

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

АНТОНОВ ЄВГЕН ЄВГЕНОВИЧ



УДК 004.94: 535.24

**МЕТОДИ
МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
МІКРОРЕЛЬЄФНИХ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ
СТРУКТУР ДЛЯ СВІТЛОПОВЕРТАННЯ
ТА РЕФРАКЦІЇ СВІТЛА**

Спеціальність 01.05.02 –
математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацію є рукопис.

Робота виконана у Відділі систем оптичної реєстрації інформації
Інституту проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України.

Науковий консультант:

академік НАН України, доктор технічних наук, професор
Петров Вячеслав Васильович
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
директор інституту

Офіційні опоненти:

член-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор
Мохор Володимир Володимирович
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова
НАН України,
директор інституту

член-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор
Лисенко Володимир Сергійович
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,
головний науковий співробітник
відділу функціональних матеріалів і структур

доктор технічних наук, професор
Богданов Олександр Михайлович
Університет митної справи та фінансів МОН України,
професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій

Захист відбудеться "07" квітня 2020 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. №18, ауд. 516.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий "25" лютого 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02
кандидат технічних наук, доцент

М.М.Орлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В дисертаційній роботі аналізуються мікрорельєфні структури, які створені плоскими дзеркальними гранями і які можливо виготовити з необхідною оптичною якістю відомим методом "алмазного" різання. Такі мікрорельєфні та мікропризмові поверхні призначені, перш за все, для заломлення та відбиття променів світла, найчастіше – для видимого спектрального діапазону. Відомими прикладами застосування мікрорельєфних елементів є катафоти (світлоповертачі) для дорожнього господарства з мікрокубічною світлоповертальною поверхнею, а також мікропризми для офтальмологічних застосувань. Існують і інші галузі використання спеціальних пристроїв з мікрорельєфними поверхнями, зокрема, для фокусування оптичних зображень та для гомогенізації променів світла.

В усіх випадках для практичного формування спеціалізованих мікроструктурованих поверхонь необхідний етап математичного моделювання таких структур зі створенням відповідних моделей для отримання необхідних оптичних параметрів мікрорельєфу: кроків, глибин та кутів. Саме така проблема вирішується в даній роботі.

Світлоповертальні елементи широко використовуються у високорозвинених країнах, як важливий елемент підвищення безпеки дорожнього руху, тому проблема створення вітчизняних вискоефективних мікрорельєфних світлоповертальних пристроїв є вельми важливою для дорожнього господарства країни. Оснащення автошляхів дорожніми знаками та орієнтуючими оптичними пристроями зі світлоповертальними елементами, дозволяє значно поліпшити умови керування автотранспортом в темну пору доби та за поганих погодних умов. За рахунок використання світлоповертальних елементів відстань, на якій для водія стає помітною перешкода під час руху автомобіля в нічний час, збільшується з 25–40 м до 300–400 м, що знижує потенційний ризик наїзду автомобіля на перешкоду майже в 7 разів. При цьому необхідно, щоб всі дорожні оптичні пристрої зі світлоповертальними елементами були помітні з досить великої відстані, тобто світлоповертання має бути вискоефективним. Для створення таких вітчизняних світлоповертачів необхідно виконати комплекс наукових і прикладних досліджень зі створення відповідних вискоефективних світлоповертальних матеріалів, що в свою чергу потребує математичного моделювання оптичних параметрів таких структур.

Іншою важливою галуззю застосування мікрорельєфних структур є офтальмологія – так звані мікропризми Френеля широко використовуються для діагностики стану органу зору та для лікування косоокості. Дійсно, дитяча косоокість сьогодні є однією з невирішених глобальних проблем людства. Косоокість не є тільки косметичною проблемою. Така хвороба обмежує вибір майбутньої професії, тому має великі соціальні наслідки. Тільки в Україні існує понад 500 тисяч хворих на косоокість дітей, на рік проводиться близько 10 тисяч хірургічних операцій з виправлення такого дефекту зору. В той же час косоокість може лікуватися і терапевтично мікропризмами, а в разі

хірургічного втручання при використанні мікропризм кількість операцій зменшується зі звичайних 3–5 до однієї.

Ще однією невирішеною офтальмологічною проблемою є макулодистрофія, тобто ураження центральної частини сітківки ока – макули. Центральна сліпота у населення віком понад 50 років в 80 % спричинена віковою макулодистрофією, яка є другою після глаукоми причиною сліпоти людей похилого віку в усьому світі. Така хвороба також може успішно лікуватися мікропризмами, які спрямовують промені світла на неуражені частини сітківки ока людини.

Для лікування таких складних вад зору як у дітей, так і у дорослих, необхідні спеціальні окуляри, які поєднують дію сферо-циліндричних лінз та призматичних заломлюючих елементів в широкому діапазоні оптичної сили кожного з зазначених компонентів. Для створення високоякісних офтальмологічних мікропризм та терапевтичних призм-рефракційних окулярів на першому етапі необхідно моделювання їх оптичних характеристик.

Аналогічна ситуація з фокусуєчими мікропризмовими структурами. Якість лінз Френеля, виготовлених методами фотолітографії та прямого лазерного запису, не дозволяє формувати високоякісні візуальні зображення. Тому необхідно моделювання та розрахунок параметрів фокусуєчих кільцевих структур з плоскими дзеркальними гранями, які можна формувати методом алмазного різання.

Розробка математичних моделей та методів моделювання оптичних характеристик мікропризмових структур та дослідження створених світлоповертальних та рефракційних пристроїв для формування променів світла і склали основу роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) Національної академії наук (НАН) України. Тема роботи повністю відповідає науковому напрямку установи "Фізичні основи, принципи, методи та системи реєстрації і перетворення інформації, створення технології довгострокового зберігання цифрової інформації" згідно з напрямком науково-технічної діяльності за Державним класифікатором України за кодом І.2.12.13.05 – "Елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування".

Основні результати дисертаційної роботи було отримано автором при виконанні наступних тем науково-дослідних досліджень ІПРІ НАН України:

1. "Розробити та дослідити високоефективні мікрорельєфні структури та елементи перетворення світлових потоків" (шифр "Промінь", номер державної реєстрації (ДР) № 0119U001166, 2019–2022 рр.); 2. "Розробити та дослідити комплексну технологію виготовлення мікропризмових оптичних структур зі зменшеним хроматизмом та підвищеним світлоповертанням" (шифр "Спектр", ДР № 0119U000115, 2016–2018 рр.); 3. "Розробка та впровадження високоефективних оптичних мікрорельєфних дифузорів для систем наведення, слідування та керування рухомими об'єктами" (шифр "Дифузор",

ДР № 0118U001680, 2018–2019 рр.); 4. "Розробка та впровадження високоефективних кругових світлоповертальних елементів для автомагістралей та транспортних мереж м. Києва" (шифр "Круг", ДР № 0117U002765, 01.2017–12.2017 р.); 5. "Розробити технології виготовлення мікропризмових структур та дифракційних оптичних елементів для систем обробки, перетворення та реєстрації інформації на основі використання метаматеріалів" (шифр "Грань", ДР № 0110U002271, 2013–2015 рр.); 6. "Розробка фізико-технічних основ створення наноструктурних рельєфів для збереження інформації та перетворення оптичних зображень" (шифр "Якість", ДР № 0111U001317, 2011–2013 рр.); 7. "Розробка фізико-технічних основ технології створення комбінованих рефракційних мікрорельєфних структур для офтальмології та медико-біологічних досліджень". (шифр "Сенсор", ДР № 0109U000180, 2011–2013 рр.); 8. "Розробка технології створення та організація виготовлення комбінованих сферо-циліндро-призматичних лінз та окулярів та їх основі для лікування косоокості та інших складних вад зору" (шифр "Комбілінза", ДР № 0111U001937, 01.2006–12.2006 р.); 9. "Розробка фізико-технічних основ технології виготовлення мікрорельєфних структур перетворення оптичних зображень" (шифр "Магніт", ДР № 0106U000401, 2008–2010 рр.); 10. "Створення та впровадження технології промислового виробництва оптичних компенсаторів з мікропризмовою структурою Френеля для діагностування та лікування косоокості у дітей та хворих на вікову макулодистрофію" (шифр "Зір", ДР № 0107U003577, 01.2007–12.2007 р.); 11. "Створення та впровадження технології промислового виробництва мікропризмових світлоповертальних елементів" (шифр "Блік", ДР № 0106U006727, 01.2006–12.2006 рр.).

За усіма зазначеними 11 темами науково-дослідних досліджень автор дисертації був відповідальним виконавцем.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка методів математичного моделювання оптичних параметрів мікропризмових світлоповертальних та рефракційних структур для підвищення ефективності спеціалізованих пристроїв формування світлових потоків, що є важливою науково-технічною проблемою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз та узагальнити існуючі методи моделювання світлоповертальних та рефракційних мікрорельєфних структур.

2. Розробити математичні моделі мікропризмових світлоповертачів, на основі яких розрахувати оптичні характеристики симетричного та асиметричного світлоповертальних елементів; моделювати процес екранування ефективної поверхні світлоповертача при різних кутах її освітлення; визначити необхідні кути алмазного інструменту при формуванні дзеркальних граней елемента для забезпечення мінімальних втрат світлового потоку при відбиванні світла від робочих поверхонь.

3. Створити математичну модель рефракційного мікропризмового елемента, який використовується в офтальмології для відхилення променів світла на строго визначені кути; розрахувати необхідні заломлюючі кути призм для одинарних та симетричних здвоєних мікропризм; визначити втрати потоку світла при проходженні його через зазначені мікропризмові поверхні.

4. Розробити метод моделювання фокуруючих мікрорельєфних структур з плоскими дзеркальними гранями та виконати комплекс розрахунків параметрів таких мікропризм з постійним кроком та з постійною глибиною рельєфу.

5. Розробити метод оцінювання оптичної якості створених світлоповертальних та рефракційних мікропризмових поверхонь за дифракцією лазерного випромінювання на мікрорельєфі; виконати комплекс розрахунків оптичних параметрів пройдених та відбитих світлових потоків для контролю мікрорельєфу за дифракційною ефективністю променів.

6. Розробити метод моделювання роздільної здатності зображень та створити експериментальний стенд з електронною реєстрацією параметрів тестових штрихових оптичних типів, застосовуючи який дослідити вплив мікропризм на роздільну здатність зорових образів; отримати порівняльні оптичні характеристики існуючих мікропризм різних виробників для визначення параметрів оптимальних рефракційних структур.

7. Розробити метод моделювання та дослідити вплив дифракції та хроматизму білого світла на роздільну здатність оптичних зображень; провести для мікропризм різної оптичної сили математичне моделювання спектрів пропускання при наявності спеціальних кольорових світлофільтрів з метою визначення зміни контрасту зображень; отримати кількісні характеристики зменшення зони хроматизму при використанні світлофільтрів з метою створення оптимальних офтальмологічних мікропризм.

8. Розробити модель структури та провести математичне моделювання оптичних параметрів подвійних рефракційно-дифракційних мікропризм для створення ахроматичних мікропризм; експериментально дослідити роздільну здатність оптичних зображень при використанні ахроматизуючих дифракційних мікропризм з метою визначення можливості компенсації позитивного дисперсійного хроматизму рефракційних мікропризм негативним дифракційним хроматизмом спеціальних ґраток.

Об'єктом дослідження є процес моделювання рефракції світла в мікрорельєфних структурах, сформованих плоскими дзеркальними гранями, які застосовуються при створенні об'єктів нової техніки й нових технологій, зокрема спеціалізованих світлоповертальних та рефракційних мікропризмових пристроїв.

Предметом дослідження є математичні моделі мікрорельєфних об'єктів, оптичні характеристики мікропризмових світлоповертальних та рефракційних структур, вплив створених мікропризм на характеристики пройдених та відбитих світлових потоків.

Методи дослідження – математичне моделювання оптичних характеристик геометричних прототипів мікропризмових елементів з використанням законів геометричної оптики, теорії Релеєвського когерентного розсіювання світла, теорії амплітудно-фазової дифракції та інтерференції світла, а також експериментальне дослідження мікрорельєфних структур для світлоповертання та рефракції світла методами лазерної оптики і кількісної спектроскопії видимого діапазону спектру.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукові результати визначаються комплексним застосуванням математичних моделей мікрорельєфних структур та дослідженням параметрів реальних спеціалізованих структур для рефракції та відбиття променів, створених за результатами виконаних розрахунків. В дисертаційній роботі отримано нові результати з математичного моделювання та визначення оптичних характеристик мікрорельєфних та мікропризмових структур, зокрема:

1. Запропоновано метод моделювання оптичних характеристик мікропризмових світлоповертальних пристроїв, який відрізняється використанням геометрично-алгебраїчних моделей структур, на основі якого виконано комплекс розрахунків параметрів таких пристроїв, що дозволило створити більш ефективні за світлоповертанням мікрорельєфні світлоповертачі різних типів з плоскими дзеркальними світловідбивними гранями.

2. На основі вперше розробленої математичної моделі нових рефракційних мікропризм, яка відрізняється застосуванням для створення призматичної дії здвоєних мікропризм, визначено оптичні параметри симетричних мікропризмових структур для офтальмології, що дозволило формувати симетричні діагностичні пристрої зі здвоєних мікропризм і більш надійно проводити діагностику дефектів зору та вимірювання кутів косоокості.

3. З використанням розроблених математичних моделей, які відрізняються застосуванням структур з плоскими гранями, вперше виконано комплекс розрахунків оптичних параметрів фокусуючих мікропризмових структур різних типів з плоскими дзеркальними гранями, на основі яких створено за технологією алмазного різання відповідні прецизійні оптичні пристрої для фокусування зображень та гомогенізації променів світла.

4. Набув подальшого розвитку метод оцінювання оптичної якості світлоповертальних та рефракційних мікропризмових поверхонь за дифракцією лазерного випромінювання на мікрорельєфі, що дозволило виконати комплекс розрахунків інтенсивності пройдених та відбитих світлових потоків для складних тришарових структур з метою контролю параметрів мікрорельєфу за дифракційною ефективністю променів.

5. Запропоновано новий метод моделювання роздільної здатності оптичних зображень, який відрізняється більшою точністю вимірювань за рахунок використання електронної реєстрації потоків світла від тестових штрихових прототипів, з використанням якого вперше отримано порівняльні оптичні характеристики офтальмологічних мікропризм різних виробників та

визначено внесок мікропризм у зниження контрасту і роздільної здатності зображень при використанні мікропризм.

6. Проведено математичне моделювання та експериментально досліджено вплив кольорових світлофільтрів на зону дисперсійного хроматизму рефракційних мікропризм, що дозволило кількісно визначити зменшення зони хроматизму при використанні відповідних кольорових світлофільтрів.

7. Вперше на основі запропонованої моделі, яка відрізняється використанням подвійних рефракційно-дифракційних мікропризм, розраховано оптичні характеристики спеціальних ахроматичних мікропризм з подвійним рельєфом, проведено експериментальне дослідження виготовлених ахроматизуючих мікропризм – дифракційних ґраток з малим кроком мікрорельєфу, які призначені для компенсації дисперсійного хроматизму рефракційних мікропризм дифракційним хроматизмом ґраток.

Практичне значення одержаних результатів. Результати склали наукову основу для створення цілого ряду практичних пристроїв для світлоповертання та рефракції променів, які сьогодні виготовляються та широко використовуються в різних галузях господарства країни, зокрема:

- мікропризмові світлоповертачі – дорожні розмічальні вставки типу *ВРД-2* в кількості 200 шт. встановлено на мосту ім. Є.О.Патона в м. Києві. Дослідна партія в кількості 500 шт. кругових бордюрних катафотів з мікропризмовими світлоповертальними елементами встановлена на площі Перемоги, біля станції метро "Лівобережна" та стадіону "Динамо" в м. Києві. Зараз вирішується питання про сертифікацію таких катафотів в Україні;

- діагностичний набір типу *КК-42*, що складається з 42 мікропризмових компенсаторів косоокості номіналами від 0,5 до 30,0 призмових діоптрій, випускається в необхідній кількості дослідним виробництвом Інституту проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України, сьогодні виготовлено та передано лікарям-офтальмологам близько 400 таких наборів;

- набір діагностичних лінійок *ДНСК-1* для експрес-діагностики косоокості, який складається з 30 мікропризм різних номіналів, виготовляється в ІПРІ НАН України за заказами лікарів-офтальмологів, клінік та кабінетів відповідного профілю з усієї України;

- за рецептами 52 лікарів-офтальмологів з усіх регіонів України в ІПРІ НАН України виготовляються унікальні терапевтичні призмo-сферо-циліндричні рефракційні окуляри з мікропризмами, вже виготовлено понад 2300 таких окулярів і потреба в цих пристроях помітно збільшується.

Враховуючи велику практичну важливість робіт зі створення та впровадження офтальмологічних мікропризм та мікропризмових технологій для діагностики та терапевтичного лікування косоокості Кабінет Міністрів України своїм рішенням від 29 квітня 2013 р. № 284-р присудив Премію Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій за роботу "Наукова розробка сучасних компенсаторних механізмів оптичної корекції захворювань органу зору, розробка новітньої технології та організації серійного виробництва оптичних елементів з мікропризмовою

структурою для їх застосування в офтальмологічній практиці" групі з 9 авторів з Інституту проблем реєстрації інформації НАН України, з Київської міської клінічної офтальмологічної лікарні "Центр мікрохірургії ока" та з Національної медичної академії післядипломної освіти ім. П.Л.Шупика МОЗ України. Автор дисертації також має диплом Лауреата зазначеної премії за номером № 001.

Виготовлені в ІПРІ НАН України за розрахунками автора мікропризмові фокусуючі структури та мікрорельєфні дифузори світлових потоків використовуються рядом спеціальних підприємств для гомогенізації променів світла в системах керування та слідкування за рухомими об'єктами замість коштовних закордонних аналогів.

Особистий внесок автора. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно і викладені в написаних одноосібно розділах 2 монографій з мікропризмової тематики, 5 одноосібних публікаціях в фахових журналах, 9 одноосібних матеріалах спеціалізованих наукових конференцій.

Автором також самостійно здійснено вибір наукового напрямку досліджень, запропоновано мету та завдання роботи, сформульовано об'єкт та предмет досліджень. Самостійно виконано аналіз та систематизацію літературних даних з мікропризмової тематики.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на 27 науково-технічних конференціях та спеціалізованих семінарах, у тому числі на 18 конференціях з міжнародною участю, а саме:

(1). Міжн. конф. "2-й Укр. Рефракційний пленер - 2018", Київ, 18-20 жовтня 2018 р. [37]; (2). Межд. конф. по детской офтальмологии, Одесса, 23-24 мая 2018 г. [38]; (3). Міжн. конф. "1-й Укр. Рефракційний пленер - 2017", Київ, 20-21 жовтня 2017 р. [40]; (4). VI науково-практ. конф. "Медична реабілітація дітей з аномаліями рефракції", Львів, 19-20 червня 2015 р. [43]; (5). 8th Int. Conf. WCIS-2014, Tashkent, Uzbekistan, 25-27 Nov. 2014. [45]; (6). XII Межд. конф. "Федоровские чтения-2014", Москва, 19-20 июня 2014 г. [46]; (7). Науково-практ. конф. "Новітня офтальмохірургія та сучасні можливості діагностики та лікування очної патології", Київ, 20-21 лист. 2013 р. [48]; (8). XI Всерос. конф. "Федоровские чтения-2013", Москва, 21-22 июня 2013 г. [49]. (9). Научно-практ. конф. "Филатовские чтения-2013", Одесса, 23-24 мая 2013 г. [50]; (10). Міжн. конф. з дитячої офтальмології, Севастополь, 03-05 жовтня. 2012 р. [51]; (11). XI Всерос. конф. "Федоровские чтения-2012", Москва, 20-22 июня 2012 г. [52]; (12). Конф. по информ. технологиям, Ташкент, 3-10 сент. 2011 г. [53]; (13). IX Всерос. конф. "Федоровские чтения-2011", Москва, 22-24 июня 2011 г. [54]; (14). 16 Афро-Азиатский Конгресс по офтальмологии, Turkey, Istanbul, 13-16 June, 2012. [55]; (15). Межд. конф. "Наука, техника, инновационные технологии в эпоху Великого Возрождения", Ашгабат, 10-12 июня 2011 г. [56]; (16). IX Съезд офтальмологов России, Москва, 16-18 июня 2010 г. [58]; (17). IV научно-практ. конференция детских офтальмологов Украины, Киев, 01-02 октября 2009 г. [60]; (18). VIII Всерос. конф. "Федоровские чтения-2009", Москва, 2009. [61].

Публікації. Безпосередньо за тематикою дисертаційної роботи опубліковано 62 наукові роботи. Основні наукові результати висвітлено в 24 наукових публікаціях, з яких 2 монографії; 15 статей в наукових фахових журналах України; 5 наукових статей у закордонних виданнях, проіндексованих у базі даних "Scopus", з яких 2 статті в журналах 1-го квартиля (Q1), 1 стаття 2-го квартиля (Q2) та 1 стаття 4-го квартиля (Q4); 2 патенти України на винаходи. Результати роботи також відображено в 2 статтях в інших наукових журналах, 27 публікаціях матеріалів науково-технічних конференцій та в отриманих 9 патентах України на корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків з актами використання результатів роботи та переліком публікацій автора за темою дисертації. Робота містить 159 рисунків та 7 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 276 сторінок основного тексту. Обсяг, що займають анотація, список використаних джерел з 204 найменувань та 2 додатки становить 50 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено дані щодо наукової новизни, особистого внеску здобувача, практичної цінності та впровадження результатів. Перелічено наукові форуми, на яких проведено апробацію основних положень.

В розділі 1 проведено аналіз сучасного стану методів математичного моделювання існуючих мікрорельєфних структур, а також конструкцій пристроїв для світлоповертання, рефракції та фокусування променів світла.

Показано, що сьогодні у відкритій доступній літературі немає даних щодо деталей розрахунків та технологій виготовлення світлоповертачів з плоскими гранями. Тому необхідна розробка методів моделювання та дослідження параметрів асиметричних та симетричних світлоповертальних елементів для необхідних кутів освітлення ϕ_0 , в тому числі і для малих кутів.

При моделюванні оптичних параметрів **світлоповертальних елементів** з метою підвищення ефективності світлоповертачів доцільно в подальших дослідженнях сконцентруватися на розгляді мікропризмових світлоповертачів з дзеркальними відбивними гранями, які забезпечують найбільш ефективне світлоповертання серед усіх існуючих світлоповертачів.

Зокрема, для асиметричних світлоповертачів необхідне моделювання їх фізико-технічних параметрів та розрахунок характеристик, за яких робоча світловідбивна поверхня пристрою займає повну площу його поверхні. При виготовленні дзеркальних робочих поверхонь такого катафоту методом алмазного різання необхідно також змодельовати вплив параметрів ріжучого інструменту на оптичні характеристики отриманого пристрою. В результаті можливо розробити асиметричні катафоти з максимальною робочою поверхнею для будь-якого заздалегідь заданого кута освітлення ϕ_0 .

Для симетричних світлоповертачів на основну увагу заслуговує напрямок створення методів моделювання пристроїв з розширеною діаграмою світлоповертання. Одним з підходів є металізація поверхонь одиничного куткового відбивача, при цьому відбивання світла здійснюється від металізованих поверхонь замість повного внутрішнього відбивання від прозорих дзеркальних граней. Іншим варіантом є моделювання симетричних світлоповертачів з нахилом оптичної осі, що дозволяє створювати пристрої з розширеною діаграмою світлоповертання в напрямку нахилу осі.

В результаті аналізу виконаних робіт з моделювання та створення **мікропризмових структур для офтальмології** показано, що сьогодні не існує універсальних мікропризмових виробів, які задовольняють всім вимогам фахівців-офтальмологів. З огляду на це, можна зробити наступні висновки:

Використання мікропризмових френелівських структур є найбільш зручним засобом діагностики органу зору і практично єдиною можливістю для створення комбінованих складних призморефракційних лінз великої призматичної дії для їх застосування в лікувальних окулярах.

Для створення високоякісних мікропризм і мікропризмових пристроїв, в тому числі ахроматичних мікропризм, потрібна розробка методів моделювання і детальні розрахунки геометричних і оптичних характеристик рефракційних елементів для діагностики дефектів біокулярного зору і дифракційно-рефракційних мікропризмових структур з подвійним мікрорельєфом для створення ахроматичних мікропризм.

Показано, що для виготовлення складних окулярів з призморефракційними лінзами для лікування косоокості необхідне моделювання параметрів таких пристроїв з урахуванням необхідності захисту мікрорельєфу у виробках від зовнішніх пошкоджень. В результаті можна очікувати створення нового типу жорстких мікропризм Френеля з прозорих оптичних пластиків, оптичні властивості яких не змінюються навіть при тривалій експлуатації виробів.

Аналіз методів формування мікрорельєфних структур **для фокусування зображень** показує, що якість фокусуючих структур, які виготовлені методами фотолітографії та прямого лазерного запису з наступним травленням фоторезисту, не може вважатися оптичною. Такі поверхні призначені виключно для фокусування променів, але вони не придатні для формування прецизійних візуальних зображень, як це потрібно для офтальмологічних мікропризм, або для формування високоякісних гомогенізованих променів.

Показано, що методи моделювання параметрів світлоповертачів та офтальмологічних мікропризм повинні враховувати явища дифракції світла на періодичній мікропризмовій структурі, внаслідок чого відбувається додаткове розширення світлових променів.

В розділі 2 запропоновано математичні моделі мікропризмових симетричних та асиметричних світлоповертальних елементів і визначено необхідні оптичні характеристики таких структур.

Високоєфективним **асиметричним світлоповертальним** елементом можна вважати пристрій, для якого всі промені, що потрапили на його утворювальну поверхню, розвертаються в зворотному напрямку. Геометрична модель такого світлоповертача зображена на рис. 1.

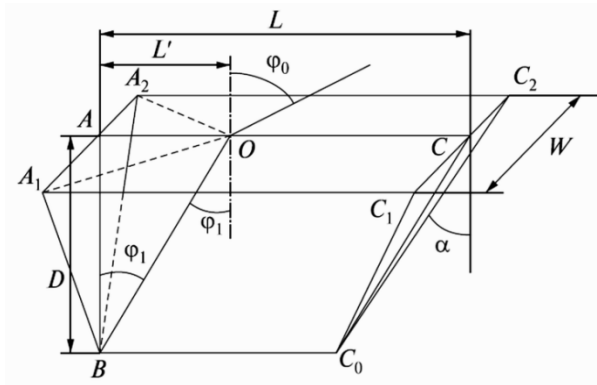


Рис. 1. Модель одиничного світлоповертального елемента асиметричного типу

Для заданого кута падіння променів φ_0 , який вимірюється в кутових градусах [град.], величина робочої зони світлоповертача $S(\varphi_0) = WL$, де W та L – кроки двох серій канавок мікрорельєфу, в проекції на утворювальну поверхню в напрямку кута заломлення φ_1 визначається наступним чином:

$$S(\varphi_0) = WL = 2 WD \operatorname{tg} \varphi_1 = 2 WD \operatorname{tg}(\sin^{-1}((n_0 \sin \varphi_0) / n_1)). \quad (1)$$

Тому необхідне співвідношення між кроками двох серій мікрорельєфу, при якому робоча зона світлоповертача дорівнює повній площі його утворюючій поверхні, визначається наступним виразом:

$$L/W = \operatorname{tg}(\sin^{-1}((n_0 \sin \varphi_0) / n_1)). \quad (2)$$

Таким чином, для кожного кута освітлення φ_0 [град.] можна встановити співвідношення L/W між кроками серій широких прямокутних і вузьких канавок асиметричного світлоповертального елемента, при якому величина його робочої зони $S(\varphi_0)$ дорівнює повній площі утворювальної поверхні S_0 і коефіцієнт активної апертури $S(\varphi_0)/S_0$ становить 100 %. Графік залежності (2) наведено на рис. 2 для випадку, коли мікропризмовий рельєф безпосередньо контактує з повітрям, тобто величина $n_0 = 1,0$; а коефіцієнт $n_1 = 1,585$, оскільки світлоповертальні елементи розглянутого типу найчастіше за все виготовляються з полікарбонату.

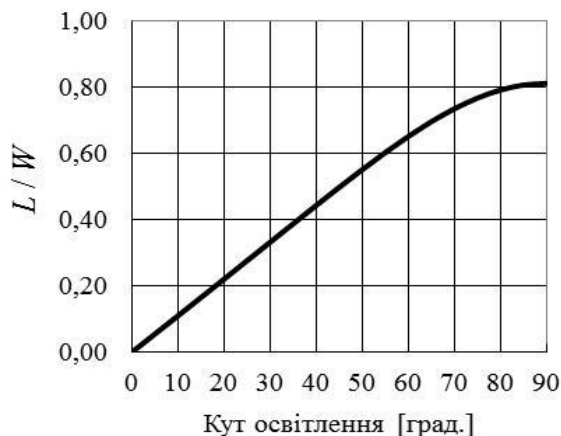


Рис. 2. Співвідношення кроків рельєфу L/W , при якому коефіцієнт $S(\varphi_0) / S_0 = 100 \%$ для рельєфної структури "полікарбонат-повітря"

Результати моделювання свідчать, що при великих значеннях L/W частина світла буде проходити через світлоповертальний елемент після двох відбиттів світла від його бокових граней без "катафотного" ефекту, який виникає тільки при трьох відбиттях променів. При менших значеннях L/W частина робочої зони на утворювальній поверхні буде екрануватися верхнім ребром C_1C_2 (рис. 1) вузької канавки рельєфу і потік світла після внутрішнього відбиття від всіх трьох граней елемента буде розсіюватися всередині катафоту, зменшуючи тим самим ефективність світлоповертання.

Грань $C_0C_1C_2$ (рис. 1) світлоповертального елемента є неробочою, однак кут α між нею і вертикальною торцевою гранню A_1A_2B повинен бути менше кута φ_1 , тому що в іншому випадку частина робочих бокових поверхонь буде екрануватися цієї нахиленою гранню і тому ця частина поверхонь випадає з процесу світлоповертання.

В загальному випадку залежність коефіцієнта активної апертури $S(\varphi_0)/S_0$ від кута освітлення φ_0 для елемента довжиною L^* з полікарбонату ($n_1 = 1,585$), який знаходиться в повітрі ($n_0 = 1,0$) і розрахований для кута освітлення φ_0^* визначиться з урахуванням (2) наступним чином:

$$\begin{aligned} S(\varphi_0)/S(\varphi_0^*) &= \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)) / \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585)) \quad \text{для } L^* < L \\ S(\varphi_0)/S(\varphi_0^*) &= \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0^*)/1,585)) / \operatorname{tg}(\sin^{-1}((\sin \varphi_0)/1,585)) \quad \text{для } L^* > L \end{aligned} \quad (3)$$

Взаємозв'язок між ефективною апертурою $S(\varphi_0)/S_0$ та коефіцієнтом світлоповертання $R(\varphi_0)$ можна визначити наступним чином:

$$R(\varphi_0) = A_0 \cos(\varphi_0) k_B(\varphi_0) S(\varphi_0)/S_0, \quad (4)$$

де величина $A_0 = 2750 \text{ кд / (лк м}^2\text{)}$ – нормувальний множник, який встановлений експериментально і враховує зв'язок між освітленістю поверхні та світлоповертанням; функція $\cos(\varphi_0)$ враховує зміну освітленості одиничної площадки при нахилі поверхні на кут φ_0 до напрямку світлового потоку Ψ_0 ; величина $S(\varphi_0)/S_0$ – ефективна апертура елемента, визначена згідно з виразом (3); коефіцієнт пропускання потоку світла $k_B(\varphi_0)$ через утворювальну поверхню можна розрахувати за формулами Френеля:

$$\begin{aligned} k_B(\varphi_0) &= 1,0 - 0,5(\sin^2(\varphi_0 - \varphi_1) / \sin^2(\varphi_0 + \varphi_1) + \\ &\quad + \operatorname{tg}^2(\varphi_0 - \varphi_1) / \operatorname{tg}^2(\varphi_0 + \varphi_1)). \end{aligned} \quad (5)$$

Графіки залежності коефіцієнта світлоповертання $R(\varphi_0)$, розрахованого згідно (4) для різних ефективних кутів φ_0^* наведені на рис. 3. Для кута освітлення $\varphi_0^* = 70$ градусів [град.] наведені як теоретична (крива 7), так і експериментальна (крива 9) залежності. Дані (9) отримані для системи "полікарбонат - повітря" за умови $L/W = 0,73$.

При моделюванні фізико-технічних характеристик необхідно також врахувати вплив на їх оптичні характеристики особливостей технологічних процесів виготовлення світлоповертачів.

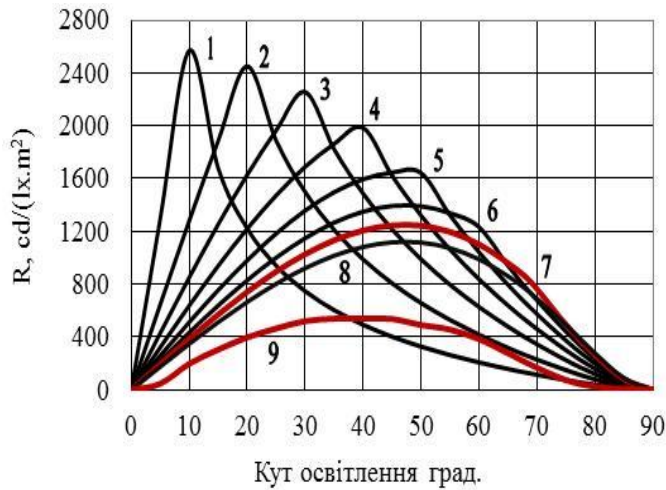


Рис. 3. Коефіцієнт світлоповертання для ефективних кутів $\varphi_0^* = 10$ град. (крива 1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 50 (5), 60 (6), 70 (7) та 80 град. (крива 8). Крива 9 – експеримент ІПРІ НАН України

У випадку, коли мікропризмовий рельєф наноситься на утворювальну поверхню світлоповертального елемента методом алмазного різання, існують додаткові вимоги до кута заточування ріжучого інструменту. Так, ріжучий кут алмазного різця α_G , який використовується для формування вузької канавки асиметричного катафоту, розрахованого для будь-якого кута освітлення φ_0^* , не повинен перевищувати відповідний кут заломлення променя всередині катафоту φ_1^* . Виникають додаткові втрати потоку світла при світлоповертанні, якщо з яких-небудь технічних причин неможливо виготовити різець з досить гострим ріжучим кутом і величина α_G перевищує кут φ_1^* , а формування вузьких канавок проводиться для кутів φ_0^* , визначених відповідно до виразу (3).

Для випадку "А", коли вершина різця з кутом $\alpha_G > \varphi_1^*$ торкається будь-якої точки ребра C_1C_2 (рис. 1), частина бокових робочих поверхонь катафоту взагалі не може бути сформована таким різцем. Площа цієї зони S_1 в проекції на поверхню $A_1A_2C_2C_1$ в напрямку кута φ_1^* становить $WD(\operatorname{tg} \alpha_G - \operatorname{tg} \varphi_1) / 2$. Тоді відповідний коефіцієнт k_1 зменшення (екранування) робочих поверхонь світлоповертача S_{φ_0} з урахуванням виразу (3) визначиться наступним чином:

$$k_1 = (S_{\varphi_0} - S_1) / S_{\varphi_0} = (3 \operatorname{tg} \varphi_1^* - \operatorname{tg} \alpha_G) / 2 \operatorname{tg} \varphi_1^*, \quad (6)$$

З урахуванням коефіцієнту екранізації k_1 можна обчислити ефективну апертуру елемента $S(\varphi_0)/S_0$. Для різця з кутом $\alpha_G = 36$ град. графіки величини $S(\varphi_0)/S_0$, обчислені відповідно до (3) з урахуванням екранування (6), наведені на рис. 4-а. Такий випадок "А" формування мікрорельєфу є найбільш реальним, тому що торкання ребра C_1C_2 катафоту кромкою алмазного різця передбачає формування мікропризмової структури з фіксованим кроком W , що зазвичай потрібно на практиці.

Для різця з робочим кутом $\alpha_G = 40$ град., який набагато легше сформувати з алмазної заготовки, графіки величини $S(\varphi_0)/S_0$, розраховані згідно (3) з урахуванням екранування (6), наведені на рис. 4-б. Результати моделювання свідчать, що збільшення кута різця, наприклад до значення $\alpha_G = 40$ град., не доцільне, тому що в цьому випадку навіть при великих кутах $\varphi_0 = 50\text{--}60$ град. неможливо забезпечити коефіцієнт активної апертури світлоповертача $S(\varphi_0)/S_0$, більший за 60–65 %.

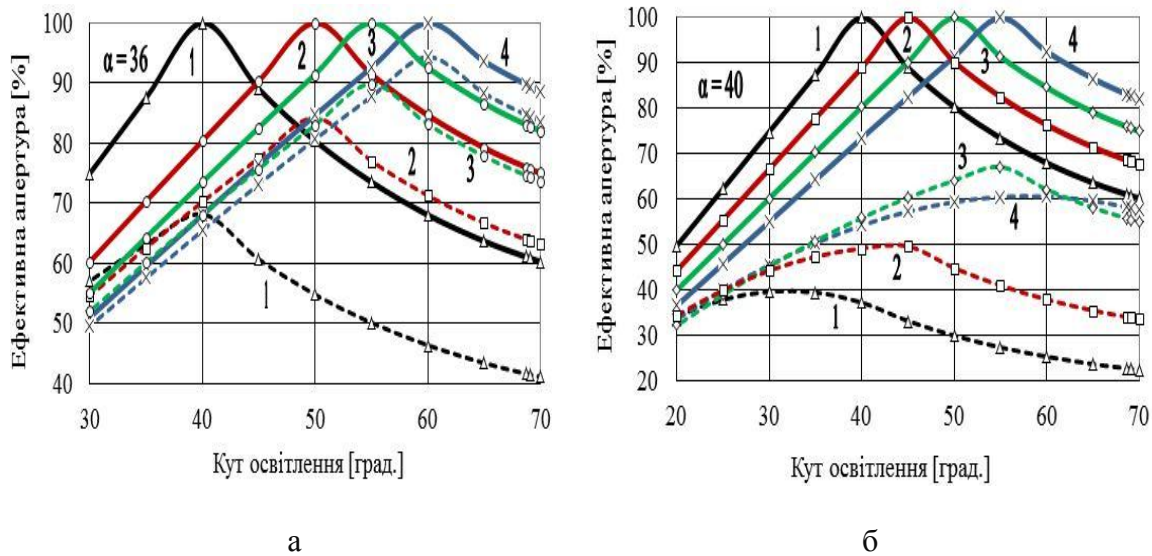


Рис. 4. Ефективна апертура S^*/S_0 залежно від кута освітлення ϕ_0 для кута оптимізації:
 а– $\phi_0^* = 40$ град. (крива 1), 50 (2), 55 (3) та 60 град. (крива 4); б– $\phi_0^* = 40$ град. (крива 1),
 45 (2), 50 (3) та 55 град. (крива 4): суцільна лінія – кут різця α_G дорівнює куту ϕ_1^* ,
 пункт – кут різця $\alpha_G = 36$ град. (а) та 40 град. (б)

У разі формування мікрорельєфу в випадку "В", коли вершина різця з кутом $\alpha_G > \phi_1^*$ торкається точки C_0 (рис. 1), на утворювальній поверхні світлоповертача $A_1A_2C_2C_1$ формується додаткова зона $S_2 = WD (\tan \alpha_G - \tan \phi_1^*)$ та створюються дві відповідні додаткові зони на бокових його поверхнях, які не є робочими для визначеного за виразом (3) кута оптимізації ϕ_1^* . Для цього випадку додатковий коефіцієнт k_2 зменшення ефективної апертури катафоту $S(\phi_0)/S_0$ дорівнює:

$$k_2 = S_{\phi_0}/(S_{\phi_0} + S_2) = 2 WD \tan \phi_1^*/(2 WD \tan \phi_1^* + (WD (\tan \alpha_G - \tan \phi_1^*))) =$$

$$= 2 \tan \phi_1^*/(\tan \phi_1^* + \tan \alpha_G). \quad (7)$$

Відзначимо, що цей випадок формування мікрорельєфу є чисто теоретичним і на практиці застосовується рідко.

Таким чином, математичне моделювання геометричних параметрів асиметричних світлоповертачів дозволяє створити мікропризмові спеціалізовані високоефективні асиметричні світлоповертачі для будь-яких робочих кутів освітлення в діапазоні від 10 до 80 град.

Для **симетричних світлоповертальних** елементів в роботі розглянуто вплив процесу дифракції відбитих променів світла на оптичні параметри світлоповертачів; виконано математичне моделювання параметрів симетричних світлоповертачів з довільним нахилом осі; розраховано вплив процесу металізації на відбивні характеристики симетричних мікропризмових структур, що дозволяє створювати високоефективні світлоповертальні структури з розширеною діаграмою світлоповертання. Моделі таких світлоповертачів наведені на рис. 5.

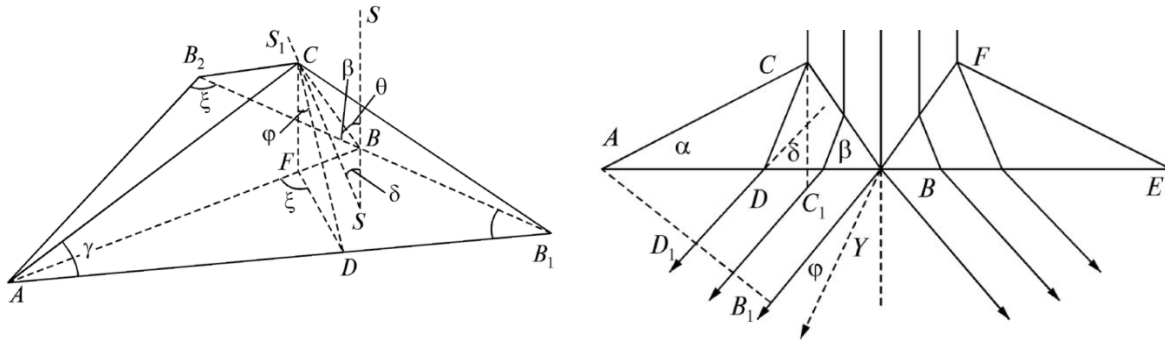


Рис. 5. Геометрична модель та схема проходження променя лазера через симетричний мікропризмний елемент з боку рельєфу

Результати математичного моделювання свідчать, що дифракційні явища виявляються важливими для світлоповертання. Наприклад, для симетричного світлоповертача зменшення кроку рельєфу від $W = 600$ мкм до $W = 50$ мкм істотно збільшує кутову діаграму світлоповертання. Кутове положення дифракційного максимуму 2-порядку зміщується від кута $\varphi_D = 0,14$ град. до $\varphi_D = 1,89$ град., тобто зміна кроку рельєфу симетричного світлоповертача дозволяє формувати пристрої з різними діаграмами світлоповертання для різних відстаней спостереження.

Діаграми світлоповертання для деяких симетричних мікропризмних світлоповертачів ІПРІ НАН України з різними кроками мікрорельєфу, які ілюструють роль дифракції, показані на рис. 6. Масштаб на діаграмах становить 17 кутових хвилин. Для світлоповертальних елементів, призначених для великих відстаней спостереження $L_H = 1000\text{--}2000$ м, крок рельєфу W повинен бути не менше 800–1600 мкм. Для отримання максимально широкої діаграми світлоповертання для невеликих відстаней спостереження $L_H = 100\text{--}200$ м крок мікрорельєфу повинен бути $W = 50\text{--}150$ мкм. Аналогічні висновки стосуються і асиметричних мікропризмних світлоповертачів.

Моделювання дифракційних явищ для світлоповертачів на геометричних моделях дозволяє отримати необхідні фізико-технічні параметри для проектування та виготовлення світлоповертальних пристроїв з оптимальними оптичними характеристиками для необхідних відстаней спостереження.

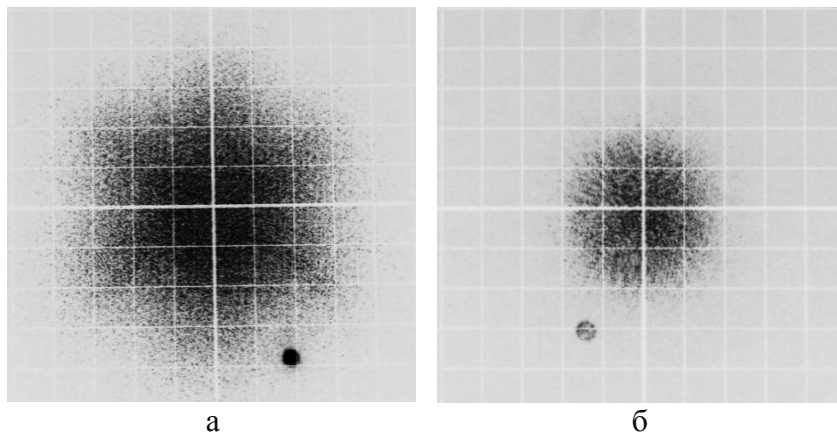


Рис. 6. Діаграма світлоповертання для деяких симетричних світлоповертачів ІПРІ НАН України: а– матриця *СК042* ($W = 600$ мкм); б– матриця *СК061* ($W = 2000$ мкм)

В розділі 3 роботи проведено моделювання та виконано комплекс розрахунків параметрів спеціалізованих призмових структур для офтальмологічних застосувань, що є важливим етапом створення високоякісних мікропризмових виробів для рефракції світлових потоків.

Моделлю мікропризмового елемента Френеля може виступати переріз профілю структури поперек напрямку мікрорельєфу. Зображення такого рельєфу наведено на рис. 7. Рельєф має вигляд серії двомірних лінійних заглиблень трикутного профілю, які сформовані на одній з поверхонь плоскої прозорої утворюючої пластини. Для моделювання такого рельєфу необхідно задати значення кроку рельєфу W_0 , заломлюючого кута мікропризми α і зворотного кута призми β , який визначається технологічними вимогами.

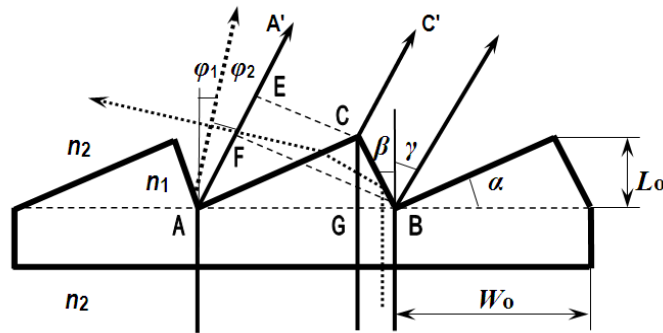


Рис. 7. Модель мікропризмового елемента Френеля

Кут заломлення променя світла φ_2 на кожній грані мікропризмового елемента для будь-якого заданого кута освітлення φ_1 можна визначити, використовуючи закон заломлення світла Снеліуса:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2, \quad (8)$$

де n_1 та n_2 – коефіцієнти заломлення світла для першого та другого середовищ.

Втрати випромінювання на призмах можна моделювати наступним чином. Потік світла, який проходить через зону мікропризми BG (рис. 7), зазнає повного внутрішнього відбиття від бокової грані BC і розсіюється всередині призми. Відповідний коефіцієнт k_{C1} втрат за рахунок екранування частини потоку боковою гранню мікропризми, так зване "віньєтування", можна визначити, як відношення відбитого потоку Ψ_1 (зона BG) до всього падаючого на призму потоку світла Ψ_0 (зона AB):

$$k_{C1} = \Psi_1 / \Psi_0 = (\operatorname{tg} \alpha_R \operatorname{tg} \beta) / (1 + \operatorname{tg} \alpha_R \operatorname{tg} \beta). \quad (9)$$

Коефіцієнт втрат випромінювання k_2 , пов'язаний з внутрішнім відбиттям світлового потоку AG від заломлюючої грані AC мікропризми, в залежності від кута α_R визначається за формулами Френеля, які можна записати в вигляді:

$$k_{C2} = 0,5 \{ \operatorname{tg}^2(\gamma) / \operatorname{tg}^2(2\alpha_R + \gamma) + \sin^2(\gamma) / \sin^2(2\alpha_R + \gamma) \}, \quad (10)$$

де $\gamma = (\varphi_2 - \varphi_1)$ – кут відхилення променя призмою, заломлюючий кут призми $\alpha_R = \varphi_1$ для випадку нормального падіння променя на плоску утворюючу поверхню мікрорельєфу.

Для моделювання додаткових втрат випромінювання k_3 , пов'язаних з безпосереднім відбиттям світлового потоку Ψ_0 від зовнішньої поверхні мікропризми AB , можна застосовувати приблизні формули Френеля для нормального падіння променів:

$$k_{C3} = \{(n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)\}^2. \quad (11)$$

Для визначення сумарних втрат випромінювання в мікропризмах розраховується сумарний потік пройденого через призму світла з урахуванням всіх трьох коефіцієнтів k_{C1} , k_{C2} та k_{C3} , та сумарні втрати падаючого потоку k_C :

$$\begin{aligned} \Psi_C &= \Psi_0 (1 - k_{C1})(1 - k_{C2})(1 - k_{C3}), \\ k_C &= (\Psi_0 - \Psi_C) / \Psi_0. \end{aligned} \quad (12)$$

Залежність сумарних втрат світла $k_C = (\Psi_0 - \Psi_C) / \Psi_0$ від призматичної дії мікропризм Δ , фактично від заломлюючого кута α_R , для декількох значень зворотного кута призми β , який визначається кутом α_G заточування ріжучого інструменту у разі виготовлення матриць-оригіналів методом алмазного різання, наведено на рис. 8 для призми, виготовленої з поліметилметакрилату (ПММА), для якого $n_1 = 1,492$, для чотирьох визначених кутів різця α_G .

Результати моделювання сумарних втрат світлового потоку на мікрорельєфі враховуються при проектуванні мікропризмових пристроїв.

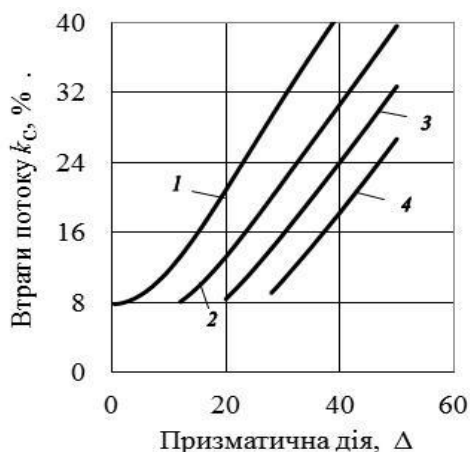


Рис. 8. Сумарні втрати світлового потоку при виготовленні елементів Френеля з ПММА ($n_1=1,492$): 1– кут заточування різця $\alpha_G = 90,00$ град.; 2– $\alpha_G = 77,14$ град.; 3– $\alpha_G = 69,59$ град.; 4– $\alpha_G = 63,56$ град.

Мікропризмовий елемент Френеля, конструкція якого запатентована в Україні і який сьогодні виготовляється в ІПРІ НАН України, складається з плоскої жорсткої пластинки з прозорої оптичної пластмаси – поліметилметакрилату, на одну сторону якої нанесений відповідний мікрорельєф (рис. 9). Пластика з мікрорельєфом і захисна пластина з оптичного полікарбонату встановлюються в спеціальний корпус-тримач, який також виготовляється з полікарбонату, і герметично фіксуються в ньому методом ультразвукового зварювання.

Важливим параметром мікрорельєфу є його крок, який формує просторову структуру заломлених променів. На основі результатів математичного моделювання дифракційних процесів для такої структури оптимальним можна вважати рельєф мікропризм з кроком $W = 600$ мкм, при якому ще не спостерігається помітної дискретності зорових образів, а внесок дифракції в зниження гостроти зору вже достатньо малий.

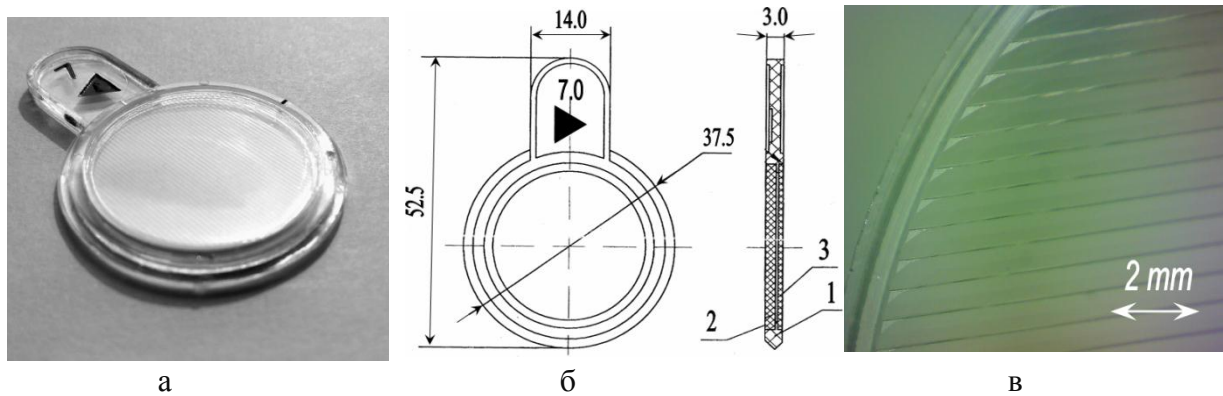


Рис 9. Загальний вигляд (а), схема (б) та структура рельєфу (в) оптичного компенсатора косоокості: 1– корпус з ручкою-тримачем; 2– мікропризмовий елемент; 3– захисна пластина

Для діагностики дефектів органу зору косоокості зазначені компенсатори косоокості використовуються в спеціальному діагностичному наборі *КК-42*, який складається з 42 мікропризм різних номіналів дії. Для експрес-діагностики більш зручні діагностичні лінійки мікропризм з закритим рельєфом.

Результати математичного моделювання кутів заломлення променів свідчать, що для мікропризмових компенсаторів косоокості в лінійках, сформованих зі стандартних одинарних мікропризм, при їх повороті навіть на невеликі кути 5,0–10,0 град. щодо нормалі до утворюючої поверхні мікрорельєфу істотно змінюється призматична дія. В результаті цього ефекту при вимірюванні кутів косоокості виникає похибка, прямо пропорційна призматичній дії, яка для мікропризм великої дії $PD = 20,0\text{--}30,0 \Delta$ становить 3,0–5,0 Δ .

Для усунення зазначеного ефекту запропоновано формувати кожний мікропризмовий оптичний компенсатор косоокості одночасно двома планарними мікропризмовими елементами однакової призматичної дії, при цьому пари елементів розміщуються рельєфами назустріч один одному. В результаті створюється симетрична мікропризмозна структура, геометрична модель якої наведена на рис. 10.

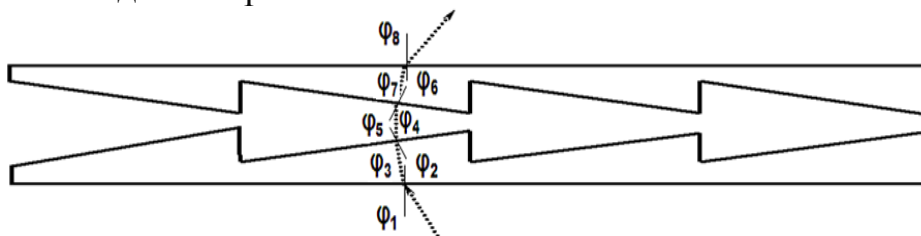


Рис. 10. Модель проходження променів світла через симетричний мікропризмовий елемент

Отримані в результаті моделювання дані підтверджують (рис. 11-12), що симетричні компенсатори косоокості забезпечують більш точні результати вимірювань кутів косоокості методом призмової скіаскопії при застосуванні діагностичних лінійок мікропризм. Тому останнім часом діагностичні лінійки ІПРІ НАН України формуються з використанням тільки симетричних компенсаторів косоокості і саме така конструкція запатентована в Україні.

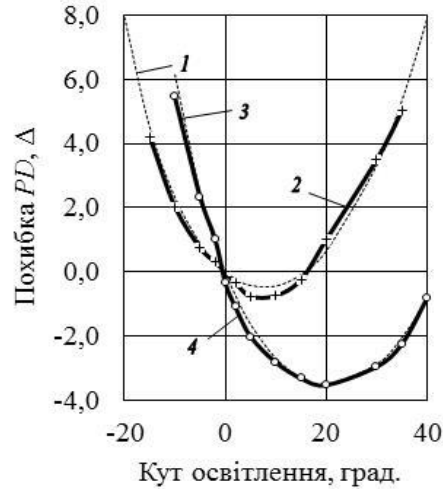
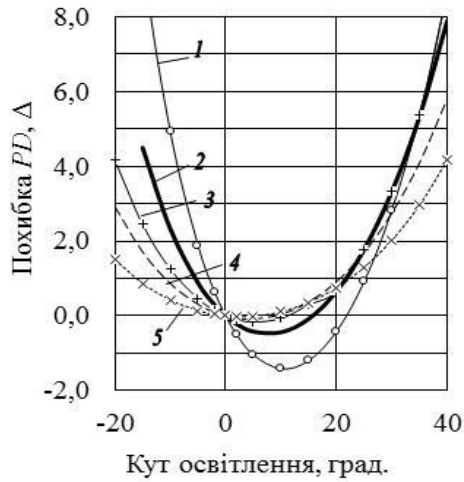


Рис. 11. Похибка вимірювань ΔPD при повороті одинарної мікропризми вздовж напрямку рельєфу: 1– $PD=40 \Delta$; 2– $PD=28 \Delta$; 3– $PD=20 \Delta$; 4– $PD=10 \Delta$; 5– $PD=5,0 \Delta$;

Рис. 12. Порівняльні характеристики симетричної зведеної (криві 1, 2) та одинарної (криві 3, 4) мікропризми $PD = 28,0 \Delta$: (1, 3 – моделювання, 2, 4 – експеримент)

В розділі 4 дисертації наведено розроблений автором метод моделювання та результати розрахунків параметрів кільцевих фокусуючих структур з плоскими утворюючими гранями. Такі дані необхідні для створення мікропризмових кільцевих лінз методом алмазного різання.

Існують, як мінімум, два варіанти кільцевих мікропризмових фокусуючих структур: з постійним кроком W мікрорельєфу і з постійною висотою призм H . При моделюванні кільцевого фокусуючого рельєфу для обох варіантів зворотний кут β мікропризм встановлюється або нульовим, або мінімально необхідним для технології практичного виготовлення таких структур.

Модель структури для варіанту постійного кроку рельєфу W для прямого ходу променів (рис. 13-а) сформована таким чином, що промені світла від кожної кільцевої зони N_i шириною W , яка розташована на відстані r_i від центру і нахилена під кутом α_i до утворюючої поверхні, збираються в спільній для всіх зон точці фокусу F . Відстань до точки фокусу від утворюючої поверхні мікропризмової структури становить R . Будемо вважати, що крок рельєфу W і глибина рельєфу H досить малі порівняно з відстанню R , тому кожна точка кільцевого елемента i з радіусом $r_i = r_0 + W N_i$, який відповідає певній кількості кроків рельєфу N_i , спостерігається з точки фокусування під одним і тим же кутом фокусування $\gamma_i = \text{tg}^{-1}(r_i/R)$. Кут заломлення призм в цьому випадку визначається таким чином:

$$\alpha_i = \text{tg}^{-1}\{\sin \gamma_i / (n_1/n_0) - \cos \gamma_i\}. \quad (13)$$

Модель кільцевого мікропризмового елемента Френеля з постійним кроком мікрорельєфу для розглянутого випадку зворотного ходу променів світла зображена на рис. 13-б. Кут заломлення променів для кожного кроку рельєфу i визначається виразом:

$$\alpha_i = \text{tg}^{-1}\{(n_1/n_0) \sin \xi_i \{(n_1/n_0) \cos \xi_i - 1\}^{-1}\}, \quad (14)$$

де величина $\xi_i = \sin^{-1}(n_0/n_1) \sin \gamma_i$, кут спостереження $\gamma_i = \text{tg}^{-1}(r_i/R)$, радіус структури $r_i = r_0 + WN_i$.

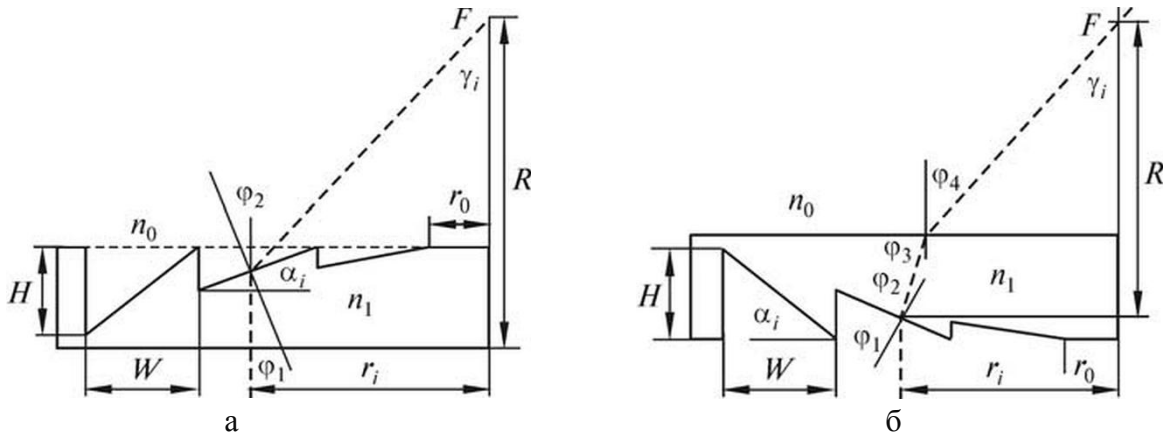


Рис. 13. Модель кільцевого мікропризмового елемента Френеля з постійним кроком рельєфу для прямого ходу променів (а) та для зворотного ходу променів (б)

Залежність кута нахилу граней від кількості N_i зон кільцевої структури Френеля з постійним кроком рельєфу W для прямого та зворотного ходу променів наведена на рис. 14. Коефіцієнт k_C починає помітно зростати при радіусах $r_i > 80\text{--}100$ мкм, які відповідають кутам $\alpha_i > 45\text{--}50$ град. Тому при моделюванні параметрів структури необхідно враховувати втрати світлового потоку на відбиття променів від поверхні призми і кути α_i не повинні перевищувати ≈ 45 град. Для більших кутів α_i таке відбиття стає істотним.

Для зворотного ходу променів результати моделювання згідно з виразом (14) кутів мікропризмового рельєфу для випадку знаходження мікропризми, виготовленої з ПММА ($n_1 = 1,492$), в повітрі ($n_0 = 1,0$) для кроку рельєфу $W = 0,6$ та $1,5$ мм і фокусної відстані $R = 150\text{--}300$ мм наведені на рис. 15 (криві 2).

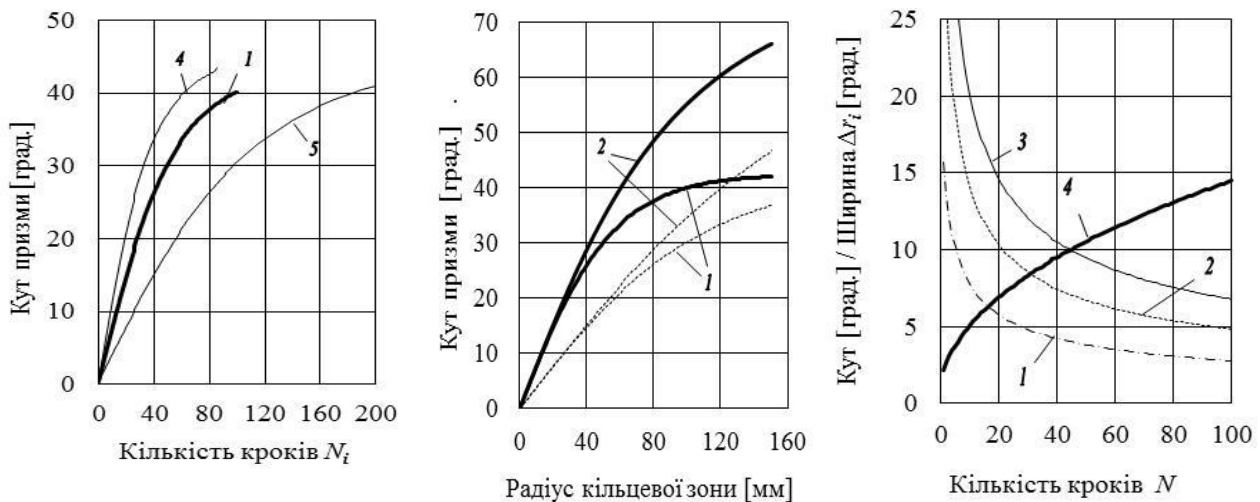


Рис. 14. Залежність кута нахилу від кількості N_i зон структури Френеля з постійним кроком W для прямого ходу променів: 1– $W = 1,0$ мкм; 4– $1,5$; 5– $0,5$ мм; фокус $R = 150$ мм.

Рис. 15. Залежність кута нахилу граней від радіусу структури Френеля для $W = \text{const.}$ $R = 150$ мм (суцільна лінія), $R = 300$ мм (пунктир): 1– прямий; 2– зворотний хід

Рис. 16. Залежність ширини кільцевої зони $\xi = (r_i - r_{i+1})$ [град.] структури Френеля з постійною глибиною рельєфу для $R = 300$ мм від кількості кроків N_i : 1– глибина $H = 0,100$ мм (10ξ); 2– $H = 0,050$ мм (25ξ); 3– $H = 0,025$ мм (50ξ); 4– кут мікропризм α_i [град.] для $H = 0,050$ мм

Залежність заломлюючого кута призми α_i від радіуса r_i для зворотного ходу променя виявляється більш лінійною порівняно з прямим ходом, але при цьому значення кутів заломлення для радіусів $r_i > 40$ мм істотно більше для зворотного ходу. Тому останній варіант, по-перше, менш ефективний внаслідок великих коефіцієнтів k_c відбиття світла від поверхні, по-друге, менш технологічний для формування мікрорельєфу методом алмазного різання із-за досить малих заломлюючих кутів призм рельєфу.

Аналогічні результати отримано при моделювання структур з постійною глибиною рельєфу H (рис. 16). Алгоритм моделювання схожий з варіантом постійного кроку рельєфу. На першому етапі обчислюється кут γ_1 для першої зони і знаходяться значення кута нахилу кільцевої площадки $\alpha_1 = \varphi_1$ та відповідного радіусу r_1 :

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{tg}^{-1}(r_0 / R), \\ \varphi_1 &= \text{tg}^{-1}\{\sin \gamma_1 / (n_1/n_0) - \cos \gamma_1\}, \\ r_1 &= H / \text{tg } \varphi_1. \end{aligned} \quad (15)$$

Далі розраховуються параметри рельєфу для наступних кільцевих зон $i = 2, 3, 4, \dots$, причому на кожному з етапів попередні дані стають вхідними даними для комп'ютерних розрахунків наступного етапу, що дозволяє отримати необхідні параметри рельєфу – радіуси кільцевих зон r_i і відповідні кути нахилу граней $\alpha_i = \varphi_i$, для будь-яких значень радіусу r_0 , фокусної відстані R , глибини рельєфу H і кількості кроків N_i .

Така модель використовується, зокрема, для розрахунків параметрів гомогенізаторів оптичного випромінювання з мікроконусною структурою. При цьому кожна з кільцевих плоских граней мікрорельєфу формує відхилення променя світла на відповідний кут.

Отримані результати моделювання параметрів мікрорельєфу дозволяють формувати фокуруючі кільцеві структури з плоскими дзеркальними гранями методом алмазного різання, який забезпечує високу оптичну якість робочих поверхонь пристроїв.

В розділі 5 дисертації запропоновано для контролю якості мікропризмових поверхонь використовувати метод діагностики, заснований на аналізі дифракційної картини, що виникає при проходженні променя лазера через мікропризмову структуру. Порівняння результатів моделювання дифракційних явищ для певної мікрорельєфної структури з даними, отриманими експериментально, дозволяє оцінити оптичну якість плоских робочих поверхонь.

В роботі розглянуто три моделі структур: мікропризмові світлоповертачі, рефракційні офтальмологічні мікропризми та мікрорельєф оптичних дисків. Наприклад, на рис. 17-а наведено модельований дифракційний спектр пройдених променів для симетричного світлоповертача, який повністю співпадає з експериментально отриманим дифракційним контуром інтенсивностей (рис. 17-б), що свідчить про задовільну якість оптичних світловідбивних поверхонь.

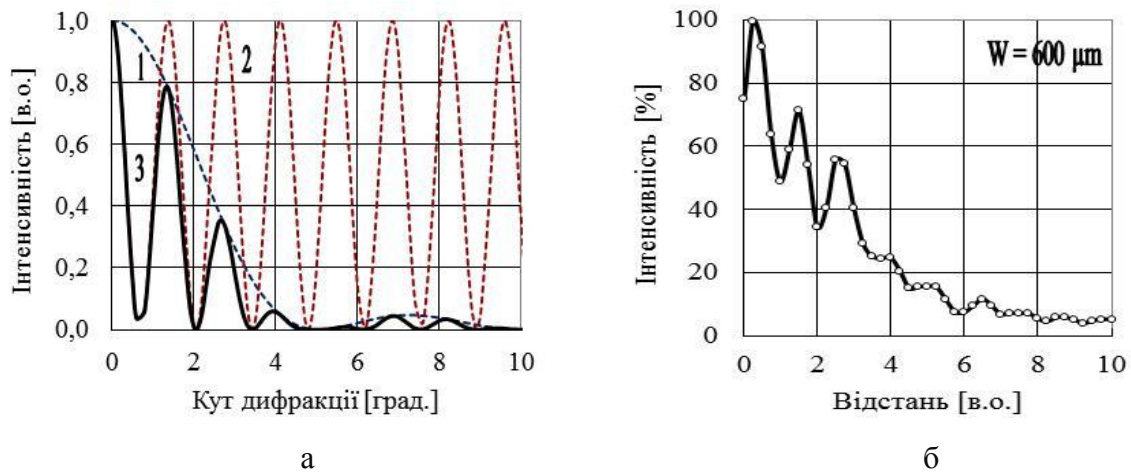


Рис. 17. Результати моделювання (а) та експериментальні дані (б) для симетричного світлоповертача, крок мікрорельєфу $W = 600$ мкм:

Дифракційна картина для зазначеного симетричного світлоповертача в більш широкому кутовому діапазоні, яка свідчить про високу оптичну якість робочих поверхонь, наведена на рис. 18.

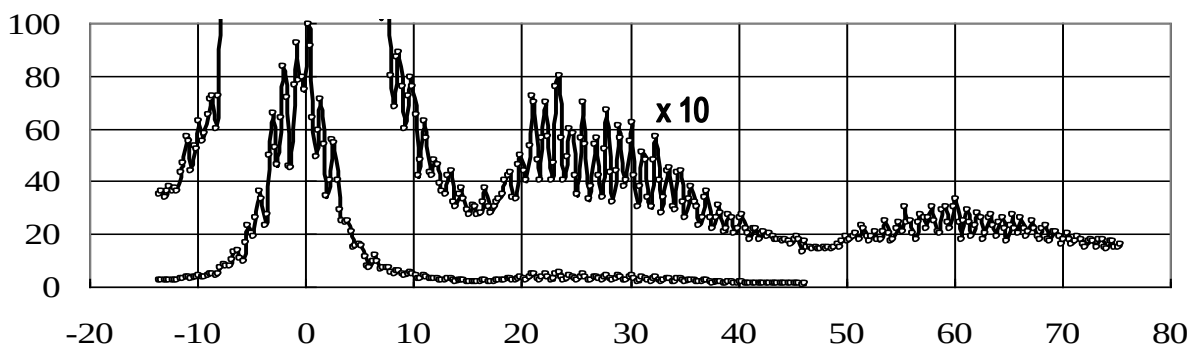


Рис. 18. Експериментальні дані для симетричного світлоповертального елемента, крок мікрорельєфу $W = 600$ мкм, грань # 1

Аналогічний метод можна застосовувати для контролю параметрів мікрорельєфу оптичних дисків. При моделюванні реальний переріз піта рельєфу шириною s вздовж інформаційної доріжки замінювався трикутним профілем з такою ж базою s . В процесі травлення глибина піта h і нахил бокових стінок α збільшуються до моменту досягнення заданої глибини піта h_0 . Після цього профіль мікрорельєфу набуває вигляд трапеції і зростає тільки нахил бокових стінок пітів α при незмінній глибині рельєфу h_0 .

Запропонована модель процесу показана на рис. 19-а. Моделювання було виконано для умов станції лазерного запису ІПРІ НАН України. Деякі результати розрахунків відносних інтенсивності відбитих променів для 1-го порядку дифракції J_1 та 2-го порядку J_2 , а також значення дифракційної ефективності $k_{D1} = J_2 / J_1$ та розподіли інтенсивностей для 0-го порядку дифракції J_0 наведені на рис. 19-б. Стрілкою на рисунку вказано кут нахилу стінок пітів α , при якому трикутний профіль перетворюється в трапецію.

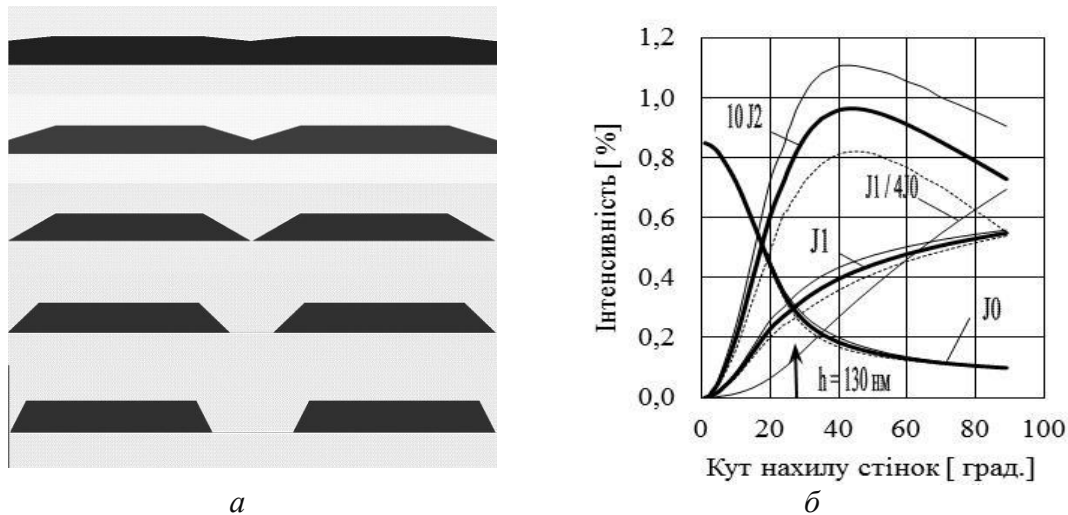


Рис. 19. Розподіл дифракційних інтенсивностей для умов станції ППРІ НАН України:
а– модель травлення мікрорельєфу; б– дифракційні характеристики

В роботі вперше було проведено моделювання дифракції для тришарових структур "проявник-фоторезист-прозора підкладка диска" та тришарової системи "фоторезист–хром–проявник / повітря". Такі дані необхідні, зокрема, для розробки процесу формування методом плазмо-хімічного травлення високоякісного мікрорельєфу на поверхні сапфірових дисків.

Сумарні дані щодо дифракції 1-го порядку для відбитих променів для тришарових структур з показниками заломлення $n_1 = 1,00$; $n_2 = 1,62$; $n_3 = (\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Cr})$ для існуючих умов станції лазерного запису ППРІ НАН України наведено на рис. 20.

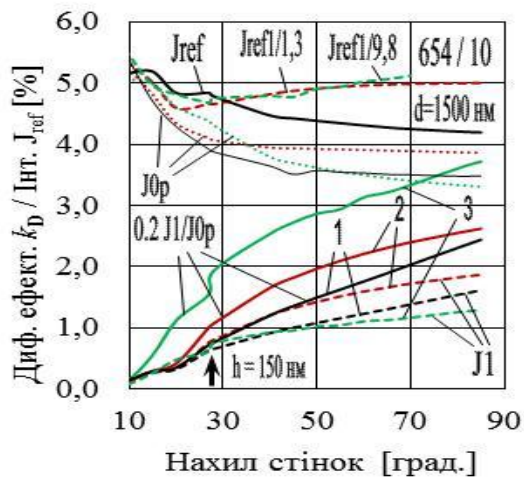


Рис. 20. Розподіл дифракційних інтенсивностей для сухого фоторезисту на поверхні скла, сапфіра та хрому:
1– SiO_2 ; 2– Al_2O_3 ; 3– Cr

Оскільки коефіцієнти відбиття світла для скла, сапфіра і хрому різні, то для спрощення порівняння отриманих даних на рис. 20 сумарні інтенсивності відбитих променів J_F для сапфіра і хрому зменшені в 1,3 і 9,8 рази, відповідно. Таким чином, всі три значення J_F для цих матеріалів вирівняні в точці $\alpha = 26,7$ град., в якій глибина пітів h досягає необхідного для оптимального процесу травлення значення $h_0 = 150$ нм.

Оптимальне значення дифракційної ефективності $k_{DF} = J_1/J_F$ для інтенсивностей 1-го порядку дифракції при глибині пітів $h = 150$ нм відповідає куту пітів $\alpha = 45$ град. Отримані в результаті моделювання дані необхідні для формування високоякісного мікрорельєфу дисків.

В розділі 6 запропоновано новий метод з електронною реєстрацією параметрів тестових штрихових оптотипів для кількісного моделювання роздільної здатності оптичних зображень, що формуються мікропризмами.

Вперше отримано порівняльні оптичні параметри існуючих офтальмологічних мікропризм різних виробників, визначено вклад мікропризм в зниження контрасту та роздільної здатності зображень при проведенні діагностики зору пацієнтів з використанням офтальмологічних мікропризм.

Відомо, що офтальмологічні мікропризми знижують гостроту зору V_C пацієнтів, причому ефект зростає зі збільшенням сили призм і початкового значення гостроти V_C . Однак незрозуміло, який внесок у зниження гостроти зорових образів вносять дефекти зору, а який – власне призми. Методика виконаних до цього часу офтальмологічних досліджень не дозволяє розділити ці два ефекти. Тому питання про роль мікропризм в зниженні роздільної здатності формованих зображень вимагає додаткового моделювання.

Зниження роздільної здатності зображень визначалось відповідними змінами кутів спостереження γ_A оптотипів тестових штрихових об'єктів *Mira* МЗ-М5, при цьому відносна роздільна здатність $V_A = \gamma_A / \gamma_{A0}$ вимірювалась кутовими відстанями між штриховими елементами *Miri*, які відповідають відомому критерію Релея: $\sin \theta = 1,22 (\lambda / D)$.

На основі проведеного моделювання параметрів оптичної системи був створений спеціальний експериментальний стенд для вимірювання роздільної здатності тестових зображень (рис. 21). Особливу увагу було приділено ідентичності оптичних параметрів стенду умовам традиційних досліджень гостроти зору з використанням тестових офтальмологічних таблиць.

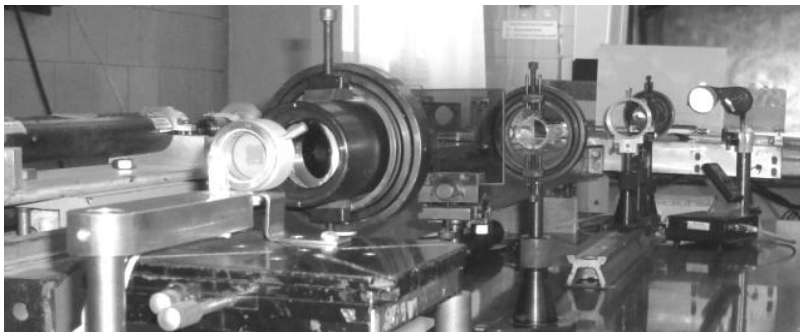


Рис. 21. Загальний вигляд експериментального стенда для дослідження роздільної здатності зображень

Критерієм ідентичності даних з гостроти зору, отриманих традиційним способом з використанням тестових офтальмологічних таблиць, і результатів вимірювань на стенді з застосуванням тестових штрихових *Mir*, є однаковість для призм однакової дії відносного розширення оптотипів для екрану $K_A = \Delta\gamma_A / \gamma_A$ і для сітківки ока пацієнта $K_C = \Delta\gamma_C / \gamma_C$, де γ_C – роздільна здатність ока (в середньому $\gamma_C \approx 1,0$ хвил. для $V_C = 1,0$), а $\Delta\gamma_C$ – зона хроматизму на сітківці. При виконанні критерію $K_A = K_C$ умови спостереження тестових офтальмологічних таблиць пацієнтами можна ототожнити з умовами реєстрації параметрів тестових штрихових оптотипів.

Процедуру моделювання роздільної здатності ілюструє рис. 22. В фокусі коліматора оптичної системи експериментального стенду розміщується вибраний елемент тестової *Miri* і для точок (k_{01}, k_{02}) зображення цього

елемента на екрані з фотодетектором визначається його початковий контраст k_{A0} , який повинен бути не менше 95–97 %. Це свідчить про добре фокусування зображення і про належне юстування щілинної діафрагми фотодетектора, яка повинна розташовуватись паралельно зображенням тестових штрихів на екрані.

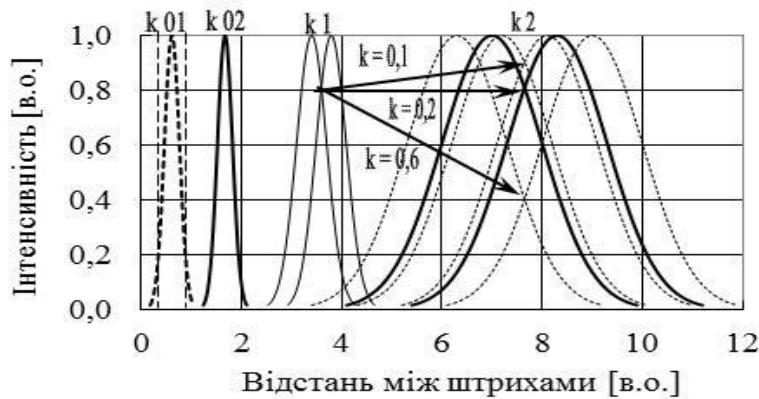


Рис. 22. Процедура моделювання роздільної здатності зображень

На осі оптичної системи по черзі встановлюється еталонна та досліджувані призми і шляхом зміни елементів H_M штрихової $M_{\text{ри}}$ реєструються криві контрасту $k_A = f(H_M)$. Для рівня контрасту $k_A = 20,0 \%$ визначається кутова роздільна здатність тестових зображень штрихів R_{A0} для еталонної призми та R_A для досліджуваних призм. З отриманих даних розраховується відносна роздільна здатність зображень $V_A = R_A / R_{A0}$ для кожної досліджуваної призми.

Типові результати вимірювань контрасту k_A для мікропризм ІПРІ НАН України наведено на рис. 23. З аналогічних даних було визначено значення гостроти роздільної здатності $V_A = V_C$ для монопризм "Gulden Ophthalmics" (США), гнучких плівок "3MTMPress-OnTMPrisms" (США) і жорстких модифікованих мікропризм ІПРІ НАН України. Отримані дані (рис. 24) свідчать, що всі досліджені призми знижують гостроту зору V_C у всьому діапазоні зміни їх призматичної дії.

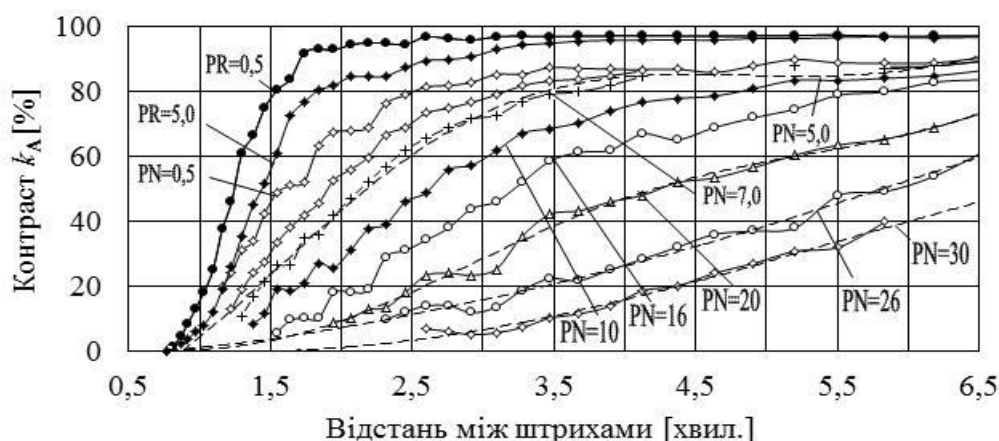


Рис. 23. Контраст зображень штрихів $M_{\text{ри}}$ $M3$ – $M5$ для мікропризм ІПРІ НАН України

На рис. 24 наведено отримані раніше методом опитування пацієнтів дані досліджень гостроти зору V_C , які виконані Вероні-Тротман (1978) для гнучких плівок "3M" (крива 1) і для жорстких призм "3M" (крива 2); Гріффітс і Коттон (2010) (крива 3); Шевколенко (2011) (крива 4); Мелліною (2016) (крива 5).

Дані Катца (2004) (крива 6) практично збігаються з результатами Гріффітс і Коттон для мікропризм "3MTMPress-OnTMPrisms" призматичною дією $PD = 20,0\text{--}30,0 \Delta$ і з даними, отриманими автором для мікропризм ІПРІ НАН України (крива 8). Крім того, на рис. 24 для порівняння наведені отримані автором значення V_C для монопризм "Gulden Ophthalmics" (США) (крива 7) і для гнучких плівок з мікрорельєфом "3MTMPress-OnTMPrisms" (США) (крива 9).

Головним в отриманих експериментальних даних є те, що вперше було встановлено зниження роздільної здатності V_A , яка моделює гостроту зору V_C , для призм невеликої призматичної дії. Таке зниження було встановлено як для мікропризм, так і монопризм, що раніше не було очевидно. Ці дані ще раз підтверджують те, що причиною зниження роздільної здатності для призм є саме хроматизм білого світла, значення якого однаково як для монопризм, так і мікропризм, а величина зони хроматизму залежить тільки від дії призми.

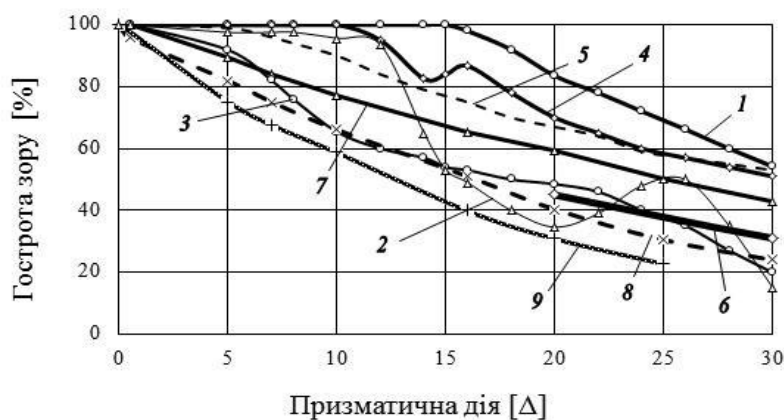


Рис. 24. Гострота зору V_C в залежності від призматичної дії деяких призм

В розділі 7 роботи наведено результати моделювання хроматичних аберацій для мікропризм. З закону Снеліуса можна отримати, що зона хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ для будь-яких двох значень довжин хвиль λ_1 і λ_2 в залежності від кута рефракції призми α_R визначається таким чином:

$$\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R = \theta_{R1} - \theta_{R2} = \sin^{-1}\{\sin \alpha_R n_1(\lambda_1)/n_2(\lambda_1)\} - \sin^{-1}\{\sin \alpha_R n_1(\lambda_2)/n_2(\lambda_2)\}. \quad (16)$$

Результати моделювання свідчать, що при малих кроках рельєфу, які не перевищують $W = 100\text{--}200$ мкм, для малих заломлюючих кутів мікропризм, які відповідають $PD < 5,0\text{--}6,0 \Delta$, розмиття зображень пов'язано з дифракцією світла на штрихах ґратки і саме тому зменшується гострота зору (рис. 25-а). Усунути цей негативний ефект можна, збільшуючи крок мікрорельєфу призм до значення $W = 800\text{--}1000$ мкм. Для мікропризм $PD > 20,0\text{--}22,0 \Delta$ розмиття дифракційної картини пов'язано з дисперсією світла, а внесок дифракції малий (рис. 25-б). Тому зменшення кроку мікрорельєфу призм до $W = 600$ мкм порівняно з кроком $W = 800$ мкм істотно не змінює зону розмиття зображення.

Проте зі зменшенням кроку мікрорельєфу відповідно зменшується дискретність образів, які фіксує око, і тому підвищується гострота зорових образів, яка реєструється при офтальмологічних дослідженнях стану зору.

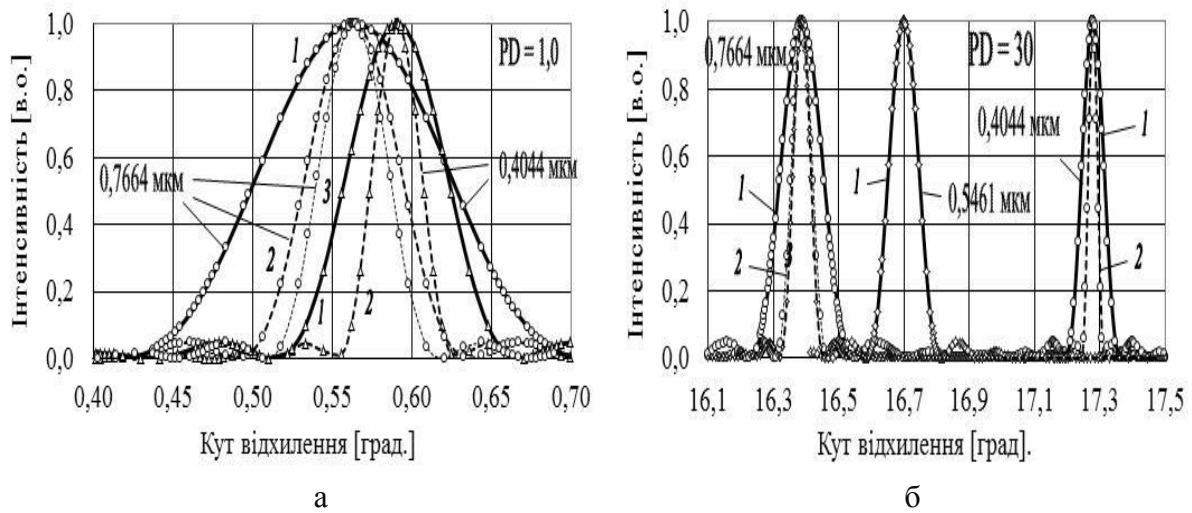


Рис. 25. Хроматичні ефекти для мікропризми $PD = 1,0 \Delta$ (а) та $PD = 30,0 \Delta$ (б):
1— крок рельєфу $W = 300 \mu\text{м}$; 2— $600 \mu\text{м}$; 3— $800 \mu\text{м}$

Для зменшення зони хроматизму мікропризм використовуються кольорові фільтри. Вплив світлових фільтрів на величину зони хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ можна моделювати, зменшуючи для певної довжини хвилі λ пройдений світловий потік на коефіцієнт пропускання світла фільтрами $\tau(\lambda)$. Для видимого діапазону спектру найбільш придатними для зменшення зони хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ є жовто-сині ЖС-17 та ЖС-18, синьо-жовті-зелені ЖЗС-18 та ЖЗС-19, а також зелено-синій ЗС-8 фільтри.

Для спектрального діапазону $\lambda = 0,4668\text{--}0,6561 \mu\text{м}$ модельований дифракційний розподіл інтенсивності сонячного світла, з врахуванням спектральної чутливості ока людини, наведений на рис. 26 для випадку відсутності фільтрів (криві 1) та для жовто-синього ЖС-17 і ЖС-18 світлофільтрів (криві 2–3). Модельований розподіл спектру з фільтрами (криві 2–3) практично не виявляє випромінювання з довжиною хвилі, меншою за $\sim 0,45 \mu\text{м}$, 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 спектру.

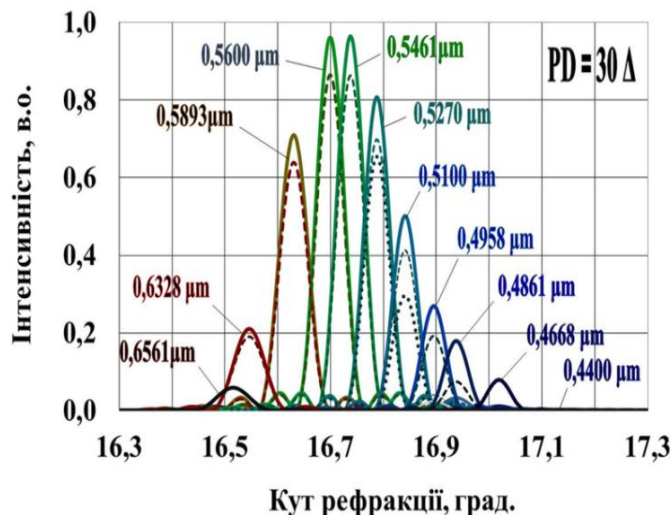


Рис. 26. Вплив жовто-синіх світлофільтрів на візуальні зображення:
1— без фільтрів (суцільні лінії);
2— фільтр ЖС-17 (тонкі пунктирні лінії); 3— фільтр ЖС-18 (товсті пунктирні лінії)

Аналогічні дані було отримано для випадку реєстрації світлових інтенсивностей фотодетектором типу $\Phi Д288А$. При моделюванні розподіл інтенсивності білого світла на поверхні фотодетектора розраховувався за формулою:

$$r(\lambda, T) = \tau(\lambda) k_D(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) c_1 / \lambda^5 [\exp(c_2 / 2856) - 1]^{-1}, \quad (17)$$

де $\tau(\lambda)$ – коефіцієнт світлопропускання, який враховує поглинання світла та його відбиття від обох поверхонь призм та фільтрів, $k_D(\lambda)$ – спектральна чутливість фотодіода $\Phi Д288А$; $\varepsilon(\lambda, T) = 0,435$ – спектральна випромінювальна здатність вольфраму для $T_A = 2850$ К, константи $c_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16}$ [Вт/м²] та $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ [м К].

Експериментальні дослідження впливу фільтрів на розподіл інтенсивності білого світла після призм здійснювалися аналогічно вимірюванням роздільної здатності зображень тестових штрихових оптичів. Схема експериментальної установки для моделювання впливу світлофільтрів зображена на рис. 27.

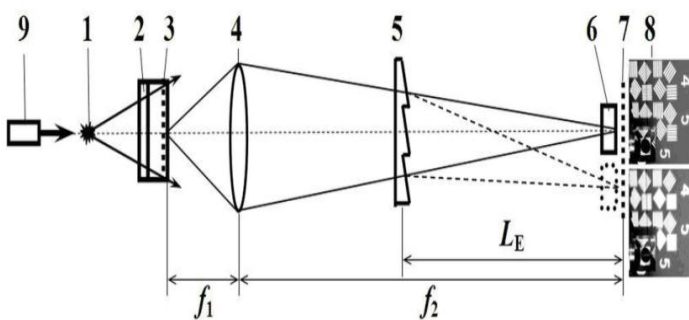


Рис. 27. Схема стану для дослідження впливу світлофільтрів: 1- джерело білого світла; 2- матове скло; 3- тестовий штриховий об'єкт *Mira*; 4- фокусуючий конденсор; 5- досліджувані призми та фільтри; 6- фотодетектор; 7- екран; 8- тестові зображення на екрані; 9- лазер для юстирування

В якості джерела випромінювання була обрана стандартна лампа розжарювання типу А з яркістю температурою $T_A = 2856$ К (1). Для формування на екрані (7) зображень штрихових тестових об'єктів *Mira* (3) 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'єкту *Mira* (3) на екрані імітують оптичів тестових офтальмологічних таблиць з необхідним збільшенням (f_2 / f_1) , де f_1 та f_2 – відстані від конденсора (4) до об'єкту *Mira* (3) та до екрану (7), відповідно. Досліджувані призми (5) встановлювались в заданому положенні на оптичній осі стану. Фільтри, зазвичай, розміщувались безпосередньо перед призмами.

Деякі з отриманих результатів для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ показані на рис. 27. Кутове положення $\gamma = 16,7$ град. відповідає довжині хвилі $\lambda = 0,56$ мкм.

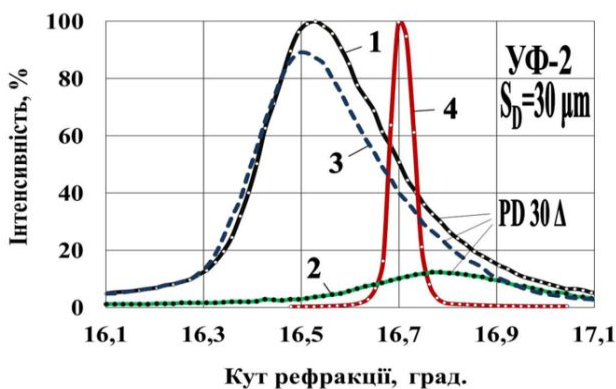


Рис. 27. Зона хроматизму при використанні спектральної шілини $УФ-2$ для мікропризми $PD = 30,0 \Delta$ для фотодіода $\Phi Д288А$: 1- без фільтрів; 2- фільтр 3C-8; 3- ЖС-18; 4- апаратна функція стану $F_S(x)$;

Математичне моделювання впливу фільтрів на зорові образи довело можливість значного зменшення зони хроматизму при використанні зелено-синіх фільтрів типу ЗС-8. Цей ефект у свою чергу збільшує контраст тестових зображень. Експериментальні кількісні дані також підтвердили можливість зменшення зони хроматизму мікропризм при використанні жовто-синіх фільтрів ЖС-17 та ЖС-18, що важливо для точного вимірювання гостроти зору пацієнтів при офтальмологічних дослідженнях гостроти зору.

В розділі 8 роботи запропонована модель рефракційно-дифракційної структури з подвійним рельєфом для компенсації дисперсійного хроматизму рефракційної призми дисперсійним хроматизмом дифракційної ґратки.

Модель такої структури для випадку нормального падіння світлового пучка на утворюючу поверхню рефракційної мікропризми показана на рис. 28, на якому W – крок мікрорельєфу рефракційної призми, H – номінальна глибина мікрорельєфу, α_R – заломлюючий кут призми, β – зворотний кут мікропризми, θ_R – кут відхилення світлового пучка першою призмою, а φ_F/φ_A – кут дифракції / інтерференції для цієї призми.

Для дифракційної ґратки: W_X – крок мікрорельєфу, h – номінальна глибина рельєфу, α_X – кут заломлення, θ_X – кут відхилення світлового пучка дифракційною ґраткою.

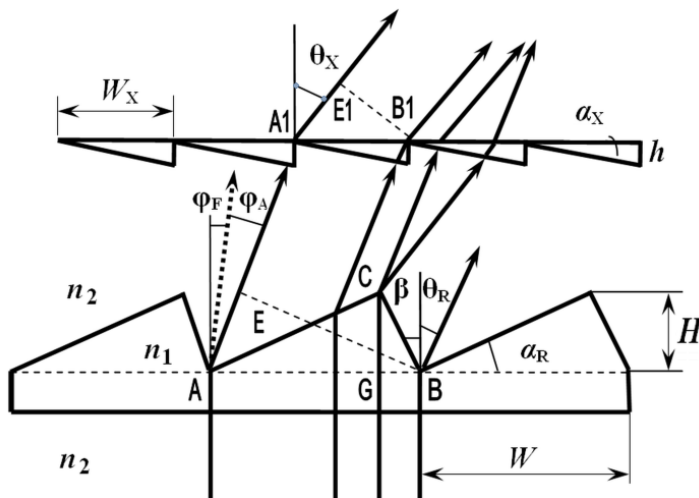


Рис. 28. Модель рефракційно-дифракційної ахроматичної структури з подвійним мікрорельєфом

Розраховані необхідні оптичні параметри ахроматизуючих мікропризм. Так, величина зони дисперсійного хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ рефракційної мікропризми повністю визначається кутом заломлення α_R призми та залежністю показника заломлення $n(\lambda)$ від довжини хвилі λ і розраховується згідно з виразом (16).

Для моделювання зони дифракційного хроматизму другої мікропризми використовувались відомі формули дифракційної ґратки

$$I_\lambda = I_0 (\sin A \sin NB)^2 / (A \sin B)^2, \quad (18)$$

де N – кількість щілин; $A = (\pi b/\lambda) \sin \varphi_D$; $B = (\pi d/\lambda) \sin \varphi_I$.

В напрямку кута $\theta_R(\lambda)$ (рис. 28), період ґратки $d_0 = BE = AB \cos \theta_R$ і ефективна апертура $b_0 = \{BE - CB \sin(\theta_R + \beta)\}$. Для зворотного кута $\beta = 0$ період

гратки $d_\theta = W \cos \theta_R$ і апертура $b_\theta = W (\cos \theta_R - \operatorname{tg} \alpha_R \sin \theta_R)$. Аналогічні співвідношення справедливі і для другої ахроматизуючої ґратки:

$$\begin{aligned} d_\theta &= W_X \cos \theta_X \\ b_\theta &= W_X (\cos \theta_X - \operatorname{tg} \alpha_X \sin \theta_X) \end{aligned} \quad (19)$$

Для дифракційної ґратки, яка освітлюється когерентним світлом з різними довжинами хвиль λ формується система інтерференційних максимумів з кутовим періодом $\delta I = \sin^{-1}(\lambda/d)$ і з кутами $\varphi_{Im} = k_i \sin^{-1}(\lambda/d)$, де $k_m = 0, 1, 2, \dots$, тобто кути дифракції φ_{Im} для певного порядку k_m зменшуються зі зменшенням довжини хвилі випромінювання λ .

Таким чином, напрямки хроматизму рефракційної мікропризми і дифракційної ґратки спрямовані назустріч один одному. В результаті "дисперсійна" зона хроматизму мікропризми $\Delta(\lambda_C \lambda_H)_R$, що визначається виразом (16), може бути повністю компенсована "дифракційним" хроматизмом $\Delta(\lambda_C \lambda_H)_X$ ґратки:

$$\Delta(\lambda_C \lambda_H)_X = (\varphi_{IC} - \varphi_{IH}) = \sin^{-1}(\lambda_C/W_X) - \sin^{-1}(\lambda_H/W_X) \quad (20)$$

Оскільки положення інтерференційного максимуму другого порядку для довжини хвилі $\lambda_C = 0,6328$ мкм практично збігається з максимумом третього порядку для $\lambda_H = 0,4047$ мкм, така ахроматизуюча мікропризма може ефективно функціонувати тільки в променях дифракції першого порядку.

Величина $\Delta(\lambda_C \lambda_H)_X$ в залежності від кроку W_X , отримана за виразом (20), зображена на рис. 29. Наприклад, для мікропризми, яка функціонує в дифракційній моді першого порядку, з кроком $W_X \approx 6,3$ мкм, який досить легко реалізувати на практиці, може бути повністю компенсований "дисперсійний" хроматизм заломлюючої призми $\Delta(\lambda_C \lambda_H)_R$ величиною до 2,0 град.

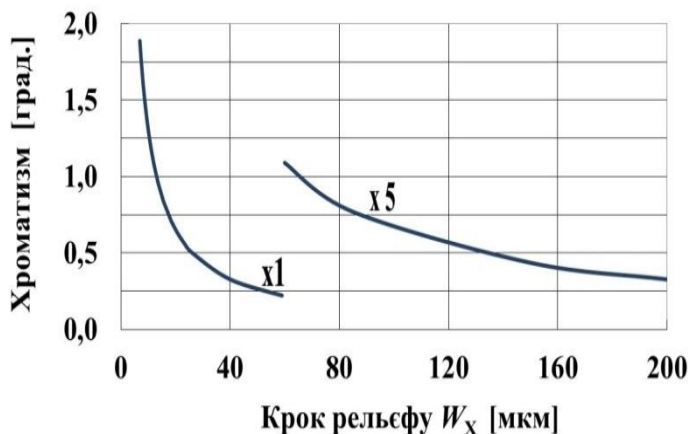


Рис. 29. Ширина зони скомпенсованого дифракційного хроматизму в залежності від кроку W_X для першого порядку ахроматизуючої призми

Приклади моделювання дифракційних характеристик (вирази 18-19) для ахроматизуючої мікропризми $PD = 1.0$ Δ з кроком $W = 27$ мкм наведені на рис. 30 та з кроком $W = 55$ мкм (рис. 31) для двох граничних довжин хвиль $\lambda_C = 0,6328$ мкм (криві 2, 7) і $\lambda_H = 0,4047$ мкм (криві 1, 3, 4). Суцільні тонкі лінії являють собою дифракційні криві для $\lambda_C = 0,6328$ мкм і $\lambda_H = 0,4047$ мкм; пунктирні лінії – інтерференційні криві різних порядків, відповідно.

Дані з моделювання свідчать, що використовуючи ґратку $PD = 1.0 \Delta$ з кроком $W = 27$ мкм, для якої значення "дифракційного" хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_X = 0,494$ град., може бути реалізована повна компенсація "дисперсійного" хроматизму $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R$ для мікропризми $PD = 16.0 \Delta$, для якої значення $\Delta(\lambda_1\lambda_2)_R = 0,461$ град. (вираз 16).

В той же час, для мікропризми $PD = 1.0 \Delta$ з кроком рельєфу $W = 55$ мкм (рис. 31) ахроматизуючий ефект не відбувається, тому що при зменшенні довжини хвилі червоний максимум з довжиною $\lambda_C = 0,6328$ мкм (крива 2) перетворюється в два синіх з $\lambda_H = 0,4047$ мкм (криві 1, 3), тобто пройдений промінь лише розширюється в кутовому просторі.

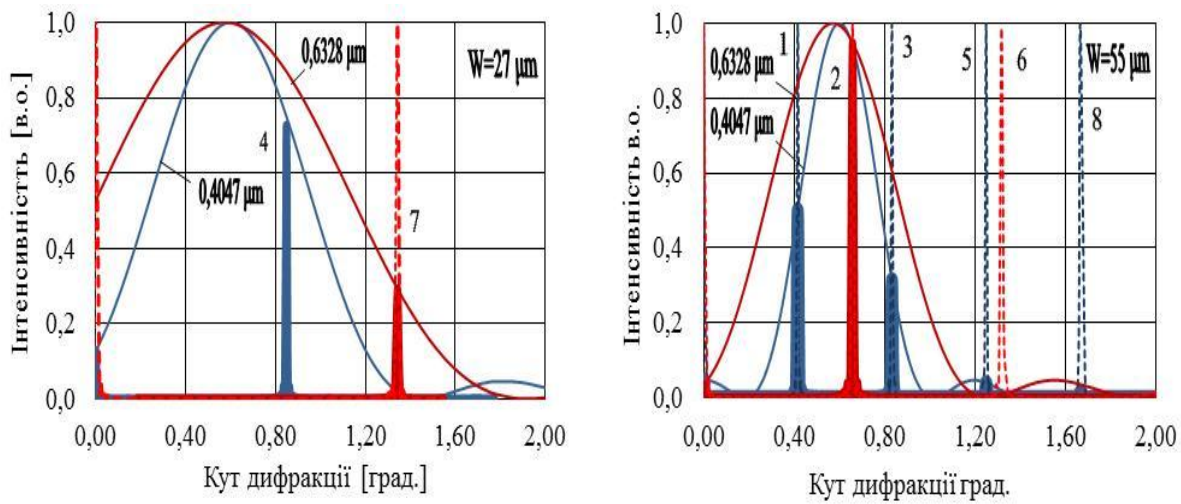


Рис. 30. Положення інтерференційних максимумів для мікропризми $PD = 1.0 \Delta$ з кроком $W = 27$ мкм: 4– $W27k1-B$ ($W=27$ мкм, синій, 1-й порядок); 7– $W27k1-R$ ($27 \mu\text{m}$, червоний, 1-й порядок)

Рис. 31. Положення інтерференційних максимумів для мікропризми $PD = 1.0 \Delta$ з кроком $W = 55$ мкм: 1– максимум $W55k1-B$ ($W=55$ мкм, синій, 1-й порядок); 2– $W55k1-R$ (55 мкм, червоний, 1-й порядок); 3– $W55k2-B$ (55 мкм, синій, 2-й порядок); 5– $W55k3-B$ (55 мкм, синій, 3-й порядок); 6– $W55k2-R$ (55 мкм, червоний, 2-й порядок); 8– $W55k4-B$ ($55 \mu\text{m}$, синій, 4-й порядок).

Експериментальні дослідження виготовлених зразків ахроматизуючих мікропризм не виявили ахроматизуючих властивостей ґраток. На рис. 32 показаний експериментально отриманий розподіл інтенсивності для мікропризми з призматичною дією $PD = 2,0 \Delta$ з кроком рельєфу $W_X = 27$ мкм (суцільна товста лінія, квадрати). Для порівняння, на рис. 32 також наведено експериментальні дані, отримані для такої ж мікропризми $PD = 2,0 \Delta$, але з кроком рельєфу $W_X = 600$ мкм (суцільна товста лінія, кружки). Крім того, на рисунку показана теоретична дифракційна крива для $W_X = 27$ мкм (тонка пунктирна лінія) з єдиним інтерференційним максимумом $W27-k_1$ ($W = 27 \mu\text{m}$, $k = 1$) в межах цієї кривої для кута $\phi_{11} = 1,343$ град. (суцільна лінія, ромби).

Розрахункові та експериментальні дані для $W_X = 27$ мкм співпадають лише за кутами розміщення зон концентрації інтерференційних максимумів. Причиною цього факту є коливання висоти рельєфу дифракційної ґратки.

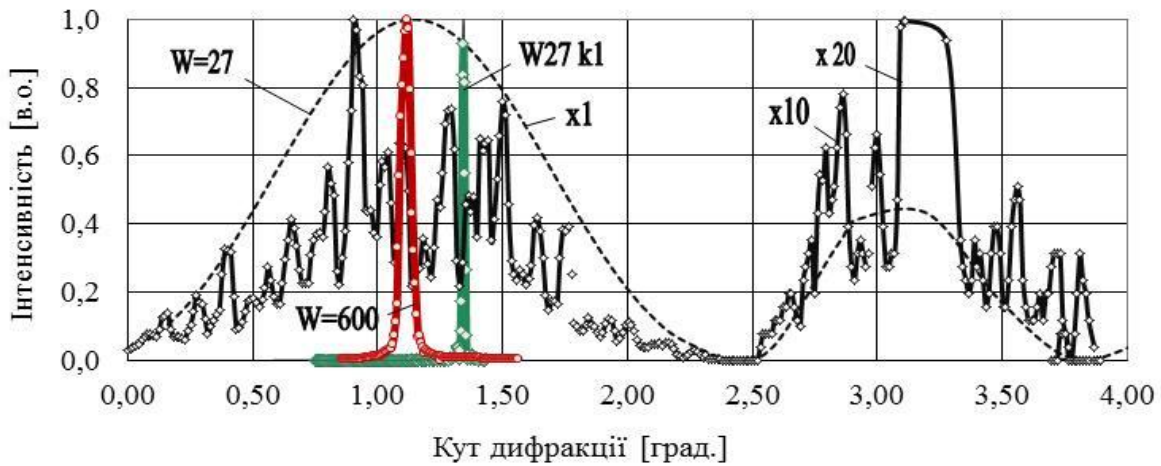


Рис. 32. Отримані експериментально та модельовані інтенсивності променів для мікропризми $PD = 2.0 \Delta$ з кроком $W_x = 27$ мкм

Для інтерпретації зазначеного результату було розроблено геометричну модель, в якій ґратка розглядалася як набір трикутників з однаковим кутом нахилу α , але з різною висотою рельєфу h . Зазначена модель цієї структури зображена на рис. 33, де W – номінальний крок мікрорельєфу, D – змінний крок мікрорельєфу, а α – кут заломлення мікропризми. Всі інші позначення аналогічні рис. 28.

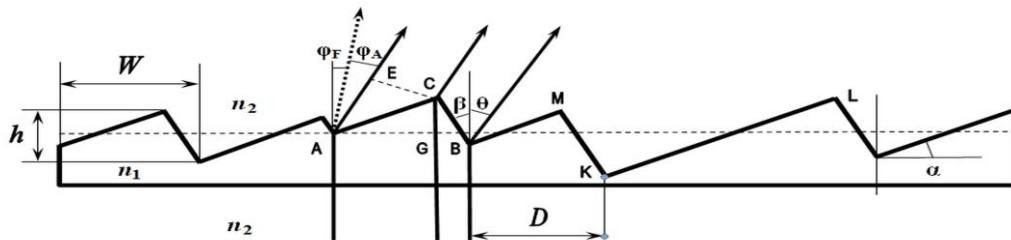


Рис. 33. Модель поверхні мікропризми зі змінною глибиною рельєфу

Кут α мікропризми відповідає куту заточування ріжучої грані алмазного ріжучого інструменту α_G , який залишається незмінним при формуванні мікрорельєфу. Тому коливання кута заломлення призми $\theta_R = \sin^{-1} [\sin \alpha (n_1/n_2)]$ відсутні. Для моделі амплітудної ґратки кут заломлення θ_R відповідає куту дифракції $\phi_D = 0$; отже, цей кут є однаковим для всіх граней ґратки.

В процесі формування рельєфу горизонтальне позиціонування ріжучого інструменту виконується з точністю $\delta W = \pm 0,5$ мкм. Таким чином, для кроку $W = 48$ мкм відповідна похибка формування кроку $(\delta W) / W$ не перевищує 2,0 %, а для $W = 27$ мкм – становить лише 7–8 %.

Однак, різниця в глибині рельєфу h призводить до більш істотного коливання ефективного кроку ґратки D . Так, зміна глибини рельєфу $(h + \delta h)$ на досить мале значення $\delta h = \pm 0,5$ мкм внаслідок наявності зворотного кута призми $\beta \approx 3$ град. навіть для кроку $W_x = 600$ мкм викликає коливання кроку рельєфу $\delta W = \pm 25$ мкм, що у свою чергу, призводить до зміщення спостережених експериментально інтенсивностей відносно їх модельованих положень.

Для малих кроків ефект значно більший. При номінальному значенні $h_0 = 1,1$ мкм вертикальне позиціонування ріжучого інструменту при формуванні мікрорельєфу з однаковою точністю $\delta h = \pm 0,5$ мкм призводить до зміни глибини рельєфу від $h_{\min} = 0,6$ мкм до $h_{\max} = 1,6$ мкм. Різниця в глибині рельєфу h_i впливає на ефективний період решітки $D_i = h_i / \cos \alpha$. Аналіз зображень показує, що період решітки змінюється від $D_{\min} = 0,5 W$ до $D_{\max} = 2,0 W$.

Таким чином, дефекти мікрорельєфу зменшують ахроматизуючу дію дифракційної ґратки з малим кроком рельєфу. Отже, слід приділити увагу підвищенню точності виготовлення мікропризм. Результати моделювання свідчать, що необхідно забезпечити точність вертикального позиціонування алмазного різця при формуванні мікрорельєфу $\approx 0,1$ мкм, що достатньо для формування ахроматизуючих мікропризмових структур.

ВИСНОВКИ

На основі теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему математичного моделювання мікропризмових оптичних пристроїв з плоскими дзеркальними гранями з метою підвищення ефективності спеціалізованих світлоповертальних та рефракційних структур.

Отримано основні нові наукові та практичні результати, зокрема:

1. Запропоновано математичні моделі мікропризмових спеціалізованих світлоповертальних та рефракційних пристроїв і методи розрахунків оптичних параметрів пристроїв з плоскими дзеркальними гранями; проведено дослідження виготовлених за результатами моделювання таких спеціалізованих пристроїв, в тому числі:

- розроблено метод моделювання оптичних характеристик мікропризмових світлоповертальних структур, який відрізняється використанням геометрично-алгебраїчних моделей структур, на основі якого виконано комплекс розрахунків параметрів таких пристроїв, проведено математичне моделювання процесу екранування ефективної поверхні світлоповертального елемента при різних кутах нахилу осі такого елемента та в процесі формування його дзеркальних граней методом алмазного різання для забезпечення мінімальних втрат світлового потоку при відбиванні світла від робочих поверхонь, на основі чого створено високоефективні мікропризмові світлоповертачі різних типів;

- побудовано математичну модель рефракційного мікропризмового елемента, який використовується в офтальмології, розраховано необхідні кути заломлення мікропризм для відхилення променів на строго визначені кути для одинарних та симетричних здвоєних мікропризм; визначено втрати потоку світла при проходженні його через зазначені мікропризмові поверхні;

- вперше запропоновано модель створення симетричних мікропризмових структур для офтальмології, яка відрізняється застосуванням здвоєних мікропризм, досліджено параметри таких пристроїв, що дозволило формувати

симетричні мікропризмові діагностичні пристрої зі здвоєних мікропризм для більш надійної діагностики дефектів зору;

– з використанням розроблених математичних моделей, які відрізняються застосуванням структур з плоскими гранями, вперше виконано комплекс розрахунків оптичних параметрів фокусуючих мікропризмових структур різних типів з плоскими дзеркальними гранями, на основі яких створено за технологією алмазного різання відповідні прецизійні пристрої для фокусування зображень та гомогенізації променів світла необхідної просторової структури.

2. Набув подальшого розвитку метод оцінювання оптичної якості світлоповертальних та рефракційних мікропризмових поверхонь за дифракцією лазерного випромінювання на мікрорельєфі, що дозволило вперше виконати комплекс розрахунків інтенсивності пройдених та відбитих світлових потоків для складних тришарових структур з метою контролю параметрів мікрорельєфу за дифракційною ефективністю променів.

3. Запропоновано метод дослідження та проведено моделювання впливу мікропризм на роздільну здатність та контраст зображень, які формуються за допомогою мікропризм, зокрема:

– розроблено новий метод моделювання роздільної здатності оптичних зображень, що формуються мікропризмами, який відрізняється більшою точністю вимірювань за рахунок застосування електронної реєстрації потоків світла від тестових штрихових оптичних типів, з використанням якого вперше отримано порівняльні оптичні характеристики існуючих офтальмологічних мікропризм різних світових виробників, визначено вклад мікропризм в зниження контрасту та роздільної здатності зображень при проведенні діагностики зору пацієнтів з використанням офтальмологічних мікропризм;

– запропоновано метод математичного моделювання та експериментально досліджено вплив дифракції та хроматизму білого світла на роздільну здатність та зменшення контрасту оптичних тестових зображень при використанні мікропризм; проведено математичне моделювання спектрів пропускання при наявності спеціальних кольорових світлофільтрів, отримано кількісні характеристики зміни контрасту зображень та зменшення зони хроматизму мікропризм при використанні відповідних кольорових світлофільтрів з метою створення офтальмологічних мікропризм зі зменшеною зоною хроматизму.

4. Побудовано геометричну модель ахроматизуючої мікропризмової структури, яка відрізняється використанням подвійних рефракційно-дифракційних мікропризм, на основі якої вперше розраховано оптичні характеристики спеціальних ахроматичних мікропризм з подвійним рельєфом, що дозволило практично створити ахроматичні мікропризми; експериментально досліджено виготовлені ахроматизуючі мікропризми – дифракційні ґратки з малим кроком мікрорельєфу, які призначені для повної компенсації дисперсійного хроматизму рефракційних офтальмологічних мікропризм дифракційним хроматизмом ґраток.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Безпосередньо за тематикою дисертаційної роботи опубліковано 62 наукові роботи, а саме:

- монографії (2):

1. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. Микропризмы в офтальмологии. – Киев, "Наукова думка", 2019. – 224 с., ISBN 978-9660-00-1639-2. *(Автором виконано моделювання мікропризмових структур та підготовлено одноосібні розділи 5–8 монографії).*

2. Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Mingley Fu, Petrov V.V., Shahoilo S.M., Zichun Le. Micropisms: Optical Parameters and Monitoring. Kyiv, Aradempetiodika, 2015. – 146 с, ISBN 978-966-360-284-4. *(Автором проведено моделювання та розрахунок оптичних параметрів мікропризмових структур для рефракції променів та світлоповертання.)*

- статті в наукових фахових журналах України (15):

3. Антонов Є.Є. Хроматизм і кольорові фільтри для мікропризм Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2019. Т.21, № 1. С.68–82. *(Одноосібна робота).*

4. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Розробка та впровадження високоефективних кругових світлоповертальних елементів для автомагістралей та транспортних мереж м. Києва. *Наука і інновації*, 2018. Т.14, № 5. С.63–67. *(Автором розраховані параметри мікропризмових пристроїв).*

5. Антонов Є.Є., Шиховець О.В. Дифракційний контроль мікрорельєфу оптичних дисків. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2016. Т.18, № 3. С.39–53. *(Автором розраховано дифракційні характеристики мікрорельєфу).*

6. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. Оптические характеристики традиционных эластичных и новых жестких микропризм Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2015. Т.17, № 1. С.3–15. *(Автором досліджено характеристики мікропризм різних виробників).*

7. Антонов Є.Є. Дифракційна ґратка для зменшення зони хроматизму мікропризм. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2014. Т.16, № 2. С.14–27. *(Одноосібна робота).*

8. Антонов Є.Є., Панкратова А.В., Шиховець О.В. Оптичні властивості серії гальванічних матриць мікрорельєфних світлоповертальних структур. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2013. Т.15, № 4. С.41–50. *(Автору належить ідея створення серії матриць, визначено параметри матриць).*

9. Антонов Є.Є. Роздільна здатність та призматична дія мікропризмових елементів Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2013. Т.15, №2. С.7–16. *(Одноосібна робота).*

10. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Токалін О.О., Шанойло С.М. Оптичні властивості здвоєних мікропризмових елементів. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2012. Т.14, № 4. С.7–17. *(Автором розраховано рефракційні характеристики симетричного мікрорельєфу).*

11. Антонов Є.Є. Алгоритм розрахунку параметрів кільцевих фокусуючих мікропризмових структур. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2012. Т.14, №2. С.38–47. (Одноосібна робота).

12. Петров В.В., Антонов Є.Є., Шанойло С.М., Лапчук А.С. Шляхи поліпшення оптичних характеристик мікропризмових структур. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2010, Т.12, №2. С.25–33. (Автором проведено моделювання параметрів світлоповертальних структур).

13. Петров В.В., Антонов Є.Є., Шанойло С.М. Хроматизм світла, дифракція та гострота зору в мікропризмових лінзах Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2010. Т.12, №1, С.49–54. (Автором виконано розрахунок рефракційних та дифракційних характеристик мікропризм.)

14. Петров В.В., Сергиенко Н.М., Рыков С.А., Антонов Є.Є., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Технология изготовления и методика применения в офтальмологии микропризмных элементов Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2008. Т.10, № 3. С.5–17. (Автором розроблено модель модифікованих мікропризм та розраховано параметри пристроїв).

15. Антонов Е.Е., Шанойло С.М., Шиховец А.В., Минг Чжан, Кай Лю. Оптические характеристики световозвращающих элементов. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2008, Т.10, № 2. С.13–22. (Автором розраховано параметри світлоповертання мікропризмових пристроїв).

16. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Гранат О.І., Зенін В.М. Світлоповертання: проблеми та досягнення. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2008. Т.10, № 1. С.3–15. (Автором виконано розрахунок параметрів світлоповертання пристроїв).

17. Петров В.В., Шанойло С.М., Крючин А.А., Антонов Е.Е., Кравец В.Г. Моделирование свойств асимметричных световозвращающих элементов. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2007. Т.9. № 2, С.17–25. (Автором розраховано оптичні параметри асиметричних світлоповертальних пристроїв).

- статті в закордонних фахових виданнях, які реферуються базою "Scopus" (5), в тому числі:

- першого квартиля (Q1) (2):

18. Fu M.L., Antonov E., Manko D., Petrov V., Le C.W., Bo C.F., Zhang W., Wang S.N. Achromatic Refractive-Diffractive Double-Relief Microprisms. *Optics and Laser in Engineering*, 2020. V.126, # 105903. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105903. (Received 3 June 2019, Revised 2 October 2019, Accepted 13 October 2019, Available online 21 October 2019.) (Автором виконана розробка геометричної моделі та розрахунок необхідних параметрів ахроматичних структур).

19. Fu Ming-lei, Antonov E.E., Hu Wei-jie, Le Zi-chun, Manko D.Y., Kryuchyn A.A., Petrov V.V., Shanoilo S.M. Investigation of optical characteristics of rigid protected and traditional elastic Fresnel microprisms using electronic method for measuring visual acuity. *Optics and Laser Technologies*, 2018. V.107,

P.15–23. **DOI:** 10.1016/j.optlastec.2018.05.011 (*Автором розроблено метод моделювання, створено експериментальний стенд та проведено дослідження параметрів мікропризм*).

- другого квартиля (Q2) (1):

20. Fu Minglei, Fan Tingchao, Lu Chunxiao, Zhang Wenqi, Antonov Eugene, Manko Dmytro. Light filters influence on the chromaticity for Fresnel microprisms. *Int. Journal for Light and Electron Optics (OPTIK)*, 2020. V.201, #163484. **DOI:** 10.1016/j.ijleo.2019.163484. (Received 24 June 2019, Accepted 26 September 2019, Available online 26 September 2019.). (*Автором розроблено модель розрахунків та виконано моделювання впливу фільтрів на зону хроматизму мікропризм*).

- четвертого квартиля (Q4) (1):

21. Fu Ming-lei, Antonov E.E., Hu Wei-jie, Le Zi-chun, Manko D.Y., Kryuchyn A.A., Petrov V.V. Design and Fabrication of Rigid Fresnel Prisms for Complex Treatment of Children Strabismus. *Acta Photonica Sinica*, 2017. V.46, N.11. #1123003. **DOI:** 10.3788/gzxb20174611.1123003. (*Автором розроблено модель та визначено технологічні параметри для виготовлення мікропризм*).

- реферується базою "Scopus" (1):

22. Petrov V., Kryuchyn A., Antonov E., Lapchuk A., Shanoylo S. Optical Phenomena in Microprism Diagnostic Set KK-42. *Proc. of SPIE*, 2011. V.8011, 80119A. **DOI:** 10.1117/12.900751. (*Автором визначено рефракційні та дифракційні характеристики рельєфу мікропризмових компенсаторів з діагностичного набору КК-42*).

- статті в інших наукових журналах України:

23. Риков С.О., Антонов Є.Є., Мелліна В.Б., Алєєва Н.М. Вплив модифікованих мікропризм Френеля на контрастну чутливість органу зору. *Архів офтальмології*, 2017. Т.5, № 1(7). С.44–50. (*Автором створено модель досліджень, визначено вплив мікропризм на контрастну чутливість*).

24. Петров В.В., Антонов Е.Е., Шанойло С.М. Микропризменный диагностический набор КК-42 – решение одной из проблем офтальмологии. *Журнал ОКО*, 2008, № 1. С.18–21. (*Автором створено моделі мікропризм та визначено оптимальні характеристики рельєфу*).

- патенти на винаходи (2):

25. Петров В.В., Коростельов О.П., Смішко Г.П., Бріцький О.І., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Косяк І.М., Христин В.М. Спосіб виготовлення оптичного дифузора. Патент України № 120022, Бюл. № 17 від 10.09.2019 р. (*Автором проведені експерименти з моделювання структури дифузору*).

26. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Світлоповертальний елемент для дорожніх катафотів. Патент України, № 86995, Бюл. № 11 від 10.06.2009 р. *(Автором розраховано параметри світлоповертання мікропризмових пристроїв з нахиленою поверхнею).*

- патенти України на корисні моделі (9):

27. Петров В.В., Бріцький О.І., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Косяк І.В., Заворотний А.А., Білобров М.М., Лисянський М.М., Бараненкова В.П. Спосіб виготовлення оптичного дифузора. Патент України № 119707, Бюл. № 14 від 25.07.2019 р. *(Автором проведені експерименти з моделювання структури дифузору).*

28. Петров В.В., Алєєва Н.М., Антонов Є.Є., Бутенко Л.В., Крючин А.А., Риков С.О., Сенякіна А.С., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Спосіб виготовлення скелець Баголіні. Патент України № 133832, Бюл. № 8 від 25.04.2019 р. *(Автором виконано моделювання параметрів стекол Баголіні).*

29. Петров В.В., Густелєв О.О., Осипов В.О., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Бараненкова В.П., Заболотний В.О., Зенін В.М. Мікропризмовий бордюрний світлоповертач. Патент України № 38690, Бюл. № 4 від 25.02.2019 р. *(Автором виконано моделювання структури та дослідження параметрів світлоповертання пристрою).*

30. Петров В.В., Коростельов О.П., Смішко Г.П., Бріцький О.І., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Косяк І.М., Христин В.М. Спосіб виготовлення оптичного дифузора. Патент України № 132420, Бюл. № 4 від 25.02.2019 р. *(Автором виконані експерименти з моделювання структури дифузору).*

31. Петров В.В., Бріцький О.І., Шанойло С.М., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Косяк І.В., Заворотний А.О., Білобров М.М., Лисянський М.М., Бараненкова В.П. Спосіб виготовлення оптичного дифузора. Патент України № 123591, Бюл. № 4 від 26.02.2018 р. *(Автором виконано моделювання та дослідження структури дифузору).*

32. Петров В.В., Крючин А.А., Риков С.О., Сергієнко М.М., Антонов Є.Є., Коробов К.В., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Діагностична лінійка симетричних мікропризмових компенсаторів косоокості. Патент України № 76872, Бюл. № 2 від 25.01.2013 р. *(Автором розраховано параметри та розроблено конструкції симетричних діагностичних пристроїв).*

33. Петров В.В., Крючин А.А., Риков С.О., Сергієнко М.М., Антонов Є.Є., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Діагностична лінійка мікропризмових компенсаторів косоокості Патент України № 66105, Бюл. № 24 від 26.12.2011 р. *(Автором розраховано параметри пристроїв).*

34. Петров В.В., Крючин А.А., Риков С.О., Сергієнко М.М., Антонов Є.Є., Мелліна В.Б., Шанойло С.М., Шевколенко М.В. Мікропризмона лінза комбінованої дії. Патент України № 46750, Бюл. № 1 від 11.01.2010 р. *(Автором виконано розрахунок параметрів та розробку конструкції пристрою).*

35. Петров В.В., Сергієнко М.М., Риков С.О., Шанойло С.М., Шевколенко М.В., Крючин А.А., Антонов Є.Є. Пристрій для діагностики косоокості. Патент України № 25549, Бюл. № 12 від 10.08.2007. *(Автором виконано розрахунок параметрів та розробку конструкції пристрою).*

- матеріали науково-технічних конференцій (27):

36. Антонов Є.Є. Моделювання хроматизму для мікропризм. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2019, с.10-11. *(Одноосібна робота).*

37. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Мікропризмові скельця Баголіні для офтальмології. Тези Межд. конф. 2-й Укр. Рефракційний пленер - 2018, 18.10.2018 р. *(Автором виконано моделювання впливу стекл Баголіні на контраст зображень).*

38. Петров В.В., Антонов Е.Е., Бутенко Л.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. Високі оптичні технології діагностики та лікування косоокості. Межд. конф. по детской офтальмологии, Одесса, 23-24 мая 2018 г. *(Автором розроблено конструкцію пристроїв для діагностики).*

39. Антонов Є.Є. Вплив кольорових світлофільтрів на хроматизм та контрастність зображень. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2018, С.11–13. *(Одноосібна робота).*

40. Петров В.В., Антонов Е.Е., Бутенко Л.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. Десятирічний досвід діагностики та лікування косоокості модифікованими мікропризмами Френеля. Тези Межд. конф. 1-й Укр. Рефракційний пленер-2017, 20.10.2017 р. *(Автором проведено моделювання оптичних параметрів мікропризмових пристроїв).*

41. Антонов Є.Є. Вплив модифікованих мікропризм Френеля на контрастну чутливість органу зору. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2017, С.10-11. *(Одноосібна робота).*

42. Антонов Е.Е. Особенности дифракционного контроля микрорельефа оптических дисков. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2016, С.20-21. *(Одноосібна робота).*

43. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Шанойло С.М. Шляхи зменшення хроматизму мікропризм Френеля. Тези VI науково-практичної конф. "Медицина реабілітація дітей з аномаліями рефракції", Львів, 19-20 червня 2015 р. *(Автором розраховано характеристики мікропризм).*

44. Антонов Є.Є. Гострота зору та роздільна здатність традиційних та нових жорстких мікропризм Френеля. Тези наук. конф. ІПРІ НАН України, 2015, С.33-34. *(Одноосібна робота).*

45. Petrov V.V., Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Shanoilo S.M., Butenko L.V. 3D Training Apparatus and Binocular Vision Problem. 8th Int. Conf. WCIS-2014, Tashkent, Uzbekistan, 25-27 Nov. 2014. *(Автором визначено оптичні параметри мікропризмових пристроїв).*

46. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Лапчук А.С., Шанойло С.М.. Ахроматическая микропризма для диагностики косоглазия. Тезисы XII Межд. конф. "Федоровские чтения -2014", Москва, 19-20 июня 2014 г. *(Автором розроблено модель пристрою та розраховано його параметри).*

47. Антонов Є.Є. Дифракційна ґратка для зменшення зони хроматизму мікропризм. Тези наук. конф. ІПРІ НАН України, 2014, С.17-18. *(Одноосібна робота).*

48. Петров В.В., Антонов Є.Є., Крючин А.А., Бутенко Л.В., Шанойло С.М. Мікропризмові пристрої для діагностики та корекції зору компенсаторними методами. Тези науково-практичної конф. "Новітня офтальмохірургія та сучасні можливості діагностики та лікування очної патології", Київ, 20-21 лист. 2013 р., С.255–256. *(Автором створено модель та розраховано параметри пристроїв).*

49. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. Микропризменные симметричные линейки для диагностики косоглазия. Тезисы XI Всероссийской конференции "Федоровские чтения-2013", Москва, 21-22 июня 2013 г. *(Автором створено модель для розрахунку та виконано розробку конструкції пристрою).*

50. Петров В.В., Антонов Е.Е., Шанойло С.М. Микропризменное устройство для точного измерения угла косоглазия. Тезисы конференции "Филатовские чтения-2013", Одесса, 23-24 мая 2013 г. *(Автором виконано розрахунок параметрів та розробку конструкції пристрою).*

51. Петров В.В., Антонов Є.Є., Шанойло С.М., Бойчук І.М., Шевколенко М.В., Коробов К.В. Діагностичні лінійки мікропризмових симетричних компенсаторів косоокості. Тези доповідей 5 Міжн. конф. з дитячої офтальмології, Севастополь, 03-05 жовтня 2012 р. *(Автором виконано розрахунок рефракційних характеристик мікропризмових структур).*

52. Петров В.В., Антонов Е.Е., Шанойло С.М. Высокоточные микропризменные линейки для диагностики косоглазия. Тезисы XI Всероссийской конференции "Федоровские чтения-2012", Москва, 20-22 июня 2012 г. *(Автором виконано розрахунок параметрів та розробку моделі пристрою).*

53. Petrov V.V., Antonov E.E., Shanoilo S.M. Microprism Bar for Improving the Efficiency and Reliability of Strabismus Diagnostics. Тезисы 16 Афро-Азиатского Конгресса по Офтальмологии, Turkey, Istanbul, 13-16 June 2012. *(Автором розраховано параметри та розроблено конструкцію пристрою).*

54. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. Применение высоких технологий информатики для создания новых средств медицинской техники в офтальмологии. Труды конф. по информ. технологиям, Ташкент, 3-10 сент. 2011 г. *(Автором розроблено модель нових мікропризмових пристроїв для діагностики).*

55. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М., Бутенко Л.В. Жесткие микропризмы Френеля для диагностики и лечения косоглазия. Тезисы IX Всероссийской конференции "Федоровские чтения-2011", Москва, 22-24 июня 2011 г. *(Автором виконано розрахунок параметрів та розробку конструкції пристрою).*

56. Петров В.В., Антонов Е.Е., Шанойло С.М. Микропризменные технологии в офтальмологии. Труды Межд. конф. "Наука, техника,

инновационные технологии в эпоху Великого. Возрождения", Ашгабат, 10-12 июня 2011 г. *(Автором розраховано параметри пристроїв)*.

57. Антонов Є.Є. Оптичні характеристики симетричних світлоповертачів з довільним нахилом осі. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2011, С.18. *(Одноосібна робота)*.

58. Петров В.В., Крючин А.А., Рыков С.А., Сергиенко Н.М., Антонов Є.Є., Шанойло С.М., Шевколенко М.В., Бутенко Л.В. О консервативном лечении косоглазия комбинированными жесткими линзами Френеля. Тезисы IX Съезда офтальмологов России, 16-18 июня 2010 г. *(Автором виконано розрахунок параметрів мікропризмових пристроїв)*.

59. Антонов Є.Є. Гострота зору та хроматизм світла в мікропризмових елементах для офтальмології. Тези наукової конференції ІПРІ НАН України, 2010, С.8-9. *(Одноосібна робота)*.

60. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М., Антонов Е.Е., Брицкий А.И., Зенин В.Н. Микропризменные технологии в офтальмологии. Тезисы IV научно-практической Конференции детских офтальмологов Украины, Киев, 01-02 октября 2009 г. *(Автором визначено необхідні оптичні параметри мікропризм)*.

61. Петров В.В., Антонов Е.Е., Крючин А.А., Шанойло С.М. О разработках микропризменных структур для офтальмологии Института проблем регистрации информации НАН Украины. Тезисы VIII Всероссийской конференции "Федоровские чтения-2009", Москва, 2009. *(Автором визначено параметри та розроблено конструкції пристроїв)*.

62. Антонов Е.Е. Моделирование и диагностика оптических характеристик микропризменных элементов. Тезисы научной конференции ИПРИ НАН Украины, 2008, С.16. *(Одноосібна робота)*.

АНОТАЦІЯ

Антонов Євген Євгенович. Методи математичного моделювання мікрорельєфних спеціалізованих структур для світлоповертання та рефракції світла. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Міністерство освіти і науки України. – м. Київ, 2020.

В дисертації запропоновано геометричні моделі та методи моделювання оптичних характеристик мікропризмових світлоповертальних, офтальмологічних рефракційних та кільцевих фокусуючих структур. Виконано комплекс розрахунків параметрів спеціалізованих мікропризмових пристроїв з плоскими дзеркальними гранями, які можна виготовити методом алмазного різання. Досліджено параметри створених за результатами виконаних розрахунків спеціалізованих рефракційних та світловідбивних структур.

Розроблено метод оцінювання оптичної якості світлоповертальних та рефракційних мікропризмових поверхонь за дифракцією лазерного

випромінювання на мікрорельєфі. Виконано комплекс розрахунків інтенсивності відбитих та пройдених світлових потоків для контролю параметрів мікрорельєфу за дифракційною ефективністю променів.

Розроблено новий метод моделювання роздільної здатності оптичних зображень з електронною реєстрацією світла з використанням тестових штрихових об'єктів, отримано порівняльні оптичні параметри існуючих офтальмологічних мікропризм різних виробників. Проведено математичне моделювання та експериментально досліджено вплив кольорових світлофільтрів на зону дисперсійного хроматизму рефракційних мікропризм, отримано кількісні характеристики зменшення зони хроматизму при використанні відповідних кольорових світлофільтрів.

Запропоновано модель створення ахроматичних рефракційно-дифракційних мікропризм, вперше розраховано оптичні характеристики таких спеціальних пристроїв. Експериментально досліджено виготовлені зразки ахроматизуючих мікропризм – дифракційних ґраток з малим кроком мікрорельєфу, які призначені для повної компенсації дисперсійного хроматизму рефракційних мікропризм дифракційними ґратками.

Ключові слова: мікропризмовий світлоповертальний елемент, мікропризма Френеля, дифракція, хроматизм, кольорові світлофільтри, ахроматичний мікропризмовий елемент.

АННОТАЦИЯ

Антонов Евгений Евгеньевич. Методы математического моделирования микрорельефных специализированных структур для световозвращения и рефракции света. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Министерство образования и науки Украины. – г. Киев, 2020.

В диссертации предложены геометрические модели и методы моделирования оптических характеристик микропризмных световозвращающих, офтальмологических рефракционных и кольцевых фокусирующих структур. Выполнен комплекс расчетов параметров специализированных микропризмных устройств для формирования световых потоков с плоскими зеркальными гранями, которые можно изготовить методом алмазной резания. Исследованы параметры специализированных рефракционных и светоотражающих структур, созданных по результатам выполненных расчетов.

В диссертационной работе приведен комплекс новых результатов по математическому моделированию и исследованию оптических характеристик микропризмных структур, в частности:

– разработан метод моделирования оптических характеристик и выполнен комплекс расчетов параметров микропризмных

световозвращающих структур, проведено математическое моделирование процесса экранирования эффективной поверхности светоотражающего элемента при различных углах наклона оси такого элемента и в процессе формирования его зеркальных граней методом алмазного резания для обеспечения минимальных потерь светового потока при отражении света от рабочих поверхностей, на основе чего созданы высокоэффективные микропризменные светоотражатели различных типов;

- построена математическая модель рефракционного микропризменного элемента, который используется в офтальмологии, рассчитаны необходимые углы преломления микропризм для отклонения лучей на строго определенные углы для одинарных и симметричных сдвоенных микропризм; определены потери потока света при прохождении его через микропризменные поверхности;

- впервые предложена модель симметричных микропризменных структур для офтальмологии и исследованы параметры таких устройств, что позволило формировать симметричные микропризм диагностические устройства из сдвоенных микропризм для более надежной диагностики дефектов зрения;

- с использованием разработанных математических моделей впервые выполнен комплекс расчетов оптических параметров фокусирующих микропризменных структур различных типов с плоскими зеркальными гранями, на основе которых созданы по технологии алмазного резания соответствующие прецизионные устройства для фокусировки изображений и гомогенизации лучей света необходимой пространственной структуры.

Разработан метод оценки оптического качества световозвращающих и рефракционных микропризменных поверхностей по дифракции лазерного излучения на микрорельефе. Впервые выполнен комплекс расчетов интенсивности отраженных и прошедших световых потоков для контроля параметров микрорельефа по дифракционной эффективности лучей для сложных трехслойных микрорельефных структур.

Разработан новый метод моделирования разрешения оптических изображений с электронной регистрацией излучения с применением тестовых штриховых объектов, получены сравнительные оптические характеристики существующих офтальмологических микропризм различных производителей, определен вклад микропризм в снижение контраста и разрешения изображений при проведении диагностики зрения пациентов с использованием офтальмологических микропризм.

Проведено математическое моделирование и экспериментально исследовано влияние цветных светофильтров на зону дисперсионного хроматизма рефракционных микропризм, получены количественные характеристики уменьшения зоны хроматизма при использовании соответствующих цветных светофильтров.

Предложена модель создания ахроматических рефракционно-дифракционных микропризм, впервые рассчитаны оптические характеристики таких специальных устройств. Экспериментально исследованы изготовленные образцы ахроматизирующих микропризм – дифракционных решеток с малым

шагом микрорельефа, которые предназначены для полной компенсации дисперсионного хроматизма рефракционных микропризм дифракционными решетками.

Ключевые слова: микропризменные световозвращающие элементы, микропризмы Френеля, дифракция, хроматизм, цветные светофильтры, ахроматический микропризменный элемент.

ABSTRACT

Antonov Eugene. E. Methods for mathematical simulation of microrelief specialized structures for retroreflection and refraction of light. – Manuscript.

Theses for the scientific degree of Doctor for Technical Science in the specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2020.

The dissertation presents the geometric models and methods for simulation of the optical characteristics of microprism structures: retroreflective, ophthalmic refractive and circular focusing ones. The calculations are performed for the parameters of specialized microprism devices with plane mirror facets for the formation of light fluxes, which can be made by the diamond cutting method.

The method of optical quality control of retroreflective and refractive microprism surfaces by laser radiation diffraction on the microrelief has been developed. The calculations of the intensity of light fluxes was performed for complex three-layers structures to control the parameters of microrelief by the diffraction efficiency of the reflected and transmitted beams.

A new method for simulating the resolution of optical images using the electronic registering of the light with test stroke objects is developed. The comparative optical parameters of existing ophthalmic microprisms of different manufacturers are obtained. The mathematical modeling has been carried out and the effect of color filters on the zone of dispersion chromatism zone for refractive microprisms is experimentally investigated. The quantitative characteristics of the chromatic zone decrease with the use of appropriate color filters are obtained.

The model for the creation of achromatic refractive-diffraction microprisms is developed and the optical characteristics of special achromatic devices were obtained at the first time. The samples of special achromatizing microprisms, that are diffraction gratings with a small microrelief pitch, are experimentally investigated. Such devices are intended for total compensation of the dispersion chromatism of the refractive microprisms by the diffraction gratings.

Keywords: microprismatic retroreflective element, Fresnel microprism, diffraction, chromatism, color filters, achromatic microprism element.