

УДК 535.241.5

**Є. Є. Антонов**

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

## **Дифракційна ґратка для зменшення зони хроматизму мікропризм**

*Розраховано оптимальні оптичні параметри дифракційно-рефракційних ахроматичних мікропризових пристроїв, проведено аналіз структури поверхонь і профілів рельєфу виготовлених таких мікропризм. Експериментально досліджено дифракційну структуру розподілу інтенсивності заломленого на мікропризмах променя лазера. Встановлено, що ахроматизуючі властивості виготовлених мікропризм відсутні внаслідок дефектів рельєфу, які проявляються, перш за все, в різній висоті трикутних профілів.*

**Ключові слова:** мікропризовий елемент, крок мікрорельєфу, хроматизм, інтерференція світла, гострота зору, кут дифракції.

Проблема хроматизму є неприємним явищем при застосуванні мікропризових елементів в офтальмології. Хроматизм призводить до зниження гостроти зору пацієнта, що спотворює результати діагностики та лікування. Для зниження величини хроматизму, перш за все, необхідно для виготовлення мікропризових елементів використовувати оптичні пластики з максимально більшим коефіцієнтом дисперсії Аббе:

$$k_A = (n_E - 1)/(n_H - n_C) * 100,$$

де  $n_E$  — коефіцієнт заломлення матеріалу для зеленої зони спектра;  $n_H$  — коефіцієнт для синьої зони;  $n_C$  — коефіцієнт для червоної зони [1]. Найчастіше для виготовлення елементів використовується поліметилметакрилат ( $k_A = 58$ ) або пластик CR-39 ( $k_A = 58$ ) замість, наприклад, полікарбонату ( $k_A = 32$ ), поліуретану ( $k_A = 34$ ) або полістиролу ( $k_A = 30$ ).

Можливо також зменшити зону хроматизму для мікропризм шляхом використання відповідних кольорових світлофільтрів [2]. Одним із перспективних шляхів у цьому напрямку є введення відповідного барвника безпосередньо до матеріалу мікропризм, однак, цей метод у будь-якому вигляді не дуже зручний.

У той же час існує і суто фізичний метод впливу на характер хроматичних явищ, що пов'язаний з використанням спеціальних рефракційно-дифракційних мікропризм з подвійним рельєфом [3]. Конкретні розрахунки параметрів таких ахроматичних мікропризм саме для офтальмологічних застосувань виконав А.С. Лапчук у роботі [4], згідно з якими в Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України В.М. Христиним були виготовлені матриці-оригінали мікропризм з визначеними геометричними параметрами з тією максимальною якістю, яку можливо було реалізувати на існуючій в інституті станції різання. Однак, сформовані методом термопресування зразки мікропризм призматичною дією  $PD = 1,0\Delta$  та  $PD = 2,0\Delta$  з кроком рельєфу  $W = 23, 27, 48$  та  $55$  мкм не виявили ахроматизуючих властивостей.

Розглянемо більш детально особливості функціонування таких дифракційних пристроїв і характеристики виготовлених мікропризм з метою підготовки відповідних рекомендацій зі створення ефективних ахроматизуючих пристроїв.

### Теоретична модель

Схему мікропризмової ахроматичної структури при нормальному куті падіння променя світла на рефракційну призму наведено на рис. 1, де  $W$  — крок мікрорельєфу;  $H$  — номінальна глибина рельєфу;  $\alpha_p$  — заломлюючий кут і  $\beta$  — зворотний кут мікропризми;  $\theta_p$  — кут відхилення променя на рефракційні призми;  $D$  — крок мікрорельєфу;  $h$  — номінальна глибина рельєфу;  $\alpha_x$  — заломлюючий кут і  $\theta_d$  — кут рефракції променя після дифракційної ґратки.

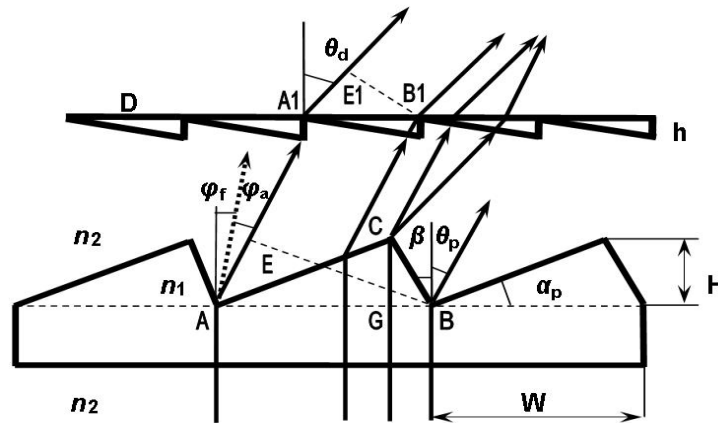


Рис. 1. Схема рефракційно-дифракційної антixроматичної структури

Явища хроматизму для такої структури відображаються законом Снеліуса [1]

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

де  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  — кути розповсюдження світла в першому та другому середовищах, а  $n_1(\lambda)$  та  $n_2(\lambda)$  — показники заломлення мікропризми та середовища для певної довжини хвилі  $\lambda$ .

Із закону (1) можна отримати вираз для визначення зони хроматизму  $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_p$  для двох граничних значень  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  залежно від кута рефракційної призми  $\alpha_p$ :

$$\Delta(\lambda_1\lambda_2)_p = \theta_{p1} - \theta_{p2} = \sin^{-1} \{ \sin \alpha_p n_1(\lambda_1)/n_2(\lambda_1) \} - \sin^{-1} \{ \sin \alpha_p n_1(\lambda_2)/n_2(\lambda_2) \}. \quad (2)$$

Таким чином, величина зони хроматизму  $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_p$  повністю визначається заломлюючим кутом рефракційної призми  $\alpha_p$  та характером залежності коефіцієнта заломлення  $n(\lambda)$  від довжини хвилі. Для поліметилметакрилату, з якого найчастіше виготовляються мікропризми, величина зони дисперсійного хроматизму згідно (2) наведена на рис. 2 (крива 1) для спектрального діапазону  $\lambda_1 = 0,6328 \div \lambda_2 = 0,4047$  мкм. В усіх розрахунках використовувалися коефіцієнти заломлення  $n(\lambda)$  різних матеріалів з роботи Паліка [5].

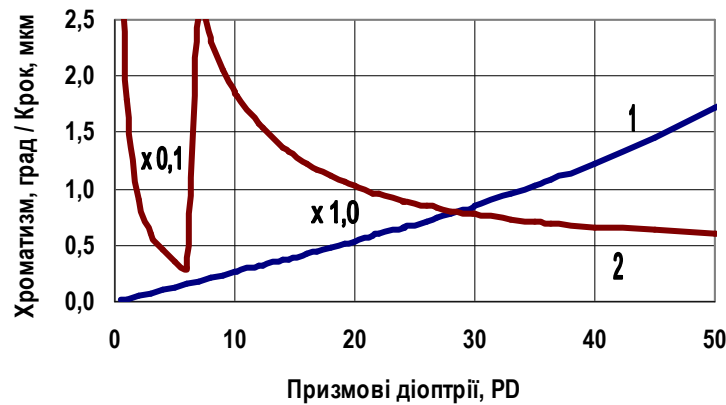


Рис. 2. Величина зони дисперсійного хроматизму (1) та кроку рельєфу  $W_x$  (2) ахроматизуючої призми для 1-го порядку дифракції

Для практичного розгляду явищ дифракції та інтерференції при проходженні променя світла через мікропризмову структуру можна використовувати спрощену модель [2], в якій світлова хвиля вважається плоскою, а дифракційна ґратка — суто амплітудною.

У цій моделі початкова різниця фаз інтерферуючих променів  $\Delta_i = (AE - CG)$  (рис. 1) може бути врахована простим поворотом системи координат на кут рефракції  $\theta_p(\lambda)$ , який легко визначити для кожної довжини хвилі  $\lambda$  із закону Снеліуса (1). Кути дифракції  $\varphi_A(\lambda)$  та інтерференції  $\varphi_I(\lambda)$  в моделі [2] відраховуються від напрямку кута рефракції  $\theta_p(\lambda)$  і для розрахунків інтенсивності світла, яке пройшло через мікропризму, можна використовувати відомі формули для амплітудної дифракційної ґратки [1]:

$$I = I_0 (\sin A \sin NB)^2 (A \sin B)^{-2}, \quad (3)$$

$$A_a = (\pi b/\lambda) \sin \varphi_D,$$

$$B = (\pi d/\lambda) \sin \varphi_i,$$

де  $I_0$  — інтенсивність світлового потоку від однієї щілини дифракційного ґратки у напрямку кута дифракції  $\varphi_D = 0$ ;  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання;  $d$  — період

ґратки;  $b$  — ширина однієї щілини;  $N$  — число щілин у ґратці;  $(n_1, n_2)$  — показники заломлення матеріалу мікропризми та середовища.

У напрямку кута  $\theta_p$  (рис. 1) період ґратки  $d_\theta = BF = AB \cos\theta$ , а ефективна апертура  $b_\theta$ , яка є аналогом  $b$  у формулі (2), дорівнює  $\{BF - CE \sin(\theta + \beta)\}$ , тобто для випадку зворотного кута  $\beta = 0$ :

$$\begin{aligned} d_\theta &= W \cos\theta, \\ b_\theta &= W (\cos\theta - \operatorname{tg}\alpha_p \sin\theta). \end{aligned} \quad (4)$$

Величина  $N$  при розрахунках дифракційних явищ для офтальмологічних мікропризм визначає зону мікрорельєфу, через яку досліджуваний об'єкт фокусується на сітківку ока людини. При середньому освітленні об'єкта  $E = 200\text{--}300$  лк діаметр зіниці ока людини становить  $D_R = 2\text{--}3$  мм, що для кроку рельєфу  $W = 600$  мкм відповідає значенню  $N \approx 4$ , а для кроку рельєфу  $W = 55$  мкм величина  $N \approx 44$ .

Ширина головного дифракційного максимуму 1-го порядку для певної довжини хвилі  $\lambda$  складає  $\delta_D = \sin^{-1}\{2\lambda/b\}$ , дифракційні мінімуми розміщуються під кутами  $\varphi_{Dm} = \sin^{-1}\{k_D(\lambda/b)\}$ , де  $k_D = 1, 2, 3 \dots$  — порядок дифракції. Кути інтерференційних максимумів становлять  $\varphi_{Ii} = k_i \sin^{-1}(\lambda/d)$ , де  $k_i = 0, 1, 2 \dots$  — порядок інтерференції, а ширина максимуму  $\delta_I = \sin^{-1}\{(\lambda/(Nd))\}$  визначається ще й кількістю інтерферуючих щілин  $N$ . Тому для нашого випадку за умови  $Nd \approx 2400 = \text{const}$  величина  $\delta_I$  має однакове значення для всіх розглянутих ґраток, незалежно від їхнього кроку  $W$ .

Відмітимо, що при експериментальному дослідженні дифракційних явищ на екрані будуть спостерігатися лише інтерференційні максимуми, які розміщуються всередині диференційних максимумів, коли обидва множника у виразі (3) відмінні від нуля.

Для точного розрахунку характеристик ахроматизуючої мікропризми з штрихами у вигляді трикутників, яка фактично є амплітудно-фазовою ґраткою, у виразах (3) необхідно врахувати початкову різницю фаз інтерферуючих променів, тому дифракційна складова  $A$  має такий вигляд:

$$A_f = (\pi b / \lambda) (\sin \varphi_D - \sin \theta_R), \quad (5)$$

де  $\theta_R$  — кут рефракції для променя певної довжини хвилі  $\lambda$ , а  $\varphi_D$  — кут дифракції. У цьому випадку кути дифракції  $\varphi_D$  відраховуються від нормалі до утворюючої поверхні мікропризми. Інтерференційна складова  $B = (\pi d/\lambda)\sin\varphi_I$  у виразі (3) залишається незмінною, але кути інтерференції  $\varphi_I$  також відраховуються від нормалі до утворюючої поверхні.

Для рефракційної мікропризми з нормальною залежністю показника заломлення  $n(\lambda)$  від довжини хвилі  $\lambda$ , коли  $dn(\lambda)/d\lambda < 0$ , промені з більшою довжиною хвилі  $\lambda$ , наприклад, темно-червоні ( $\lambda_C = 0,6328$  мкм), згідно закону Снеліуса (1) заломлюються на менші кути рефракції  $\theta_R$  порівняно з променями з меншою довжиною  $\lambda$ , наприклад, синьо-фіолетові ( $\lambda_H = 0,4047$  мкм). Навпаки, для дифракційної ґратки при освітленні когерентним світлом з різними довжинами хвилі  $\lambda$  формується система інтерференційних максимумів з кутовим періодом  $\delta_I = \sin^{-1}\{(\lambda/d)\}$

та кутами інтерференції  $\varphi_H = k_i \sin^{-1}(\lambda/d)$ ,  $k_i = 0, 1, 2 \dots$ , які для певного порядку ґратки  $k_i$  зменшуються зі зменшенням довжини хвилі  $\lambda$ .

Таким чином, напрямки хроматизму рефракційної мікропризми та дифракційної ґратки спрямовані назустріч один одному, внаслідок чого визначена згідно (2) зона дисперсійного хроматизму  $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_p$ , може бути повністю скомпенсована дифракційним хроматизмом ґратки.

Оскільки положення інтерференційного піка 2-го порядку для лінії  $\lambda_C = 0,6328$  мкм практично співпадає з аналогічним максимумом 3-го порядку для лінії  $\lambda_H = 0,4047$  мкм, зрозуміло, що такі ахроматичні мікропризми можуть ефективно працювати лише в 1-му порядку дифракції. Тому заломлюючий кут призми  $\alpha_x$  повинен бути досить малим, і кутовий період інтерференційних піків  $\delta_I = (\lambda_E/d)$  для середини видимого спектрального діапазону при  $\lambda_E = 0,5461$  мкм повинен приблизно дорівнювати куту рефракції  $\theta_R$ . Звідси можна отримати значення кроку  $W_x$  такої ахроматизуючої мікропризми для функціонування її в 1-му порядку дифракції залежно від величини її призматичної дії:

$$W_x \approx d = 0,5461 / \sin^{-1} \{n_1(\lambda_E)/n_2(\lambda_E)\}. \quad (6)$$

Графік залежності (6) наведено на рис. 2 (крива 2). Враховуючи, що похибка кроку рельєфу при практичному виготовленні мікропризм зменшується з ростом кроку  $W_x$ , доцільно використовувати для ахроматизації лише мікропризми призматичною дією  $PD = 0,5-1,0\Delta$ , тому що для більших заломлюючих кутів  $\alpha_x$  величина  $W_x$  стає занадто малою для її практичної реалізації.

Для невеликого кута мікропризм  $\alpha_x$  і відповідного кута рефракції  $\theta_R$ , коли крок рельєфу дифракційної ґратки  $W_x \approx d \approx b$ , можна приблизно визначити залежність зони дифракційного хроматизму  $\Delta(\lambda_C\lambda_H)_x$  такої призми від кроку  $W_x$ : для 1-го порядку дифракції:

$$\Delta(\lambda_C\lambda_H)_D = (\varphi_{IC} - \varphi_{IH}) = \sin^{-1}(\lambda_C/W_x) - \sin^{-1}(\lambda_H/W_x). \quad (7)$$

Залежність величини  $\Delta(\lambda_C\lambda_H)_x$ , розраховану згідно (7), наведено на рис. 3. Дійсно, для 1-го порядку дифракційної ґратки при кроках рельєфу  $W > 10$  мкм, які неважко реалізувати на практиці, можливо повністю скомпенсувати дисперсійний хроматизм величиною до 2-х кутових градусів.

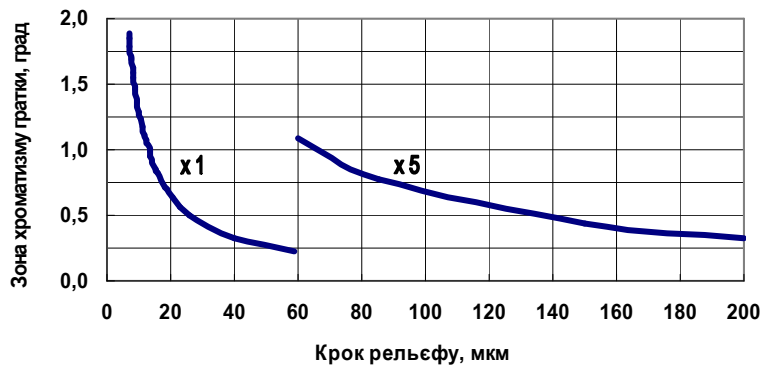


Рис. 3. Величина зони дифракційного хроматизму антихроматичної призми залежно від кроку рельєфу

Прирівнюючи вирази (2) та (7), можна отримати приблизну залежність кроку рельєфу  $W_x$  дифракційної ґратки від заломлюючого кута  $\alpha_p$  та величини призматичної дії  $PD$  рефракційної призми, хроматизм якої необхідно скомпенсувати. Для призми з поліметилметакрилату ( $n_e = 1,491$ ), що знаходиться в повітрі ( $n_2 = 1,0$ ), для видимого діапазону можна отримати, що  $W_x \approx 10,3 (\sin \alpha_p)^{-1}$ . Графік цієї залежності наведено на рис. 4 (крива 1). Для порівняння також наведено результати точних розрахунків величини  $W_x$  (крива 2) А.С. Лапчука [4]. Для мікропризм призматичною дією  $PD < \approx 30\Delta$  обидва результати практично співпадають.

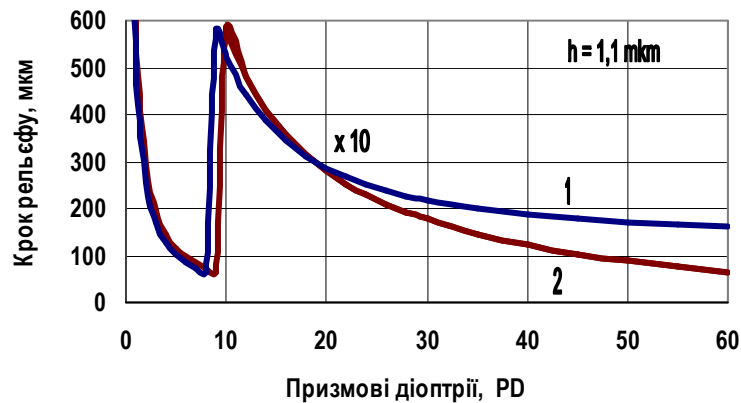


Рис. 4. Розрахунковий крок  $W_x$  рельєфу ахроматичної мікропризми

Задача точних розрахунків ахроматизуючих пристроїв полягає в пошуку таких оптимальних параметрів мікропризмової дифракційної ґратки, перш за все кроку рельєфу  $W$ , глибини рельєфу  $H$  та кута призми  $\alpha_p$ , для яких зона дифракційного хроматизму  $\Delta(\lambda_C \lambda_H)_x$  для діапазону ( $\lambda_C = 0,6328$  мкм) – ( $\lambda_H = 0,4047$  мкм) дорівнює зоні дисперсійного хроматизму  $\Delta(\lambda_1 \lambda_2)_p$  рефракційної призми. В цьому і полягає механізм компенсації хроматизму [3].

Розглянемо детальніше процес формування інтерференційних максимумів у більш наглядному вигляді та конкретизуємо кутові параметри таких структур.

На рис. 5,а наведено розраховані згідно (3)–(5) дифракційні характеристики для запропонованої раніше [4] оптимальної ахроматизуючої мікропризми силою  $PD = 1,0\Delta$  для різних кроків рельєфу  $W$ . Так, для кроку  $W = 27$  мкм у зоні дифракційного максимуму реалізується максимум інтенсивності 1-го порядку при куті дифракції  $\varphi_{11} = 1,343^\circ$  (червоний пік  $W27k1$ ), який при зменшенні довжини хвилі до  $\lambda = 0,4047$  мкм трансформується в один пік інтенсивності також 1-го порядку при куті  $\varphi_{12} = 0,849^\circ$  (синій пік  $W27k1$ ), тобто різниця  $\varphi_{11} - \varphi_{12} = \Delta_D = 0,494^\circ$ . Таким чином, при використанні такої ґратки відбудеться практично повна компенсація дисперсійного хроматизму  $\Delta(\lambda_1 \lambda_2)_p$  для мікропризми  $PD = 16,0\Delta$ , для якої згідно (6) величина  $\Delta(\lambda_1 \lambda_2)_p = 0,461^\circ$ .

У той же час, для мікропризми  $PD = 1,0\Delta$  з кроком  $W = 55$  мкм для  $\lambda = 0,6328$  мкм реалізується також один інтерференційний максимум інтенсивності 1-го порядку при куті дифракції  $\varphi_{11} = 0,659^\circ$  (рис. 5,а, червоний пік  $W55k1$ ), який зі зменшенням довжини хвилі до  $\lambda = 0,4047$  мкм трансформується в два сині піки інтенсивності при кутах  $\varphi_{11} = 0,417^\circ$  пік (1-й порядок ґратки  $W55k1$ ) та  $\varphi_{12} = 0,833^\circ$  (2-й

порядок  $W55k2$ ). Таким чином, при цьому кроці рельєфу зі зменшенням довжини хвилі не відбувається ахроматизуючої дії.

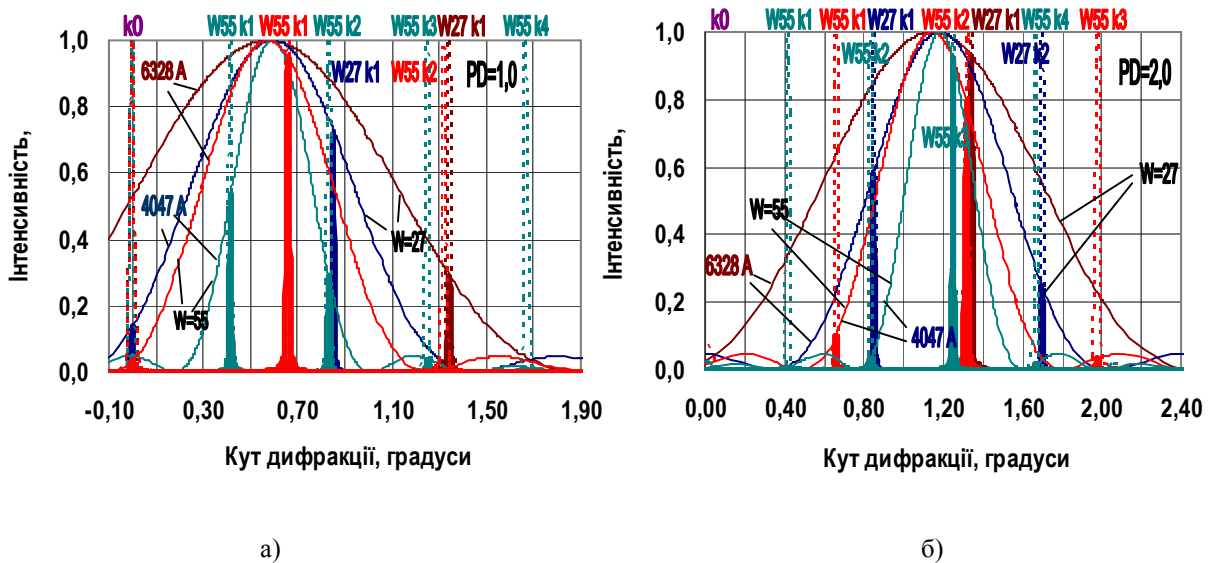


Рис. 5. Розміщення інтерференційних максимумів для призм  $PD = 1,0 \div 2,0\Delta$

Для також оптимальної за попередніми розрахунками призми  $PD = 2,0\Delta$  з кроком  $W = 27$  мкм та  $55$  мкм схема розміщення інтерференційних максимумів у червоній ( $\lambda = 0,6328$  мкм) та синій ( $\lambda = 0,4047$  мкм) зонах зображена на рис. 5,б. Для цієї призми також для кроку  $W = 27$  мкм відбувається трансформація одного червоного піка  $W27k1$  в два синіх, тобто інтерференційна картина просто розширюється в межах одного дифракційного максимуму при куті  $\theta_R = 1,12^\circ$ , і ахроматичної дії не відбувається.

Для  $PD = 2,0\Delta$  з кроком  $W = 55$  мкм перерозподіл інтенсивності по спектру відбувається в напрямку від червоної зони спектра в синю, але всього на  $0,2$  градуси (рис. 5,б, червоний пік  $W55k2$  та синій пік  $W55k3$ ), що достатньо для повної компенсації хроматизму лише призми  $PD = 7,0\Delta$ , для якої  $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_p = 0,198^\circ$ .

Таким чином, для створення ахроматизуючих пристроїв необхідно, щоб у межах центрального дифракційного максимуму, який знаходиться при куті рефракції  $\theta_R$ , знаходився лише один інтерференційний максимум певної довжини хвилі  $\lambda$ , і при зменшенні  $\lambda$  в зону максимуму не переміщувалися максимуми вищих порядків. У нашому випадку для невеликих кутів  $\alpha_x$ , величини  $d \approx b$ , і в зоні головного дифракційного максимуму дійсно знаходиться лише один інтенсивний інтерференційний максимум для будь-якого кроку рельєфу  $W$ , тому можна очікувати ахроматизуючої дії таких мікропризм.

## Експериментальні результати

За допомогою газового лазера з довжиною хвилі  $\lambda = 0,6328$  мкм було досліджено декілька зразків виготовлених з поліметилметакрилату мікропризмових елементів призматичною дією  $PD = 1,0\Delta$  з кроком  $W = 48$  та  $55$  мкм та  $PD = 2,0\Delta$  з

кроком  $W = 23$  та  $27$  мкм, а також стандартні призми з діагностичного набору КК-42 [2] з кроком рельєфу  $W = 600$  мкм такої ж призматичної дії. При цьому діаметр променя лазера встановлювався  $D_L \approx 2,5 \div 3,0$  мм, тобто практично ідентичним значенню  $D_R \approx 2,4$  мм, яке використовувалося при розрахунках.

Експериментально визначені кути  $\varphi_D$  головного дифракційного максимуму для всіх досліджених кроків рельєфу та призматичних дій мікропризм точно відповідають куту рефракції  $\theta_R$ . Кути інтерференційних максимумів  $\varphi_{Ik}$  залежать від кроку рельєфу  $W$  і відповідають значенням  $\varphi_{Ik} = k(\lambda/d)$ ,  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  Для прикладу на рис. 6,а наведено експериментально отримані дані для мікропризми  $PD = 2,0\Delta$  з кроком рельєфу  $W = 600$  мкм (ромби), а також розрахований для довжини хвилі  $\lambda = 0,6328$  мкм розподіл інтенсивності в зоні 1-го дифракційного максимуму з кутом  $\varphi_D = 1,12^\circ$  (суцільна лінія).

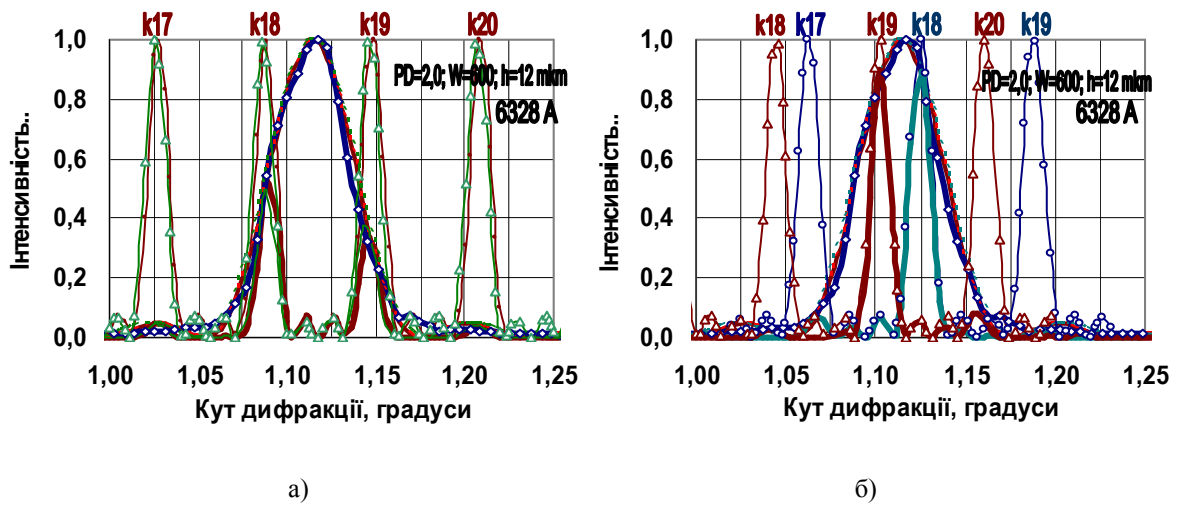


Рис. 6. Розподіл інтенсивності для мікропризми  $PD = 2,0\Delta$  з кроком  $W = 600$  мкм

Відмітимо, що дані збігаються лише для дифракційного розподілу. Два розрахункові інтерференційні максимуми для кутів  $\varphi_{18} = 1,097^\circ$  (18-й порядок ґратки) та  $\varphi_{19} = 1,157^\circ$  (19-й порядок) при експериментальному дослідженні не спостерігаються.

Експериментально отриманий розподіл інтенсивності для призми аналогічної дії  $PD = 2,0\Delta$  з кроком  $W = 27$  мкм виглядає зовсім інакше (рис. 7, ромби). Для порівняння на рис. 7 наведено також експериментальні дані для призми  $PD = 2,0\Delta$  з кроком рельєфу  $W = 600$  мкм (кружки) та теоретична дифракційна крива (суцільна лінія). Розрахункові та експериментальні дані співпадають лише щодо зони концентрації інтерференційних максимумів, положення яких точно відповідає дифракційній кривій. Точно співпадають з кутом рефракції  $\theta_R = 1,12^\circ$  також експериментально отримані кути  $\varphi_D = 1,12^\circ$  дифракційних максимумів для призм з кроком  $W = 27$  та  $600$  мкм. Це безумовно свідчить про незмінність кута заломлення мікропризм  $\alpha_x$ . Напівширини контурів різняться в  $\approx 20$  разів, тобто пропорційно крокам рельєфу  $W$ , що теж повністю відповідає теорії дифракції [6]. Однак не спостерігається формування одного інтерференційного максимуму в зоні головного дифракційного максимуму для кута  $\varphi_1 = 1,343^\circ$  (рис. 7), як це прогнозує теорія.



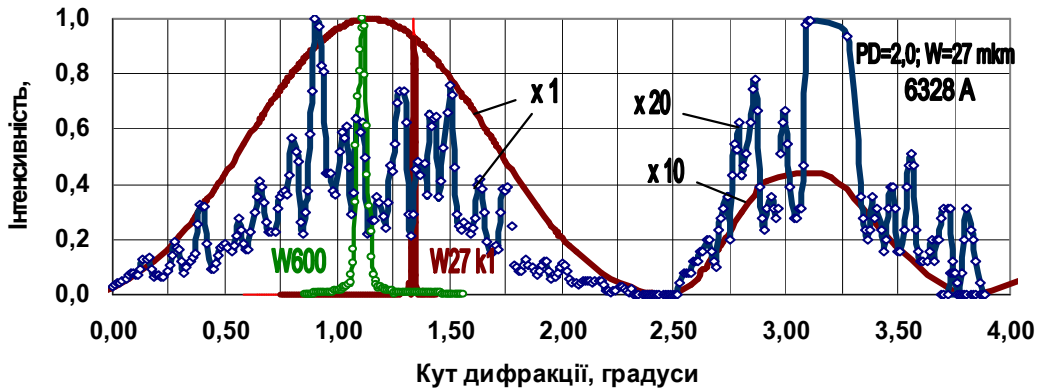


Рис. 7. Експериментальні дані для мікропризми  $PD = 2,0\Delta$  з кроком  $W = 27$  мкм

Повністю аналогічний розподіл спостерігається при експериментальному дослідженні мікропризми дією  $PD = 1,0\Delta$  з кроком рельєфу  $W = 48$  мкм, що наведено на рис. 8 (ромби). На цьому ж рисунку наведено експериментально отриманий профіль інтенсивності для призми аналогічної дії з кроком  $W = 600$  мкм (кружки), а також розрахункову дифракційну криву для призми кроком  $W = 55$  мкм (суцільна лінія). Дифракційні максимуми 1-го, 2-го та навіть 4-го порядку ґратки повністю корелюють з розміщенням зон концентрації спостережених максимумів інтенсивності, однак замість одного інтерференційного максимуму спостерігається система багатьох розмитих максимумів.

Для того, щоб упевнитися, що спостережені максимуми не є звичайними похибками експерименту, для довжини хвилі  $\lambda = 0,6328$  мкм для ізольованої однієї щілини шириною  $b_1 = 55$  мкм було отримано суто дифракційний профіль розподілу інтенсивності, який також наведено на рис. 8 (трикутники). Структура експериментально отриманого дифракційного профілю точно співпадає з розрахунковим і відповідає кутам розміщення зон концентрації спостережених максимумів. Оскільки похибка вимірювання експериментальних значень інтенсивності значно менша за величини коливання інтенсивності максимумів, можна точно вважати отримані піки інтерференційними, але для ґратки зі змінними параметрами мікрорельєфу.

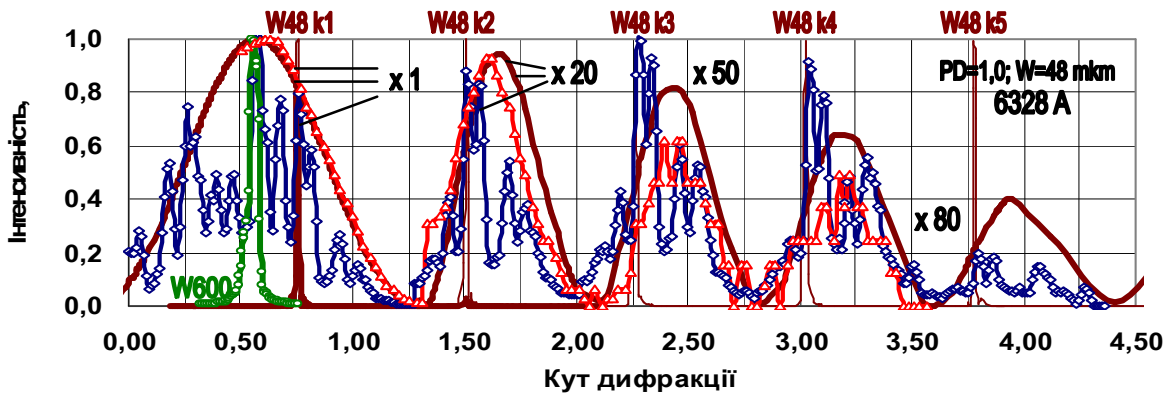


Рис. 8. Дифракційні інтенсивності для мікропризми  $PD = 1,0\Delta$

Наявні експериментальні дані для всіх виготовлених мікропризм свідчать про співпадіння кута рефракції  $\theta_R$  з кутом головного дифракційного максимуму  $\varphi_D$ . З іншого боку, сам метод встановлення необхідного кута нахилу та фіксації алмазного різця на станції різання гарантує незмінність його кута нахилу. Тому будемо вважати, що заломлюючий кут мікропризм  $\alpha$  в процесі формування рельєфу не змінюється. Однак ні в одному випадку не виявлено ахроматизуючої дії мікропризм.

## Обговорення результатів

Основною метою роботи є встановлення причин, в силу яких не спостерігається ахроматизуюча дія для всіх досліджених мікропризм, тому перш за все було досліджено структуру поверхонь усіх виготовлених мікропризм. Аналіз мікрорельєфу за допомогою мікроскопів типу МБС-10 та фірми «Carl Zeiss» свідчить про наявність дефектів рельєфу поверхні, що виявляються перш за все, в різній його глибині  $H$ .

Для прикладу, на рис. 9 наведено зображення поверхні призми  $PD = 1,0\Delta$  кроком  $W = 55$  мкм і номінальною глибиною рельєфу  $H = 1,1$  мкм з мікроскопу МБС-10 зі збільшенням  $\times 98$ . Деякі канавки рельєфу навіть зовсім не сформовані, інші помітно глибші за сусідні. Спостерігається також коливання глибини рельєфу вздовж кожної доріжки.

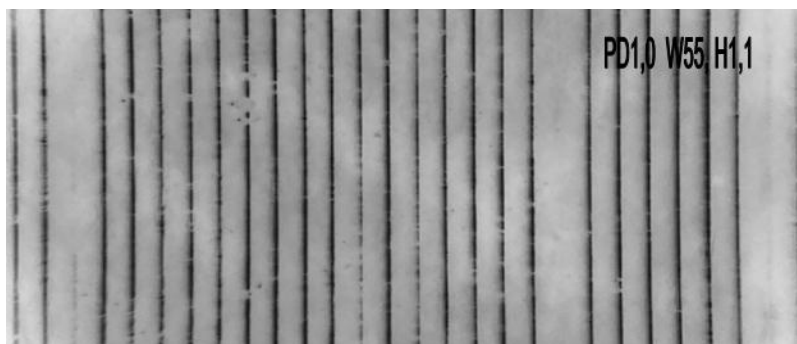


Рис. 9. Зображення реальної мікропризмової структури  $PD = 1,0\Delta$   $W = 55$  мкм,  $H = 1,1$  мкм з дефектами мікрорельєфу

Профіль рельєфу цієї мікропризми  $PD = 1,0\Delta$  з кроком  $W = 55$  мкм зображений на рис. 10. Збільшення становило  $\times 98$  для мікроскопу МБС-10. Зареєстрований профіль має помітні коливання глибини рельєфу та явні нерегулярні дефекти оптичних поверхонь.

Для інтерпретації експериментальних фактів можна використати модель, в якій ґратка розглядається у вигляді набору трикутників з однаковим кутом нахилу заломлюючої грані  $\alpha$ , але з різною висотою рельєфу  $H$ . Схематичне зображення такої структури наведено на рис. 11 для випадку, якщо формування мікрорельєфу з номінальним кроком  $W$  здійснюється в напрямку зліва направо.

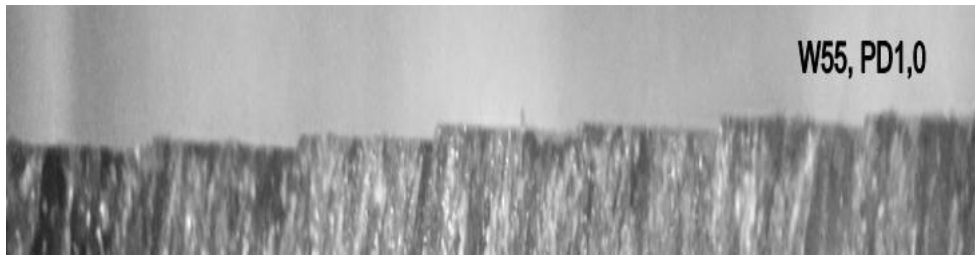


Рис. 10. Профіль рельєфу мікропризмної структури  $PD = 1,0\Delta$ ,  $W = 55$  мкм,  $H = 1,1$  мкм

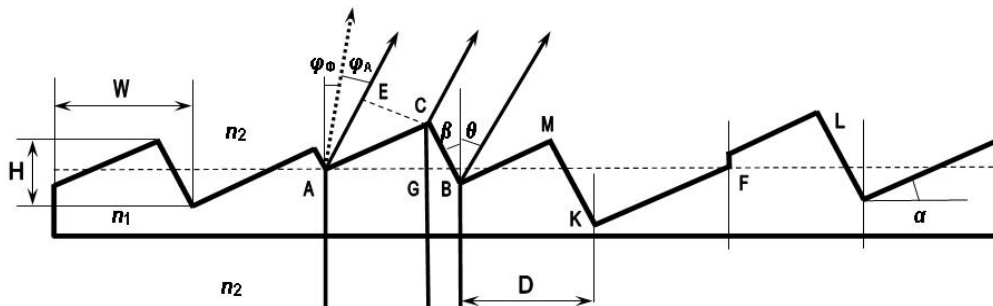


Рис. 11. Схема мікропризмної структури зі змінною глибиною рельєфу

Кут нахилу граней мікропризм  $\alpha_x$  відповідає номінальному нахилу алмазного різця, який є незмінним. Тому коливання кута рефракції  $\theta_R$  мікропризм відсутні, і внаслідок цього максимум дифракційної кривої розміщується для всіх граней при тому ж самому куті  $\varphi_D$ , який точно дорівнює куту рефракції  $\theta_R$  призми. В той же час ширина дифракційного максимуму, яка відповідає ефективному періоду ґратки  $D_i$ , є різною, тому що величина  $D_i$  залежить від глибини рельєфу і є різною для різних груп штрихів.

Горизонтальне позиціонування різця здійснюється з точністю  $\Delta_W = \pm 0,5$  мкм, і з отриманих зображень мікрорельєфу очевидно, що крок рельєфу  $W$  дійсно витримується з достатньою точністю. Для кроку  $W = 55$  мкм похибка  $(\Delta_W)/W$  не перевищує  $\approx 2\%$ , а для мікропризми з кроком  $W = 27$  мкм — не більше 7–8 %.

Однак вертикальне позиціонування різця з тією ж самою точністю  $\Delta_H = \pm 0,5$  мкм для номінальної величини  $H = 1,1$  мкм призводить до формування рельєфу, глибина якого може змінюватися від  $H_{\min} = 0,4$  мкм до  $H_{\max} = 1,6$  мкм. Унаслідок існування зворотного кута мікропризм  $\beta \approx 3^\circ$  різна глибина впливає і на ефективний період ґратки  $D_i$ , який, як свідчить аналіз зображення, також може відповідно змінюватися від  $D_{\min} = 0,5W$  до  $D_{\max} = 2,0W$ . Відмітимо, що періоду  $D_i = 3-4W$  не виявлено, тому похибка не перевищує номінальної глибини рельєфу, тобто  $\Delta H < 1,1$  мкм.

Групи штрихів з однаковим ефективним періодом  $D_i$  інтерферують один з одним, формуючи на екрані відповідні максимуми інтенсивності. Так, наприклад, для призми  $PD = 1,0\Delta$  з кроком  $W = 48$  мкм (рис. 8) спостерігаються інтерференційні максимуми від 1-го до 5-го порядку дифракції, що відповідають номінальному кроку рельєфу (рис. 11, зона AC). Однак крім того спостерігається ціла сис-

тема додаткових максимумів. Для 1-го порядку дифракції, який найбільш цікавий для створення ахроматизуючих пристроїв, спостерігається максимум при куті  $\varphi_{11} = 0,38^\circ$ , що відповідає подвійному кроку рельєфу  $W_{\max} \approx 1,8W = 92$  мкм (рис. 11, зона  $KL$ ), а також максимуми для кроків  $W_i = 38, 44, 54, 65, 77, 93, 137$  та  $198$  мкм (рис. 11, зони  $KF$  та  $BM$ ) з кутами інтерференції  $\varphi_{11}$  від  $0,18^\circ$  до  $0,95^\circ$ . Усереднення по всіх групах штрихів з різними кроками  $D_i$  дійсно може дати картину розподілу інтенсивності максимумів, які спостерігаються експериментально і зображені на рис. 6–8.

Випадкові коливання глибини рельєфу  $\Delta_H$  можуть істотно змінювати структуру дифракційної картини навіть для великих кроків рельєфу. Так, наприклад, для кроку  $W = 600$  мкм зміна кроку до  $W = 602$  мкм не призводить до помітного зміщення інтерференційних максимумів. Такі розрахункові дані наведені на рис. 6,а (трикутники). Однак зміна глибини рельєфу ( $H + \Delta_H$ ) лише на  $\Delta_H = \pm 0,5$  мкм призводить до відповідного коливання кроку рельєфу  $\Delta_W = \pm 25$  мкм та помітного переміщення розрахункових інтерференційних максимумів  $W600k18$  з кутом  $\varphi_{18} = 1,097^\circ$ , 18-й порядок ґратки (рис. 6,б, ромби) та піка  $W600k19$  з кутом  $\varphi_{19} = 1,157^\circ$ , 19-й порядок (рис. 6,б, квадрати). Оскільки при цьому центральний дифракційний максимум, який розміщується під кутом рефракції  $\varphi_D = \theta_R = 1,12^\circ$ , практично не переміщується, усереднення по всіх 4 мікропризмах у полі зору (для  $W = 600$  мкм за умови  $(Nd) \approx 2400$  величина  $N = 4$ ) може дати розподіл інтенсивності на екрані саме той, що спостерігається експериментально (рис. 6, ромби).

Причиною дефектів поверхні мікропризм є не тільки коливання кроку  $W$  та глибини рельєфу  $H$ , а й вібрації різця вздовж штрихів рельєфу в процесі різання. На рис. 12 наведено зображення поверхні досить задовільної за оптичними параметрами призми  $PD = 10,0\Delta$  з кроком  $W = 600$  мкм з номінальною глибиною рельєфу  $H = 120$  мкм. Профіль рельєфу, однак, виглядає зовсім жахливо, про оптичну якість робочих поверхонь мова не йдеться.

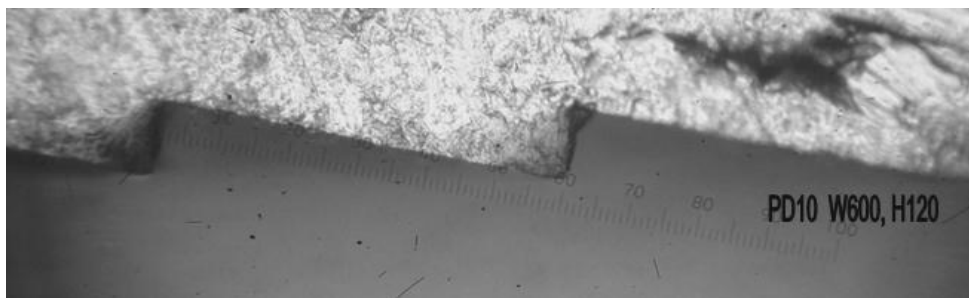


Рис. 12. Зображення поверхні мікропризми  $PD = 10,0\Delta$  кроком  $W = 600$  мкм

Експериментально виявлено також наявність різнотовщинності виготовлених мікропризмових елементів, яка складає до  $35$  мкм на діаметрі  $D_{np} = 30$  мм. Такий дефект впливає на процес заломлення променів і на формування просторової дифракційної картини. Зокрема, внаслідок цього не реалізуються вузькі інтерференційні максимуми, тому немає і об'єкта, який повинен переміщуватися в кутовому

дифракційному просторі зі зміною довжини хвилі. Таким чином, не працює сам механізм появи ахроматизуючих властивостей мікропризм.

Відзначимо, що ахроматизуюча дія малих мікропризм базується на тому, що вже існують хроматична аберація на рефракційній призмі внаслідок різних кутів рефракції різнокольорових променів білого світла, яку необхідно скомпенсувати [6]. Якщо застосувати такий пристрій окремо, це призведе до появи також самого хроматизму, але в зворотному напрямку: синє забарвлення зорового образу стане з боку вершин мікропризм, а червоне — з боку їхніх основ. Тому для створення ахроматичних структур для офтальмології необхідно використовувати саме подвійні мікропризми: рефракційну — для необхідної рефракції променів, та дифракційну — для точної компенсації її хроматизму.

Також відзначимо, що промені світла в зазначеній рефракційно-дифракційній мікропризмовій структурі падають на дифракційну ґратку не перпендикулярно до її утворюючої поверхні, як це розглянуто в роботі, а під певними кутами, які задаються рефракційною призмою. В офтальмологічних компенсаторах косоокості обидві мікропризми розміщуються рельєфами назустріч один одному для створення захищеної від зовнішніх впливів герметичної структури, тому в розрахунках необхідно врахувати падіння променів на малу мікропризму з боку рельєфу під вхідними кутами, різними для різних довжин хвиль. Зазначене вище істотно не впливає на отримані принципові результати, але необхідні більш докладні розрахунки кутових параметрів таких подвійних мікропризм, які в подальшому будуть нами виконані.

Автор висловлює глибоку подяку співробітникам ІПРІ НАН України А.С. Лапчуку, В.М. Христіну та О.О. Токаліну за обговорення отриманих результатів і корисні дискусії з проблеми хроматизму білого світла.

## Висновки

1. Розраховано дифракційно-рефракційні характеристики мікропризм, які дозволяють визначити оптимальні кроки рельєфу при заданій призматичній дії призм для створення ефективних ахроматичних пристроїв.

2. Експериментально досліджено структуру виготовлених в ІПРІ НАН України ахроматизуючих мікропризм. Встановлено, що кути заломлення виготовлених пристроїв витримується з достатньою точністю, а ахроматизуючі властивості мікропризм відсутні внаслідок дефектів рельєфу, які проявляються, перш за все, в різній його висоті, а також у наявності коливань глибини вздовж канавок рельєфу.

3. Для створення ефективних ахроматизуючих мікропризм необхідно:

— при формуванні мікрорельєфу забезпечити точність вертикального позиціонування алмазного різця не гірше 0,1 мкм, оптимальні величини становлять 50–70 нм;

— модернізувати відповідним чином станцію термопресування для забезпечення різнотовщинності мікропризмових виробів не гірше 3–5 мкм.

4. Модернізація станції нарізки та термопресування ІПРІ НАН України дозволить не тільки створити ефективні ахроматичні офтальмологічні пристрої, а й

значно підвищити оптичну якість існуючих призмових компенсаторів косоокості та діагностичних лінійок.

1. Борн М. Основы оптики / М. Борн, С. Вольф. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
2. 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.
3. US Patent 6,934,084, МКІ G 02 В 5/18. Thinner, Lighter and Lower Abberation Prisms for Ophthalmic Applications / Ranjana Pandya; заявл. 02.07.2002; опубл. 23.08.2005.
4. Шляхи поліпшення оптичних характеристик мікропризмових структур / В.В. Петров, Є.Є. Антонов, С.М. Шанойло, А.С. Лапчук // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2010. — Т. 12, № 2. — С. 25–33.
5. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids / E.D. Palik. — San Diego: Academic Press, 1998.
6. Loewen E. Diffraction Grating Handbook. — [6-th ed.] / E. Loewen. — Newport Corporation, 2005. — 269 p.

Надійшла до редакції 25.02.2014