроти зору з призмою 30Δ становило 0,3–0,6 при гостроті зору $V_C = 0,8–1,0$. При цьому призми більше впливали на гостроту зору з великими значеннями V_C . Призми силою від 1,0 Δ до 10,0 Δ практично не впливали на величину V_C .

В останні роки С.К. Демьянченко з колегами [9] роздільну здатність інтраокулярних лінз (ІОЛ) вивчали шляхом спостереження на мікроскопі зображень тестового об'єкта, так званої штрихової міри [10] через досліджувані лінзи. Роздільна здатність ІОЛ визначалась через найменші штрихи міри, які були чітко видимі через випробувану лінзу. Однак автори не навели кількісних характеристик роздільної здатності лінз і введеного ними поняття «чіткої видимості» [9], а знову визначили лише якісно кращі та гірші зразки лінз.

Фізичні основи вимірювання роздільної здатності

Спробуємо звести суб'єктивні поняття «гостроти зору» та «чіткої видимості» до яких-то певних фізичних величин і навести кількісні критерії оцінки роздільної здатності мікропризмових елементів.

У фізиці роздільна здатність оптичної системи або зображення визначається кількістю штрихів на міліметр зображення об'єкта або зорового образу. Роздільна здатність оптичних приладів принципово обмежена дифракцією на об'єктиві: видимі точки фактично є дифракційними плямами. Дві сусідні точки є розділеними, якщо мінімум інтенсивності між ними достатній, щоб його можна було розгледіти. Було введено емпіричний критерій розділення Релея [11], який визначає відповідну мінімальну кутову відстань між точками:

$$\sin \theta = 1,22 (\lambda/D), \quad (3)$$

де θ — кутова роздільна здатність (мінімальна кутова відстань); λ — довжина хвилі; D — діаметр вхідної апертури оптичної системи (найчастіше він збігається з діаметром об'єктива).

Аналогічний критерій існує і для оптичних пристроїв з нанесеним рельєфом, наприклад, дифракційних ґраток, або для оптичних зображень, а також для розрізнення ліній у спектрі. Аналогічно (3) дві близькі спектральні лінії вважаються розділеними, якщо максимум однієї лінії співпадає з мінімумом іншої лінії. Величина провалу між лініями в цьому випадку для Гаусової форми ліній [11] становить приблизно 0,20 від максимуму, тобто визначена згідно (2) контрастність розділених ліній у спектрі $K_A \approx 20\%$.

Експериментальне визначення роздільної здатності оптичних систем зазвичай проводиться шляхом фотографування спеціального тестового об'єкта — міри [10]. При цьому для визначення впливу на роздільну здатність кожного певного параметра вимірювання проводять в умовах, коли похибки від решти параметрів істотно малі.

У нашому випадку для визначення впливу мікропризм на гостроту зору, будемо використовувати зображення на екрані різних елементів такого штрихового

тестового об'єкта. Зміни роздільної здатності зображень можна за певних умов ототожнити з гостротою зору. Погіршення роздільної здатності зображень внаслідок використання мікропризм будемо визначати відповідними змінами кутів спостереження γ , при цьому відносну роздільну здатність будемо визначати через кутові розміри відповідних штрихових елементів, які відповідають критерію (3) роздільної здатності ліній Релея [11].

Стенд для експериментального дослідження роздільної здатності

На основі проведених розрахунків оптичної системи було створено спеціальний стенд для вимірювань роздільної здатності тестових зображень (рис. 2). Особливу увагу було приділено максимальній ідентичності оптичних параметрів стенда умовам традиційних з використанням тестових офтальмологічних таблиць досліджень гостроти зору.

Джерелом випромінювання була лампа розжарювання типу А з температурою яскравості $T_a = 2754$ °С, яка використовується при традиційних спектроскопічних вимірюваннях. Для формування на екрані тестових штрихів, аналогічних зображенню літери «Ш» з офтальмологічних таблиць, використовувалися тестові міри №№ 2–5 [10]. Зображення штрихів формувалося на екрані за допомогою прецизійного проєкційного об'єктива ЛОМО з фокусом $F = 90$ мм. Кут зображення становив 1,5 кутові хвилини, що відповідає кутам спостереження тестових таблиць.

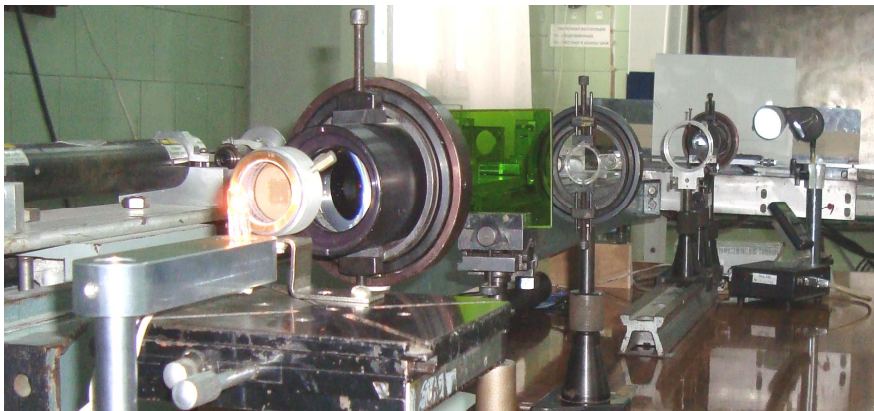


Рис. 2. Загальний вигляд експериментального стенда для досліджень роздільної здатності зображень

Приймачем випромінювання було обрано кремнієвий фотодіод ФД288А з прецизійною щілинною діафрагмою шириною $B = 450$ мкм, який може переміщуватися вздовж зображення на екрані та дозволяє здійснювати його лінійне сканування з точністю позиціонування ± 10 мкм. Для юстирування оптичної системи та визначення необхідного положення мікропризмових елементів використовувався напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі $\lambda = 530$ нм.

Проблемою при вимірюваннях роздільної здатності зображень є істотна різниця у спектральній чутливості людського ока (СХО) та світлової ефективності

фотоприймача ФД288, тобто людське око бачить зовсім іншу картину, ніж фотоприймач. Зображення для різних довжин хвиль розмиваються та перекриваються внаслідок хроматизму білого світла. Людське око розрізняє їх, оскільки вони мають різний колір, у той час як фотоприймач реєструє різнокольорові зображення як однакові, лише з різною спектральною чутливістю. Для ілюстрації цього на рис. 3,а наведено зображення тестового об'єкта через мікропризму силою $PD = 20\Delta$ на поверхні фотодіода, а на рис. 3,б — сканування цього самого зображення щілиною фотодіода: темний фон і зображення штрихів тестового об'єкта фотодіод реєструє досить впевнено, але кольорове червоно-синє зображення фону відображається єдиним загальним піком інтенсивності.

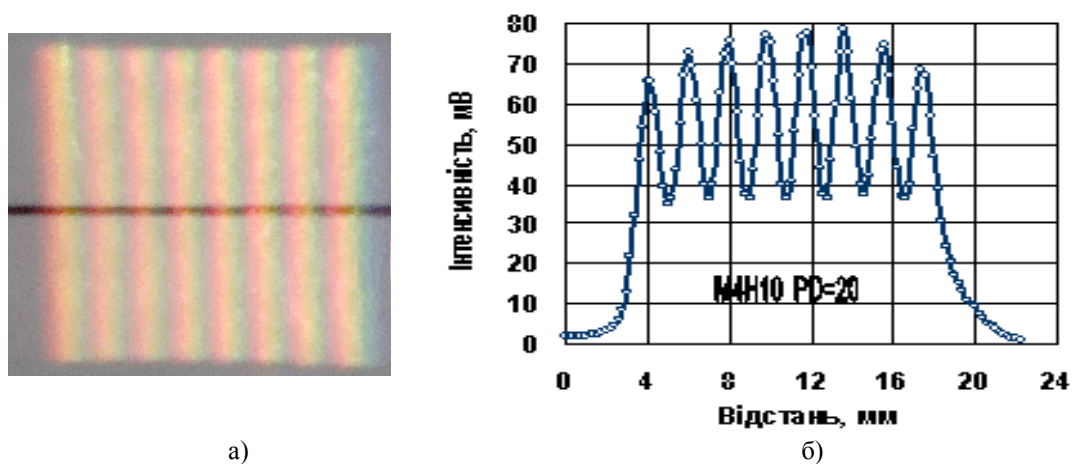


Рис. 3. Зображення тестового елемента М4Н10 через мікропризму $PD = 20\Delta$ на фотодіоді (а) та сканування цього зображення щілиною (б)

Спектральні характеристики ока людини та фотодіода наведено на рис. 4: фотодіод ФД288А має максимальну чутливість в далекій червоній частині видимого спектру (рис. 4, ФД288), у той час як максимум чутливості ока людини лежить в зеленій області $\lambda \sim 555$ нм (рис. 4, СХО).

Для адаптації спектральної характеристики фотоприймача до кривої чутливості людського ока в разі освітлення об'єкта джерелом типу А найчастіше використовується комбінація кольорових світлофільтрів ЗС8 та ЖЗС18 певних товщин [11]. Характеристики цих фільтрів також наведено на рис. 4. Зазначені світлофільтри мають значний коефіцієнт поглинання за межами області пропускання, є неселективними і мають малий коефіцієнт поглинання в робочій спектральній області. За допомогою обраних світлофільтрів можливе виділення необхідного спектрального діапазону. Однак використання такої комбінації світлофільтрів майже на порядок величини зменшує загальну інтенсивність сигналів, що реєструються, і виникають проблеми реєстрування слабких світлових потоків на рівні шумів, що найчастіше і мало місце в експериментальних дослідженнях. Тому, перш за все, було вжито заходів для істотного зменшення світлових шумів і засвіток від сторонніх джерел шляхом використання відповідних діафрагм та антиблікових блендів.

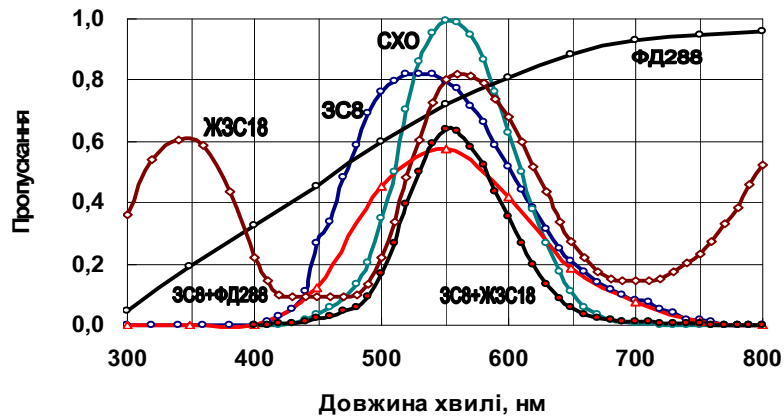


Рис. 4. Спектральні характеристики деяких оптичних пристроїв

У результаті проведених пробних експериментів для адаптації спектральних характеристик ока людини та фотоприймача було використано комбінацію фільтрів ЗС8+ЖЗС18, які хоч і істотно знижують світловий потік, але найбільш точно відтворюють спектральну чутливість людського ока (рис. 4).

Можливості створеного експериментального стенда ілюструють дані на рис. 5, де наведено розподіл інтенсивності зображень різних елементів тестової міри № 4 (М4) на екрані для елемента призматичною дією $PD = 0,0$, що розміщувався на відстані $L = 36$ см від екрану. З отриманих калібрувальних даних для зазначеної оптичної схеми можна визначити два важливих параметри стенда, які необхідні для подальших досліджень: контрастність зображення на екрані K_A та апаратну функцію установки R_{A0} , за яку будемо вважати отриману мінімальну кутову відстань між штрихами в зображенні елементів міри на екрані.

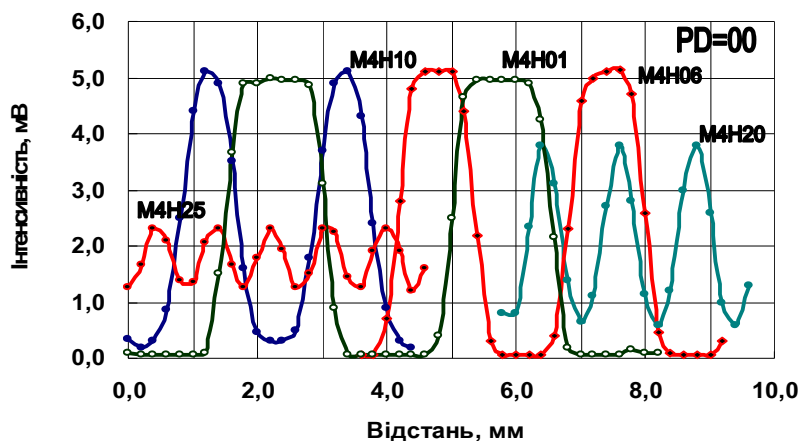


Рис. 5. Типова картина розподілу інтенсивності в зображеннях деяких елементів тестового об'єкта М4 на екрані для $PD = 0,0$

Першу із зазначених величин K_A формально можна визначити аналогічно (2), де I_F — інтенсивність фону зображення, а I_A — інтенсивність зображення елемента тестової міри на екрані, а точніше, на щілині. Графік залежності величини K_A

від номеру елемента тестової міри наведено на рис. 6. Реальне значення K_A , що відповідає досить великим розмірам зображення на екрані або великим кутам спостереження (тестові елементи М4Н10-М4Н01), становить близько 98 %, що повністю відповідає вимогам [5] до характеристик тестових офтальмологічних таблиць.

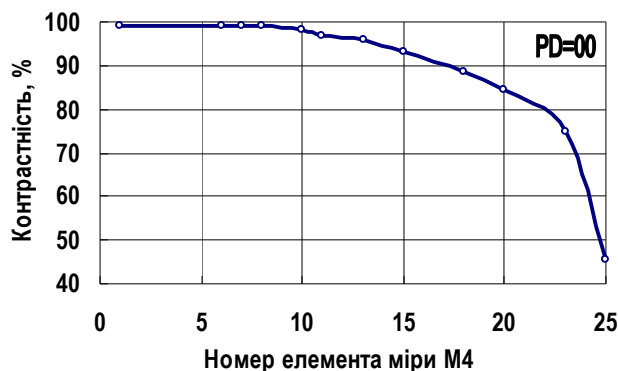


Рис. 6. Контрастність K_A зображень елементів тестової міри М4 для $PD = 0,0$

Зі зменшенням розмірів елементів тестової міри контрастність зображення на екрані, що визначена згідно (2), падає. Це пов'язано з розширенням зображення на екрані внаслідок впливу дефектів оптики та хроматично-дифракційних явищ, а не зі зміною реальної контрастності зображень. Математично процедура визначення зміни роздільної здатності зображень подібна вимірюванню їхньої контрастності, але в першому випадку вираз (2) використовується для фактичного порівняння інтенсивності чорного та білого кольорів штрихів різних елементів тестової міри. У другому ж випадку вираз (2) характеризує ступінь перекриття зображень фону та штрихів внаслідок розмиття зображень. Будемо називати величину цього провалу теж контрастністю, хоча в реальності ця величина характеризує величину перекриття зображень внаслідок різних факторів, перш за все, дифракції на мікрорельєфі та дефектів оптичних поверхонь.

Відповідно до критерію Релея (3) вважатимемо лінії або штрихи на екрані розділеними, якщо провал між двома сусідніми зображеннями становить близько 20 %, яке є мінімальним значенням контрастності K_A , що необхідно для розділення. Взагалі, порівняння роздільної здатності можна виконувати за будь-якої сталої величини контрастності, більшої за 20 %, наприклад, $K_A = 40-70$ %, що підвищує точність вимірювань

Апаратна функція установки R_{A0} в нашому випадку може бути ідентифікована з розміром зображення на екрані пари «штрих-фон» елемента М4Н25 (елемент № 25 міри № 4), яке становить 900 мкм або 1,46 кутових хвилин при контрастності $K_A = 60$ %.

Результати експериментів з роздільної здатності

Типове зображення тестового об'єкта на щілині ілюструє рис. 7, на якому наведено розподіл інтенсивності тестового об'єкта на екрані для оптичного пласти-

ка марки «Plexiglass XT Rohm Degussa», з якого в останній час ІПРІ НАН України. виготовляє мікропризмові елементи. Зображення (рис. 7,а) відповідає заготовці з пластику для виготовлення мікропризмового елемента, а зображення (рис. 7,б) — пластику, що пройшов стандартний процес термопресування [1] без формування будь-якого мікропризмового рельєфу.

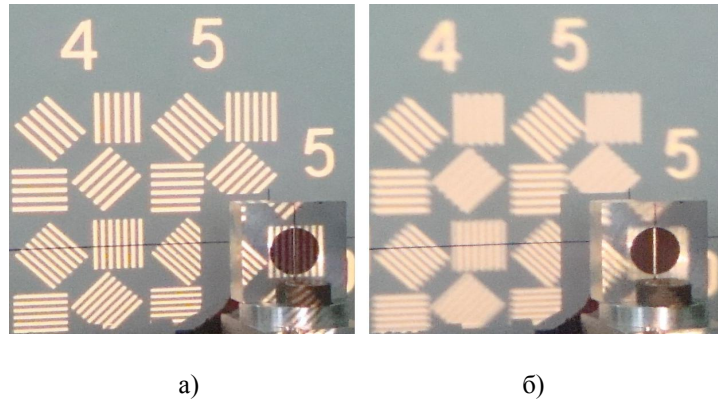


Рис. 7. Розподіл інтенсивності зображення тестової міри М4:
а) заготовка до термопресування; б) після термопресування

Спостерігається помітне зниження роздільної здатності зображення R_d після проходження заготовкою процесу термопресування, що можна пояснити появою в матеріалі оптичних дефектів і внутрішніх напружень, які призводять до локальних змін показника заломлення. На рис. 8 наведено результати дослідження розподілу напружень у зазначеному пластику за допомогою полярископа-поляриметра ПКС-250.

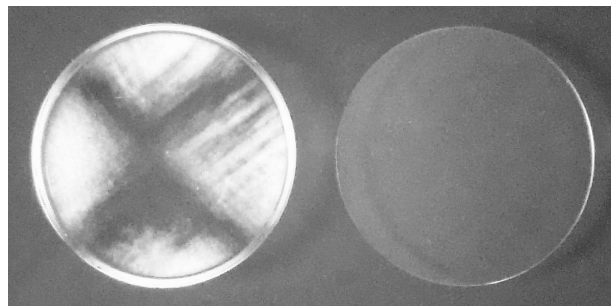


Рис. 8. Оптичні характеристики заготовки з оптичного пластика марки «Plexiglass XT Rohm Degussa» до і після процесу термопресування

Наявність істотно різних оптичних характеристик для досліджуваного матеріалу до і після термопресування свідчить про необхідність оптимізації цього процесу та потребує проведення спеціальних досліджень процесу термопресування з метою мінімізації внутрішніх напружень при виробництві мікропризмових елементів.

Експериментально було отримано аналогічні наведеним на рис. 7 дані щодо розподілу інтенсивності зображень тестових елементів (М4Н06-М4Н25) на екрані для всіх мікропризм призматичною дією від $0,5\Delta$ до 30Δ з діагностичного набору КК-42 (№ 001, дата виготовлення — жовтень 2010 року). Визначена з цього розподілу залежність контрастності зображень K_A на екрані від розміру зображення наведена на рис. 9, який ілюструє алгоритм визначення роздільної здатності зображень R_A . Для підвищення точності вимірювань значення R_A зображень штрихових елементів тестової міри, тобто кутові розміри зображень γ_A , визначалися при значенні контрастності $K_A \approx 60\%$. Для мікропризми $PD = 0,5\Delta$, для якої хроматичні ефекти практично відсутні і яка тому була обрана еталоном, для $K_A = 60\%$ відстань мікропризм до екрану $L = 36$ см. Особлива увага приділялася мікропризмам з великими значеннями призматичної дії, коли спостерігається значне зниження роздільної здатності.

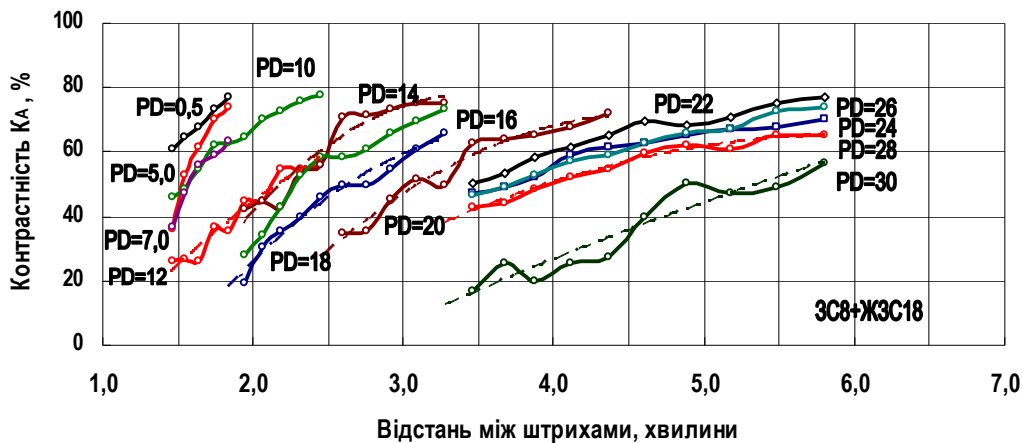


Рис. 9. Контрастність зображення елементів тестової міри М4 для мікропризмових елементів різної призматичної дії з набору № 001

Відносна роздільна здатність певного зображення V_A для певної мікропризми визначалася величиною відношення кутового розміру зображення еталонного елемента тестової міри $R_{A0} = 1,46'$, що відповідає значенню $K_A = 60\%$ для мікропризми $PD = 0,5\Delta$, до кутового розміру відповідного елемента зображення R_A , який відповідає значенню $K_A = 60\%$ для досліджуваної мікропризми:

$$V_A = R_{A0} / R_A. \quad (4)$$

З отриманих значень R_A з використанням (4) легко визначити величину зниження роздільної здатності зображень V_A для мікропризм різної призматичної дії.

За умови відповідного калібрування отримані значення роздільної здатності V_A можна ототожнити з гостротою зору V_C , яку виявляє пацієнт при обстеженнях з тестовими офтальмологічними таблицями.

Роздільна здатність і гострота зору

Для встановлення співвідношення між роздільною здатністю V_A зображень тестових штрихових елементів для різних мікропризм та гостротою зору V_C залежно від величини призматичної дії мікропризм, було проведено спеціальне калібрування стенда. Мікропризма призматичної дією $PD = 10\Delta$ встановлювалася на різних відстанях L до екрану і вимірювалася контрастність K_A зображень різних елементів тестової міри М4. Отримані значення контрастності K_A наведені на рис. 10. З цих даних при контрастності $K_A = 60\%$ визначалися кутові розміри R_A і відповідні відносні роздільні здатності $V_A = R_{A0}/R_A$ зображень різних елементів тестової міри М4 за умови незмінності усіх інших умов експериментів. Еталонне значення $R_{A0} = f(L)$ вимірювалося для мікропризми $PD = 0,5\Delta$.

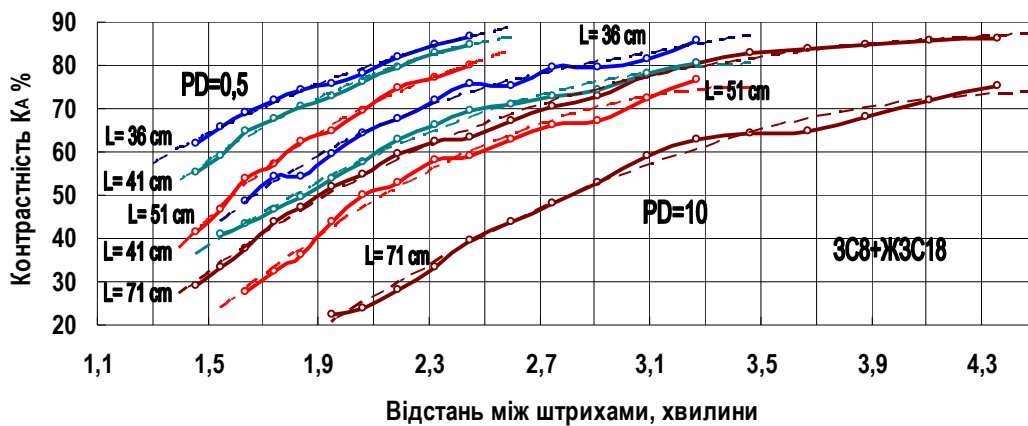


Рис. 10. Контрастність зображення елементів тестової міри М4 для мікропризми $PD = 10,0$ для різних відстаней до екрану L

Установлено, що відносна роздільна здатність $V_A = R_{A0}/R_A$ слабо залежить від точки розміщення мікропризм на оптичній осі стенда, тому що характер залежності величини R_A від відстані L практично однаковий для мікропризм різної призматичної дії.

У той же час величина R_A помітно зменшується з ростом призматичної дії мікропризм. Однак для відстані $L = 36$ для мікропризм $PD = (0,0; 0,5; 1,0)\Delta$ значення відносної роздільної здатності V_A практично однакові, тому всі подальші вимірювання проводилися для сталого значення $L = 36$. Звичайно, від відстані до екрану L залежить величина контрастності зображень. Еталоном для переходу від відносних вимірювань V_A до абсолютних значень V_C було обрано мікропризму $PD = 0,5\Delta$, гострота зору для якої вважалася $V_C = 100\%$, так як це виявляють пацієнти при традиційних офтальмологічних дослідженнях. Таким чином, будемо вважати, що після калібрування стенда експериментальні дані з відносної роздільної здатності зображень тестових штрихових елементів V_A дійсно відображають гостроту зору V_C .

Отримані нами після калібрування стенда значення $V_A = V_C = R_A/R_{A0}$ наведені на рис. 11 (крива 1). Для порівняння на рис. 11 наведено також дані досліджень

гостроти зору V_S , виконані Вероні-Тротман [6] (рис. 11, крива 2) та Дембським [7] (рис. 11, крива 3).

Відмітимо, що за вибраного калібрування величина V_A для мікропризми $PD = 10\Delta$ становить $V_A = 74\%$, що близько до значення $V_A = 80\%$ з роботи [7], а для $PD = 15\Delta$ величина $V_A = 56\%$ (рис. 11, крива 1) практично збігається з даними [6] (рис. 11, крива 2) та [7] (рис. 11, крива 3).

Зі зростанням призматичної дії мікропризм гострота зору V_C помітно знижується. Наприклад, для мікропризми $PD = 30\Delta$ зниження становить 74% , що близько до значення $V_C = 70\%$, яке отримав Дембський [7], і практично відповідає результатам Шевколенко [8], яка наводить значення $\Delta V_C = 60\%$ для призми $PD = 30\Delta$ при гостроті зору пацієнта $V_C = 1,0$. Результати Вероні-Тротман [6] досить суперечливі, враховуючи, що точка $PD = 20\Delta$ за висновками самої авторки занижена внаслідок низької якості виготовлення цієї мікропризми, а значення $V_S = 18\%$ для $PD = 30\Delta$ просто занижене.

Запропонована методика має істотну перевагу в тому, що вимірювання з тестовими штриховими мірами значно точніші порівняно з спостереженнями тестових таблиць і не залежать від суб'єктивних вражень досліджуваних пацієнтів. У той же час, в існуючому сьогодні варіанті вона, мабуть, мало здатна для практичного обстеження пацієнтів у офтальмологічних кабінетах.

Однак методика дозволяє легко проводити поточний контроль виготовлених мікропризмових елементів у різних технологічних режимах або для різних матеріалів з метою вибору оптимальних матеріалів або режимів. Аналіз зображень тестових штрихових мір після проходження променя білого світла через відповідні мікропризми дозволяє отримати важливу інформацію щодо роздільної здатності зображень і оптимізувати процес виготовлення мікропризм.

Питання щодо ототожнювання значень відносної роздільної здатності зображень $V_A = R_A/R_{A0}$ та гостроти зору V_C потребує подальших більш детальних досліджень.

Висновки

У роботі досліджено залежність роздільної здатності зображень, що формуються за допомогою мікропризмових елементів Френеля, від величини призматичної дії таких елементів.

Створено експериментальний стенд для вимірювання роздільної здатності зображень з використанням тестових штрихових мір. Запропоновано алгоритм визначення гостроти зору за роздільною здатністю мікропризмових елементів. Шля-

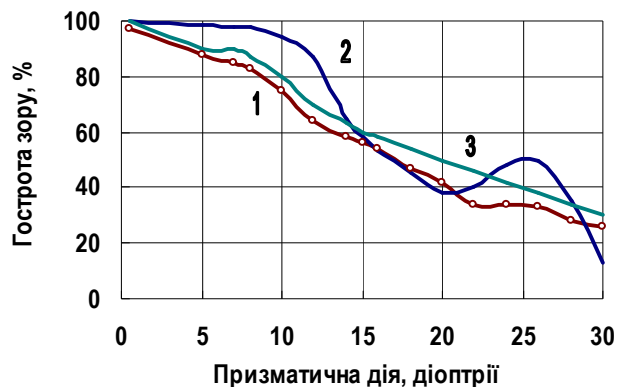


Рис. 11. Гострота зору залежно від призматичної дії мікропризм:

- 1 — дані автора; 2 — Вероні-Тротман [6];
3 — Дембський [7]

хом відповідного калібрування отриманих даних за результатами офтальмологічних традиційних досліджень пацієнтів можна звести отримані відносні дані з роздільної здатності тестових зображень до абсолютних значень гостроти зору.

Визначено оптичну якість мікропризмових елементів з деяких діагностичних наборів і різних діагностичних лінійок, що необхідно для визначення оптимальних технологічних режимів виробництва мікропризмових елементів максимально високої оптичної якості.

1. *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 обробка даних. — 2010. — Т. 12, №1. — С. 49–54.
2. *Матвеев А.Н.* Оптика / А.Н. Матвеев. — М.: Высшая школа, 1985. — 381 с.
3. *Жабоедов Г.Д.* Очні хвороби / Г.Д. Жабоедов, М.М. Сергієнко. — К.: Здоров'я, 1999. — 311 с.
4. *Урмахер Л.С.* Оптические средства коррекции зрения / Л.С. Урмахер, Л.И. Айзенштат. — М.: Медицина, 1990. — 256 с.
5. *Лещенко И.А.* О системах и правилах определения остроты зрения / И.А. Лещенко // Вестник оптометрии. — 2009. — № 3. — С. 54–58.
6. *Veronneau-Troutman S.* Fresnel Prisms and Their Effects on Visual Acuity and Binocularity / S. Veronneau-Troutman // Trans. Am. Ophthalmol. Soc. — 1978. — Vol. 78. — P. 610–653.
7. *Дембський Л.К.* Сферопризматическая коррекция зрения, как фактор профилактики конвергентной осевой деформации и гипертензии глаза [Електронний ресурс] / Л.К. Дембський. — Режим доступу: <http://www.eyecenter.com.ua/>
8. *Шевколенко М.В.* Діагностика та планування хірургічного лікування співдружньої ізотропії з малими кутами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. мед. наук / М.В. Шевколенко. — Київ, 2011. — 21 с.
9. *Малюгин Б.Э.* Зависимость показателей разрешающей способности интраокулярных линз от качества обработки оптической поверхности и аберрационных свойств / Б.Э. Малюгин, Ю.А. Белый, С.К. Демьянченко // Рефракционная хирургия и офтальмология. — 2010. — № 3. — С. 23–26.
10. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения / В.А. Афанасьев. — М.: Недра, 1968. — 255 с.
11. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

Надійшла до редакції 11.04.2013