

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ВАСИЛЬКОВСЬКА ІННА ОЛЕГІВНА

УДК 535.42

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ
ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ**

Спеціальність 05.11.07 – Оптичні прилади та системи

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ - 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Колобродов Валентин Георгійович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Павлов Сергій Володимирович,

Вінницький національний технічний університет, проректор з наукової роботи, професор кафедри загальної фізики та фотоніки;

кандидат технічних наук, доцент

Сенаторов Володимир Миколайович,

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, старший науковий співробітник.

Захист дисертації відбудеться «___» _____ 2019 р. о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» _____ 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н. І. Бурау

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна прикладна оптика розвивається насамперед завдяки широкому використанню дифракційних оптичних елементів (ДОЕ), які здійснюють модуляцію падаючого хвильового фронту в результаті дифракції світла на мікроструктурі елемента. Теоретично можна спроектувати елемент, який відтворить будь-який розподіл інтенсивності у площині зображення. Дифракційна лінза (ДЛ) є одним із основних типів ДОЕ, які застосовуються при формуванні та вимірюванні (зондуванні) хвильового фронту, в оптичному зв'язку, в оптичному записі інформації, в оптичних сканерах, в офтальмології та інших галузях науки і техніки.

Оскільки методи проектування ДЛ, як правило, невідривно пов'язані із технологіями виготовлення, раніше їх використання було обмеженим, адже не було реальної можливості створити мікропрофіль із висотою в кілька довжин хвиль та здатністю забезпечувати відновлення хвильового фронту із точністю до $1/20$ довжини хвилі. Це стало дійсністю завдяки вдосконаленню технологій нанесення мікроструктури різної складності на поверхню елемента.

ДЛ мають унікальні фокусуючі та абераційні властивості. Своїми функціями вони здатні частково або повністю замінити рефракційну оптику. Основними перевагами ДЛ перед рефракційними лінзами є їх компактні розміри та мала вага. Для вирішення багатьох задач науки та техніки необхідно сфокусувати випромінювання в складну область простору. ДЛ є фокусаторами, основною проблемою у створенні яких є досягнення високої енергетичної ефективності при формуванні необхідного розподілу інтенсивності у фокальній площині.

Фокусуючі властивості ДЛ досягаються завдяки формуванню різноманітних геометричних профілів на поверхнях лінз. Широко відоме використання дифракційного профілю в інтраокулярних лінзах (штучних кришталиках ока). Якість зображення, створюваного такою лінзою, нічим не гірша за зображення, створене природним кришталиком, а може навіть перевершувати його. Проте створені сьогодні зразки штучних кришталиків мають обмежені можливості акомодатії для чіткого бачення предметів у діапазоні відстаней від нескінченності до 25-30 см. Тому у дослідників виникла проблема вдосконалення існуючих методів проектування ДЛ для покращення глибини їх акомодативної здатності та зменшення хроматичної аберації. У зв'язку з цим подальшого розвитку потребують теоретичні і експериментальні дослідження методів проектування ДЛ. Таким чином, удосконалення методів проектування ДЛ є актуальною проблемою сучасного приладобудування для офтальмології.

Зв'язок роботи з науковими темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та пов'язана з такими науково-дослідними бюджетними темами, виконаними за участю автора: «Теоретичне обґрунтування принципів побудови

діагностичної медичної техніки і технологій її застосування» ДР№ 0112U002403 (згідно наказу МОН України від 28 жовтня 2011 р. №1241, наказу НТУУ «КПІ» від 30 грудня 2011 р. №2-352) 2012–2014 рр.; «Математичне моделювання та розробка засобів діагностики стану людини на основі аналізу інфрачервоного випромінювання патогенних зон» ДР№ 0115U000354 2015–2016 рр.; «Розроблення нових критеріїв якості зображення тепловізійних систем спостереження різного призначення і апаратури для їх визначення» ДР№ 0117U002300 2017–2019 рр.; «Оптико-цифровий процесор для обробки зображень в тепловізійних системах спостереження» ДР№ 0118U002070 2018–2020 рр.

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертації є вирішення наукової задачі вдосконалення методів проектування ДЛ, які зможуть забезпечити досягнення заданих оптичних характеристик лінз.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

1. Провести аналіз науково-технічної літератури, присвяченої класифікації ДЛ, принципам роботи та методам їх проектування, та обґрунтувати шляхи вдосконалення методів проектування ДЛ.
2. Провести дослідження багатопорядкових дифракційних лінз (БПДЛ) та встановити функціональні залежності дифракційної ефективності (ДЕ) від основних параметрів лінз. Теоретично обґрунтувати та вдосконалити нові методи проектування ДЛ на основі використання багатопорядкових лінз, а також у комбінації з рефракційними лінзами.
3. Обґрунтувати та розробити алгоритми забезпечення необхідної дифракційної ефективності в заданих дифракційних порядках.
4. Провести теоретичне обґрунтування ефективності і перспектив використання багатопорядкових дифракційних лінз в офтальмології.
5. Розробити метод та експериментальний стенд для дослідження дифракційної ефективності бінарної ДЛ.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення дифракційними лінзами.

Предметом дослідження є шляхи вдосконалення методів проектування дифракційних лінз.

Методи дослідження. У роботі були використані аналітичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Аналітичні методи базувалися на застосуванні теорії дифракції та теорії оптичних систем. Чисельні методи були використані для математичного моделювання формування зображення ДЛ. Експериментальні методи були використані для підтвердження теоретичних положень на експериментальному стенді.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. На основі дослідження властивостей багатопорядкових дифракційних лінз отримано залежності просторового розподілу інтенсивності в зображенні, сформованого такою лінзою, від конструктивних параметрів лінзи, що дозволяють направляти необхідну кількість падаючої енергії в задані дифракційні порядки.

2. Обґрунтовано та вдосконалено методи проектування інтраокулярних лінз на основі використання БПДЛ, що дозволило зменшити їх хроматичні аберації та покращити акомодативну здатність.

3. Встановлено, що комбінація БПДЛ з рефракційною частиною лінзи дозволяє підвищити якість зображення, сформованого такою лінзою, задля створення штучного кришталика ока в офтальмології.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено інженерні методи розрахунку мікрорельєфу дифракційно-рефракційних інтраокулярних лінз, які можуть бути використані в офтальмології.

2. Удосконалено метод розрахунку БПДЛ, що дозволяє зменшити їх хроматичні аберації.

3. Розроблено метод і експериментальний стенд для дослідження дифракційної ефективності бінавної дифракційної лінзи.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав безпосередню участь у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів та формулюванні висновків. Основні теоретичні, наукові положення, що виносяться на захист, належать автору.

В опублікованих у співавторстві роботах авторові належить: розробка методу розрахунку ДЛ із заданим коефіцієнтом пропускання та аналіз розподілу інтенсивності, сформованого такою лінзою [1]; розробка аналітичного методу проектування фазових дифракційних ґраток за заданим коефіцієнтом пропускання, а також спосіб керування розподілом вхідної енергії в заданій площині спостереження та дифракційною ефективністю ґратки [2]; дослідження контрасту головних зображень, сформованих трифокальною інтраокулярною лінзою [3]; теоретичне дослідження властивостей БПДЛ та встановлення залежності розподілу енергії по порядкам дифракції від коефіцієнта товщини лінзи [4]; обґрунтування підходу до проектування мультифокальних інтраокулярних лінз на основі БПДЛ задля виправлення хроматичної аберації [5]; виявлення здатності БПДЛ фокусувати поліхроматичне світло з високою ДЕ у відрізок [6]; удосконалення методу розв'язання нелінійного інтегрального рівняння Френеля для заданого двовимірного та тривимірного простору розподілу інтенсивності [7,8]; розробка математичної моделі впливу похибки виготовлення глибини мікрорельєфу багатопорядкової лінзи на її дифракційну ефективність [9]; моделювання БПДЛ та дослідження дифракційної ефективності в залежності від точності виготовлення її мікрорельєфу [10]; розрахунок рефракційно-дифракційного об'єктива [11]; обґрунтування методу проектування біфокальної ДЛ як багатопорядкової та проведення оцінки якості змодельованої лінзи [12]; обґрунтування вдосконалення інтраокулярної лінзи шляхом нанесення багатопорядкового мікрорельєфу замість звичайного дифракційного [13]; дослідження властивостей багатопорядкових лінз та виявлення властивості так званої безкінечної акомодатії [14]; проведення комп'ютерного моделювання

БПДЛ та аналіз її основних оптичних характеристик [15]; дослідження впливу похибки нахилу вертикальної стінки на дифракційну ефективність ДЛ [16].

Результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри оптичних та оптико-електронних приладів КПП імені Ігоря Сікорського.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались на 11 науково-технічних конференціях:

- «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2013р.;
- «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2014–2018 рр.;
- «Новые направления развития приборостроения», м. Мінськ, 2013-2015 рр.;
- «Авіакосмічне приладобудування », м. Київ, 2014 р.;
- «15th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science», м. Київ, 2014 р.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи викладені в 17 наукових роботах, серед яких 6 статей у фахових наукових виданнях (одна із яких в закордонному виданні, 5 статей у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних) та 11 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Повний обсяг дисертації сягає 182 сторінки, з обсягом основного тексту 138 сторінок. Дисертація містить 85 рисунків, 12 таблиць, список використаних джерел із 82 найменувань на 8 сторінках та 6 додатків на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведені дані про публікації та апробацію результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими темами.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану та існуючих проблем проектування ДЛ, на основі якого було визначено напрями подальшого поліпшення конструкцій ДЛ шляхом удосконалення методів проектування.

Дифракційні лінзи перетворюють падаючий хвильовий фронт у результаті дифракції світла на мікроструктурі поверхні лінзи. Основною задачею при проектуванні ДЛ є досягнення високої ДЕ при формуванні заданого розподілу інтенсивності. Проектування ДЛ здійснюється кількома методами, це: проектування в наближенні геометричної оптики, скалярної теорії дифракції. Недоліками першого методу є те, що при розрахунку не враховується дифракція світла у вільному просторі, а також її вплив на розподіл інтенсивності в фокальній площині, в результаті чого він буде непостійним. Дифракційні ж методи, вільні від цих вад, однак, базуючись на методах

обробки та відновлення зображень, є трудомісткими, включають вирішення прямої та оберненої задачі дифракції світла та тісно зв'язані із технологіями виготовлення. Тому в межах даної дисертації проектування здійснюватиметься переважно дифракційними методами, в тому числі за допомогою комп'ютерного ітераційного проектування.

На основі аналізу сучасної класифікації ДЛ було виявлено, що звичайні ДЛ мають певні недоліки, які вагомо впливають на їх якість, це значні хроматичні аберації. Однак існують також багатопорядкові ДЛ, які поєднують у собі властивості і дифракційних, і рефракційних лінз в одному елементі. БПДЛ здатні фокусувати хвилі різної довжини в одну точку із високою ДЕ. Конструкція БПДЛ особлива тим, що чим більше променів фокусуються в одну точку, тим глибші канавки має ДЛ. Тому важливо знаходити баланс між складністю виготовлення та виправленням хроматичної аберації.

У результаті розгляду найбільш поширених технологій виготовлення ДЛ були виявлені похибки виготовлення, які найчастіше зустрічаються при їх створенні, такі як, наприклад, нахил вертикальної стінки. Знаючи які похибки будуть присутні в готовому зразку лінзи, можна буде скоригувати технологію для покращення кінцевого результату.

Найширшого розповсюдження ДЛ набули в офтальмології завдяки своїй мультифокальності. Ця властивість використовується в інтраокулярних лінзах, що замінюють природний кришталік ока людини, пошкоджений внаслідок катаракти. Кількість таких операцій з кожним роком невпинно зростає, що свідчить про актуальність такого дослідження, а також дослідження використання для даних цілей БПДЛ.

Таким чином, проведений аналіз дозволив сформулювати мету і задачі дисертації та обрати відповідні методи досліджень.

У **другому розділі** представлено математичну модель для опису проходження світла через звичайну ДЛ та БПДЛ.

Детально описано алгоритм розрахунку мікрорельєфу БПДЛ. Виходячи із геометричних міркувань, були отримані вирази як для радіального положення зон, так і для функції висоти мікрорельєфу в залежності від радіальної координати з урахуванням числа стрибків фаз p .

Проведено дослідження властивостей БПДЛ на основі моделювання проходження білого світла через ДЛ з наступними параметрами: фокусна відстань у повітрі $f=100$ мм, $p=8$, матеріал поліметилметакрилат (ПММА), розрахункова довжина хвилі $\lambda_0=0,555$ мкм, у межах світлового діаметру $D=7$ мм розміщується 13 дифракційних зон, а максимальна глибина канавки складає 9 мкм. Загальновідомо, що у звичайних ДЛ робочими є порядки 0, ± 1 , вплив інших порядків на загальну інтенсивність вважається негативним фактором.

Найважливішим завданням, що лежить в основі проектування ДЛ, є досягнення високої ДЕ в робочих дифракційних порядках

$$\eta_N = \text{sinc}^2(\alpha \mu p - N), \quad (1)$$

де α – параметр, який визначається як доля фазової затримки 2π для довжин хвиль, відмінних від розрахункової $\lambda \neq \lambda_0$, N – робочий порядок дифракції, μ – коефіцієнт товщини мікрорельєфу.

Завдяки дослідженню дифракційної ефективності БПДЛ із заданими параметрами (рис.1), вдалося визначити позитивну дію більшої кількості робочих дифракційних порядків. Ефективними дифракційними порядками

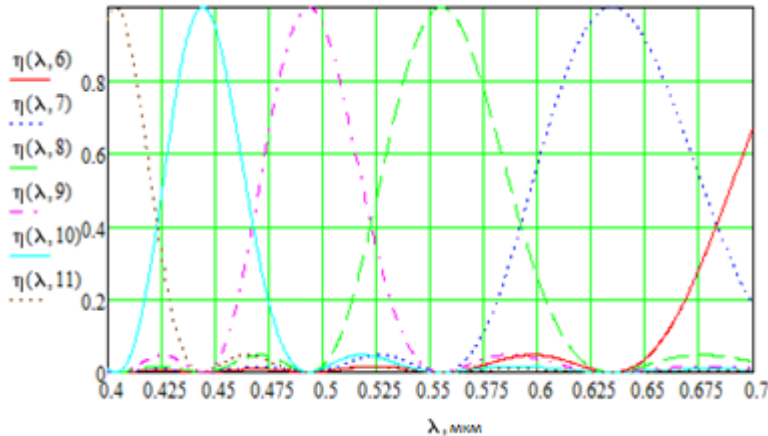


Рис. 1. Дифракційна ефективність БПДЛ

вважатимемо ті, вплив яких є визначаючим у формуванні зображення. У даному випадку це будуть такі порядки, які діють в заданому спектральному діапазоні. Кольорове зображення утворюється поєднанням світла ефективних дифракційних порядків, зі збільшенням числа стрибків фази p їх кількість зростає. Детально розглянуто вплив кожного

дифракційного порядку на загальне зображення та виявлено, що для деяких довжин хвиль лінзи є біфокальними, тобто ДЕ для сусідніх порядків буде однаковою і становитиме 40,5%.

Ідеальна БПДЛ не вносить аберацій для світла з розрахунковою довжиною хвилі, а також для набору хвиль, розрахованих за формулою $\lambda = p\lambda_0/N$. Для всіх інших хвиль ДЛ вносить аберації. Була виведена зручна формула для розрахунку аберацій усіх видів в залежності від числа стрибків фази p .

Дифракційна ефективність робочих порядків ДЛ на практиці нижча за теоретичне значення 100%. Це зумовлено виникненням розсіяного світла від небажаних дифракційних порядків і заважає більш широкому використанню ДЛ. Для реалізації можливості обчислення ДЕ БПДЛ було модифіковано існуючі вирази для розрахунку параметрів звичайних ДЛ з урахуванням багатопорядковості. Були отримані вирази у відповідності до основних причин зниження ДЕ, таких як спектрального діапазону роботи ДЛ, зміни кута падіння падаючого світла та помилок виготовлення ДЛ.

Отримані залежності дифракційної ефективності БПДЛ від найважливіших параметрів БПДЛ використовуються при створенні нових методів проектування ДЛ.

Третій розділ присвячено розробці нових та вдосконаленню існуючих методів проектування ДЛ.

Розроблено дифракційний метод розрахунку фазової функції ДЛ, яка формує заданий розподіл інтенсивності в деякій площині, що перпендикулярна оптичній осі і розміщена на заданій відстані від елемента. Нехай необхідно

розрахувати фазову функцію БПДЛ, яка фокусуватиме світло в дві точки на оптичній осі, тобто буде біфокальною. Метод полягає в розв'язку оберненої задачі дифракції світла визначення фазової функції $\varphi_{doe}(x, y)$: необхідно знайти профіль зон мікрорельєфу поверхні елемента $h_{doe}(x, y)$, який задовольняє умову отримання заданого розподілу інтенсивності $I_0(x_0, y_0, z)$ в певній зоні спостереження (рис. 2). Метод оснований на вдосконаленні відомого алгоритму Герчберга-Секстона. Очевидно, що даний алгоритм дозволяє розрахувати комплексну амплітуду поля $V_n(x, y)$ на n -му кроці ітерації. Метою поставленої задачі було отримання фази ДЛ. Тому є доцільним удосконалити алгоритм, додавши ще один крок, а саме обчислення фазової функції ДЛ по отриманій амплітуді.

Удосконалений алгоритм зменшення похибки Герчберга-Секстона (рис. 3) складається з наступних кроків: 1) обирається початкова фазова функція ДОЕ $\varphi_0(x, y)$ в першому наближенні; 2) здійснюється інтегральне перетворення рівняння Френеля для функції $V_1(x, y) = U_1(x, y) \exp[j\varphi_0(x, y)]$; 3) результуюча комплексна амплітуда $V_1(x_0, y_0)$ в площині спостереження замінюється на функцію $\bar{V}_1(x_0, y_0)$ за правилом $\bar{V}_1(x_0, y_0) = U_0(x_0, y_0) V_1(x_0, y_0) / |V_1(x_0, y_0)|$, де $U_0(x_0, y_0) = \sqrt{I_0(x_0, y_0)}$ – задана дійсна амплітуда поля в площині спостереження; 4) розраховується перетворення $\bar{V}_1(x_0, y_0)$, обернене перетворенню Френеля $V_1(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \bar{V}_1(x_0, y_0) h_F^*(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0$; 5) отримана комплексна амплітуда поля $V_1(x, y)$ в площині ДОЕ замінюється на $\bar{V}_1(x, y)$ за правилом $\bar{V}_1(x, y) = V_2(x, y) = U_1(x, y) V_1(x, y) / |V_1(x, y)|$, коли $\sqrt{x^2 + y^2} \leq D_p/2$, де D_p – діаметр апертури ДОЕ; 6) обчислюється фазова функція ДОЕ $\varphi_1(x, y) = \arg(V_1(x, y))$; 7) перехід до кроку 2. Ця процедура повторюється до тих пір, поки похибки δ_1 та δ_2 не будуть значно змінюватись:

$$\delta_1^2 = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} [V_i(x_0, y_0) - U_0(x_0, y_0)]^2 dx_0 dy_0}{2 \int \int_{-\infty}^{\infty} U_0^2(x_0, y_0) dx_0 dy_0}, \delta_2^2 = \frac{\int \int_{-\infty}^{\infty} [V_i(x, y) - U_0(x, y)]^2 dx dy}{2 \int \int_{-\infty}^{\infty} U_0^2(x, y) dx dy}.$$

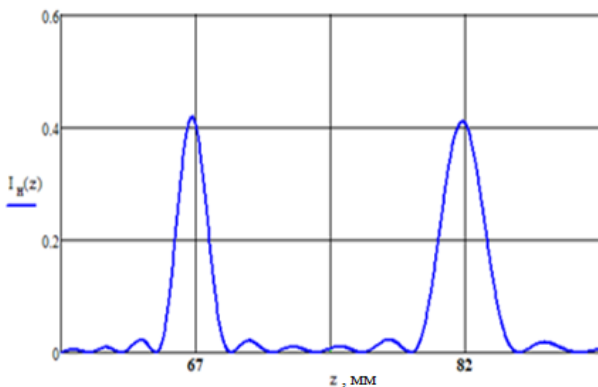


Рис. 2. Розподіл інтенсивності ДЛ

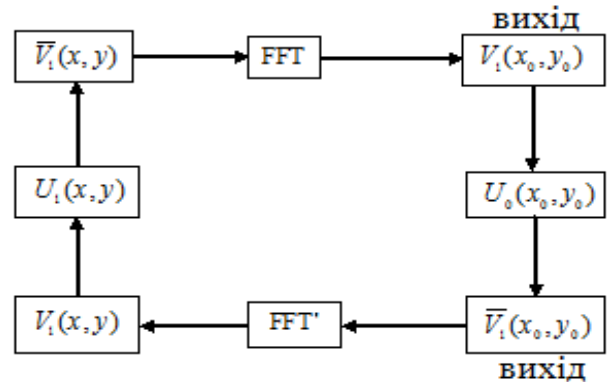


Рис. 3. Алгоритм Герчберга-Секстона

Запропонований дифракційний метод розрахунку фазової функції ДЛ, що формує біфокальне зображення, був апробований численно. Результатом обчислення є фазова функція ДЛ (рис. 4), яка формує на відстанях $z_1 = 67$ мм та $z_2 = 82$ мм задані розподіли інтенсивності.

Перевагою запропонованого методу перед геометричними є те, що враховуються дифракційні ефекти, що забезпечує краще відтворення потрібної інтенсивності. Метод дозволяє спростити громіздкі розрахунки перетворення Френеля, використовуючи вбудовані функції пакету Mathcad. Ефективність фокусування розрахованої лінзи складає 73%, а середньоквадратичне відхилення необхідної інтенсивності від розрахованої – 11%.

Розроблено метод розрахунку ДЛ із заданим коефіцієнтом пропускання $t_0(r) = [1 + \text{sng}(\cos(\alpha r^2))] \text{circ}(r/l)/2$ (рис.5), де l – радіус ДЛ, за допомогою якого стало можливим визначення положення фокусів лінзи та її діаметра, а також розрахунок інтенсивності, що створює лінза в заданій площині спостереження; $\text{sng}(\dots)$ – функція знаку, що дорівнює 0 при значенні аргументу 0, 1 – при додатному аргументу, -1 – при від'ємному; $\text{circ}(r/l)$ – кругова функція, що дорівнює 1 при $0 \leq r \leq l$, та 0 при $r > l$; α - параметр модуляції.

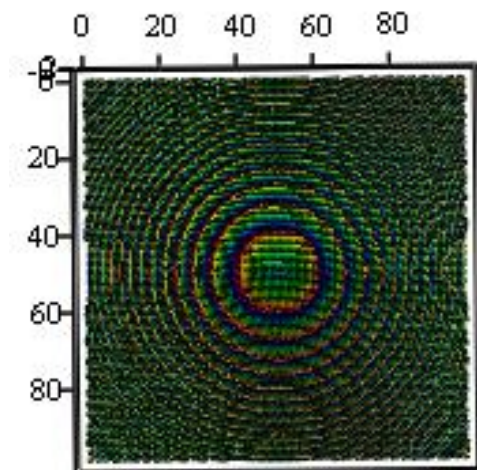


Рис. 4. Фазова функція біфокальної ДЛ

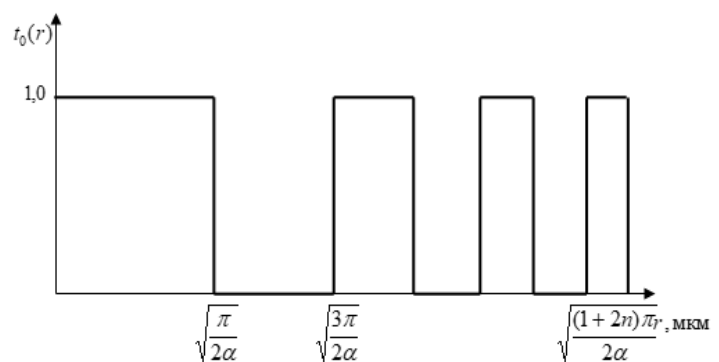


Рис. 5. Амплітудний коефіцієнт пропускання зонної пластинки Френеля

Метод полягає в послідовному обчисленні за заданим коефіцієнтом пропускання амплітуди поля в центрі дифракційної картини відповідно до теорії дифракції Френеля та інтенсивності вздовж оптичної осі. Згідно із запропонованим методом наступним кроком є дослідження отриманого розподілу інтенсивності. Воно показало, що максимум інтенсивності буде спостерігатися в головному фокусі, причому зі збільшенням кількості смуг (діаметра лінзи), збільшується концентрація енергії в фокусі і вона менше розмивається вздовж оптичної осі (рис. 6). Також визначено, що для такої ДЛ положення фокусів залежить від довжини хвилі, ширини смуг, що задається параметром модуляції, та номеру фокуса, а інтенсивність залежить від кількості смуг, а також номера фокуса. Водночас ширина смуг визначається параметром модуляції та довжиною хвилі.

Запропонований підхід до проектування ДЛ підходить також і до проектування фазових дифракційних ґраток, що було показано на прикладі розрахунку синусоїдальної фазової ґратки, яка має комплексний фазовий коефіцієнт пропускання $t(x, y) = \exp[jm \sin(2\pi v_0 x)/2] \text{rect}(x/a) \text{rect}(y/b)$, де m – глибина фазової модуляції; v_0 – просторова частота ґратки; $a \times b$ – розмір ґратки. Відмінність у підходах полягає в тому, що розрахунок здійснюється на основі теорії дифракції Фраунгофера.

Був отриманий наступний вираз для розподілу інтенсивності:

$$I(x_0, y_0) = (ab/\lambda z)^2 \text{sinc}^2(b y_0/\lambda z) \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m/2) \text{sinc}[a(x_0/\lambda z - k v_0)] \right)^2, \quad (2)$$

де $J_k(\dots)$ – функція Бесселя k -го порядку.

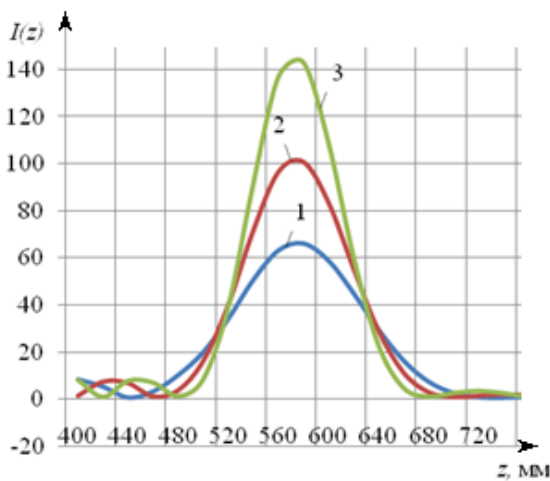


Рис. 6. Розподіл інтенсивності в головному фокусі в залежності від кількості зон N : 1 – $N = 3$, 2 – $N = 4$, 3 – $N = 5$

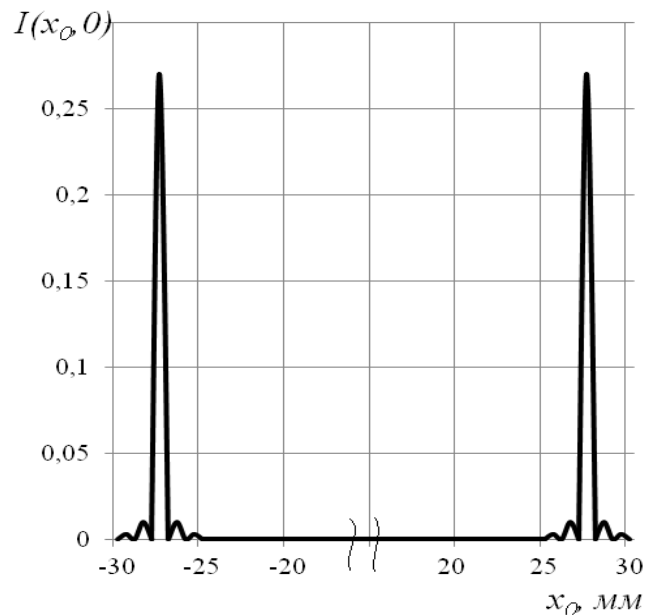


Рис. 7. Розподіл інтенсивності, сформований фазовою ґраткою

Аналіз даного виразу показує, що синусоїдальна зміна фазового коефіцієнта пропускання ґратки обумовлює перерозподіл енергії від центрального дифракційного максимуму до додаткових бокових максимумів, причому параметр k визначає цей перерозподіл. Також виявлено, що, підбираючи значення параметру m , можна направляти необхідну кількість енергії у відповідні порядки дифракції. Як результат, на рис. 7 приведено графік розподілу інтенсивності, у якого при правильно підбраному m у формулі (2) енергія зосереджується у 1, та -1 порядку дифракції, а нульова складова зникає.

Розроблено метод проектування БПДЛ, основна ідея якого полягає в тому, що на відміну від багатофокусних лінз, які проектуються для 0 та 1 порядку дифракції, багатопорядкова лінза проектується для сусідніх порядків дифракції, відмінних від 0 та 1. Теоретично їх може бути нескінченна кількість.

Розрахункова довжина хвилі обирається з міркувань, що ДЛ працюватиме в моделі ока людини. ДЛ в таких випадках розраховуються для найбільш комфортної для ока зеленої хвилі. Також до уваги бралася ідея поєднати у фокусі синю, червону і зелену складові світла, а в результаті отримати кольорове зображення. Параметри слід підібрати так, щоб в робочому спектральному діапазоні спостерігалися три піка інтенсивності, в результаті дослідження ДЕ таким значенням обрано $p = 6$. Запропонований метод дозволяє спроектувати біфокальну лінзу з можливістю керувати енергією в фокусах, варіюючи значеннями коефіцієнта $\mu = t'/t$, де t і t' – розрахункова і реальна товщини профілю відповідно.

Таким чином, розроблений алгоритм проектування містить такі кроки: 1) задається перша фокусна відстань лінзи f_0 ; 2) задається відстань, на якій розміщено предмет a ; 3) задається відстань фокусування зображення a' ; 4) за формулою Гауса розраховується друга фокусна відстань лінзи f_2 ; 5) обирається необхідна величина з ряду $f_1 = f_0 p / (p + 1)$; 6) задається довільне значення μ ; 7) знаходяться значення p та $N = p + 1$, при яких досягається необхідний розподіл інтенсивності; 8) здійснюється перерозподіл енергії в порядки N та $N + 1$, розрахувавши потрібне значення μ ; 9) обчислюються радіуси r_q та висота h зон Френеля ДЛ.

Послідовне обчислення амплітуди та інтенсивності зображення, сформованого БПДЛ, призвело до отримання наступного виразу для обчислення:

$$I(z) = \left| 2\pi \int_0^R \exp\left(-\frac{i\pi N \rho^2}{p\lambda_0 f_0}\right) \cdot \frac{\exp(\sqrt{z^2 + \rho^2} \frac{i2\pi}{\lambda_0})}{i \frac{\lambda_0}{z} \cdot (z^2 + \rho^2)} \rho d\rho \right|^2, \quad (3)$$

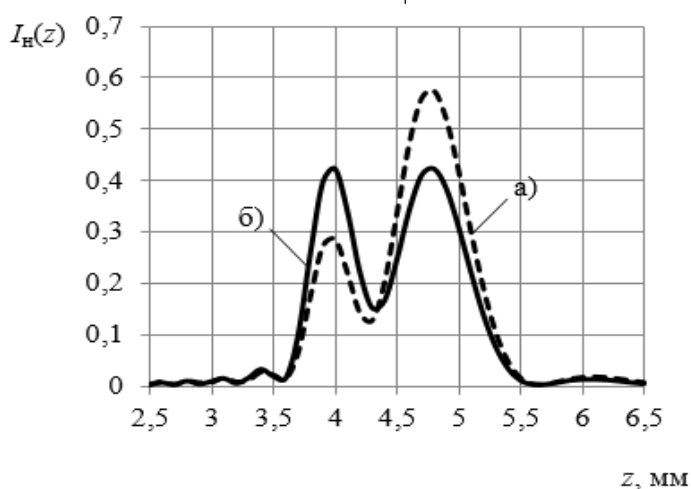


Рис. 8. Розподіл інтенсивності вздовж оптичної осі: а) до перерозподілу; б) після перерозподілу

На основі дослідження інтенсивності за формулою (3) побудовані розподіли інтенсивності до та після перерозподілу енергії за рахунок врахування обчисленого значення μ . Розрахована описаним методом біфокальна ДЛ здатна фокусувати світло в дві просторово розділені точки із однаковою інтенсивністю 40,5% (рис. 8). Останній метод ґрунтувався на детальному дослідженні властивостей БПДЛ. Якщо розділити робочий

спектральний діапазон на умовні відрізки, що відповідають синьому, зеленому і червоному спектрам світла, так же як і у попередньому методі, незалежно від номера порядку дифракції світло з кожного діапазону фокусуватиметься у відрізки на оптичній осі, які накладаються і мають спільну частину (рис. 9).

Додатково дослідивши ДЕ, можна побачити з якою ефективністю світло кожного діапазону фокусується на прямій вздовж оптичної осі, особлива увага приділялась світлу із високою ефективністю – більше 40%. Як з'ясувалося БПДЛ фокусує світло із високою ефективністю у відрізок, довжиною 15 мм.

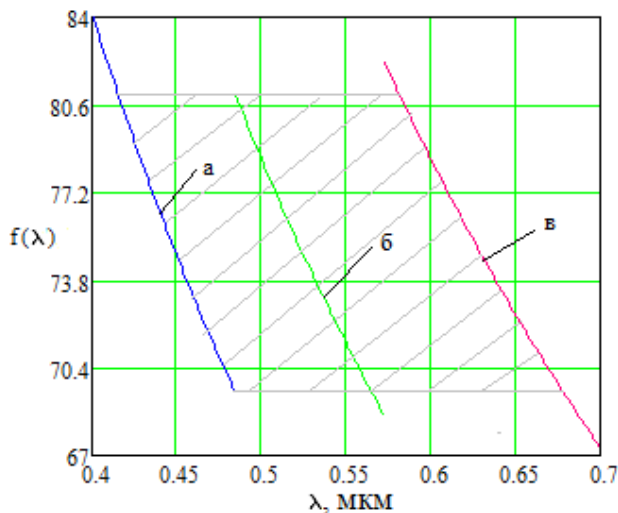


Рис. 9. Залежність фокусної відстані від довжини хвилі, де: а) синій діапазон; б) зелений діапазон; в) червоний діапазон; область перекривання заштрихована

Цій властивості була дана назва «безкінечна глибина акомодатії», під якою розуміється здатність фокусувати усе падаюче світло у відрізок на оптичній осі із високою інтенсивністю. Дану властивість покладено в основу методу проектування БПДЛ із безкінечною глибиною акомодатії.

БПДЛ фокусують світло у відрізок, обмежений двома фокусними точками – ближньою $F_{бл}$ та дальньою F_d (рис.10). Принцип проектування таких лінз полягає в тому, що зображення предмета у безкінечності, розміщуватиметься в дальній фокусній

точці F_d , а у випадку, коли предмет буде знаходитись на деякій відстані a від лінзи, його зображення спостерігатиметься у ближній фокусній точці $F_{бл}$. Зображення проміжних предметів розташовуватимуться у межах відрізка $F_d F_{бл}$. Тобто формується зображення предметів, розміщених на відстані від a і до безкінечності.

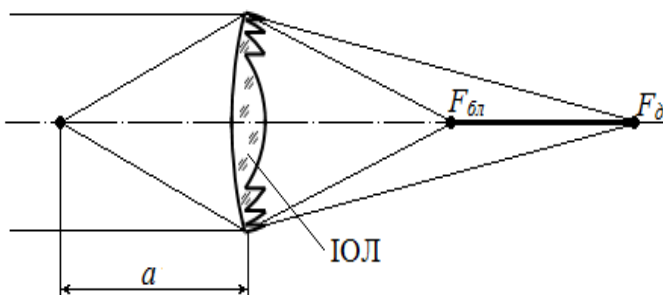


Рис. 10. Принцип проектування БПДЛ

Запропонований метод розрахунку БПДЛ як мультифокальних дає можливість проектувати біфокальні лінзи, розміри мікрорельєфу яких у порівнянні зі звичайними мультифокальними ДЛ значно збільшені, а тому є більш технологічними. Важливо, що

описані прості критерії вибору параметра фазової затримки p та номерів робочих порядків дифракції на основі заданої фокусної відстані. Використовуючи дані значення легко обчислюються конструктивні параметри лінз – радіуси зон та товщина мікрорельєфу. Розрахована біфокальна лінза,

імпортована в модель ока людини, здатна формувати зображення предметів, розміщених на відстані найкращого бачення ока людини 250 мм, та у нескінченності, що показує можливість використання її як ІОЛ.

Методом проектування БПДЛ ($p=6$) відповідно до її основної властивості виправлена хроматична аберація для набору довжин хвиль $\lambda_R = 0,630$ мкм, $\lambda_G = 0,525$ мкм, $\lambda_B = 0,450$ мкм. Для розрахованої лінзи у відрізьку довжиною 15 мм, кожна точка зображення містить 3 кольорові складові, що у сукупності формують кольорове зображення. Ці особливості можна використати для проектування ІОЛ для чіткого бачення пацієнтом предметів, розташованих на деякій відстані від спостерігача a і до нескінченності.

Четвертий розділ присвячено експериментальному дослідженню характеристик ДЛ – комп'ютерному та натурному.

Проведено моделювання оптичної системи з БПДЛ, в якій лінза була складовою частиною дифракційно-рефракційної ІОЛ в моделі ока, спроектованої в третьому розділі.

Таблиця 1
Параметри моделі ока

Коефіцієнт заломлення	Радіус, мм	Відстань між компонентами, мм
$n_1=1$	$R_1=7,7$	$d_1=0,5$
$n_2=1,3774$	$R_2=6,8$	$d_2=3,65$
$n_3=1,3774$	$R_3=\infty$	$d_3=0,7$
$n_4=1,5067$		$d_4=19$

Для моделювання було використано програму «ZEMAX». Оптична система складається із моделі ока, конструктивні параметри якої представлені в табл.1. Перша поверхня ІОЛ мала змінну кривизну. Застосовуючи положення дальньої фокусної точки $f_o = 82,27$ мм, за умови розміщення предмету в

нескінченності шляхом оптимізації визначалась кривизна рефракційної частини ДЛ, що становить $R_3 = 10,48$ мм. Використовуючи положення ближньої фокусної точки $f_{ol} = 68,56$ мм, визначено, що відстань до ближнього об'єкту складає приблизно 712 мм. У цьому випадку система «око + ІОЛ» забезпечує чітке зображення об'єктів, розміщених на відстані від 712 мм до нескінченності. Таким чином, дана лінза фокусуватиме зображення предметів, розташованих на відстані від 712 мм і до нескінченності у межах відрізьку $F_o F_{ol}$, величина відрізьку становить 13,7 мм. Результати дослідження показали доцільність використання для такої мети ДЛ.

Реальна ДЛ відрізняється від ідеальної моделі. Для того, щоб упевнитися в успішності проектування ДЛ не обов'язково одразу виготовляти її у вигляді оптичного елемента і проводити натурний експеримент. Натурний експеримент дозволить дослідити характеристики ДЛ, отримані в результаті взаємодії усіх етапів її виготовлення, включаючи і технологію. Для того, щоб оцінити вплив розв'язку оберненої задачі дифракції на характеристики розподілу інтенсивності випромінювання в фокальній площині, слід провести комп'ютерне моделювання спотворення мікрорельєфу, провести оцінку її оптичних характеристик та порівняти її із ідеальною ДЛ.

Методом, що запропонований у попередньому розділі, спроектовано дослідний зразок ДЛ з наступними конструктивними параметрами: фокусна відстань $f = 100$ мм, число стрибків фази $p = 10$, розрахункова довжина хвилі $\lambda_0 = 0,660$ мкм, світловий діаметр $D = 6,89$ мм, кількість дифракційних зон $q = 9$, максимальна глибина канавки $h_{\max} = 13,5$ мкм, матеріал ПММА. Були змодельовані і досліджені лінзи з основними типами похибок виготовлення, внесеними до ідеального профілю. Було реалізовано моделювання БПДЛ не за допомогою різного типу поверхонь, а із використанням твердотільної 3D моделі в програмі «ZEMAX». У програмі Компас-3D було побудовано тривимірну модель лінзи (рис. 11). Отриману модель у необхідному форматі імпортовано в програму «ZEMAX» і отримано основні оптичні характеристики ідеальної лінзи, такі як RMS радіус (середньоквадратичний радіус плями розсіювання) та МПФ (модуляційна передавальна функція).

Були змодельовані лінзи з основними типами похибок виготовлення.

На рис. 12, а) приведений мікрорельєф ідеальної БПДЛ, параметри якої приведені у попередньому пункті. Її розміри по вертикалі для наочності збільшено. Із наведених у першому розділі похибок, притаманних ДЛ, можна виділити наявність найбільш поширених похибок, зображених на рис.12. На рис. 12, б) показаний вигляд похибки нахилу вертикальної стінки. Рис. 12, в) демонструє вигляд похибки округлення.

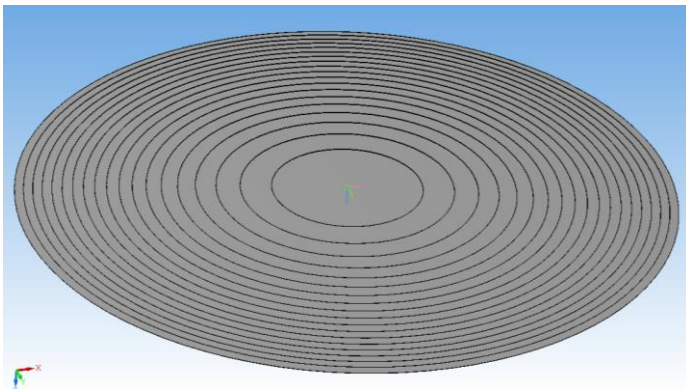


Рис. 11. Модель БПДЛ у програмі Компас

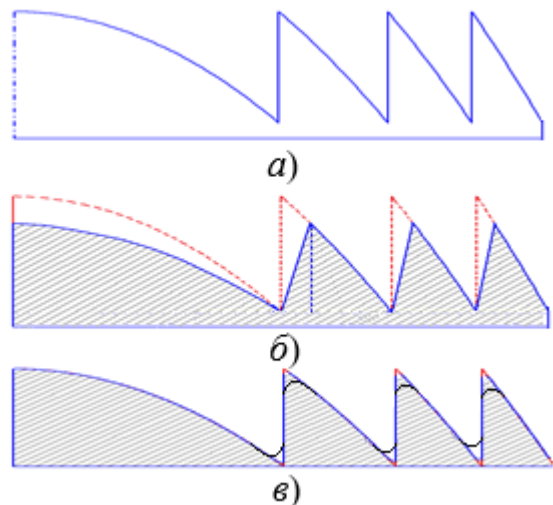


Рис.12 Мікрорельєфи БПДЛ

Було проведене моделювання у тривимірному просторі лінз із усіма вказаними видами похибок. Готові моделі були імпортовані в програму «ZEMAX» та проведена оцінка їх якості. Було проаналізовано 5 моделей ДЛ із похибками першого виду з кутом нахилу від 5° до 45° (рис. 13).

У результаті комп'ютерного дослідження виявилося, що RMS радіус (рис. 14) для усіх випадків зміни кута нахилу вертикальної стінки не змінювався, однак зі збільшенням кута зменшувалася дифракційна ефективність. Дифракційна ефективність оцінювалась шляхом розрахунку площ ефективних зон.

З'ясовано, що похибки в досліджуваних зразках не мали великого впливу на розмір RMS. Однак їх вплив на дифракційну ефективність не підлягає сумніву. Використовуючи такі моделі, можна також навмисно вносити технологічні похибки та оцінювати їх вплив на якість створюваного ними зображення. Таку процедуру можна зробити невід'ємною частиною вибору оптимальної технології для виготовлення лінз. Це дозволяє створювати довільні конструкції ДЛ та аналізувати створене ними зображення, не виготовляючи їх.

Зниження дифракційної ефективності спричинено наявністю в кожному порядку світла з неробочих порядків, що впливає із принципу роботи ДЛ. Як уже зазначалося, ДЕ також залежить від конструкції лінзи і від технології виготовлення. Для того, щоб визначити глибину і форму рельєфу поверхні в процесі виготовлення, не застосовуючи складні профілографи і атомно-силові мікроскопи, здійснюється вимірювання дифракційної ефективності в дифракційних порядках.

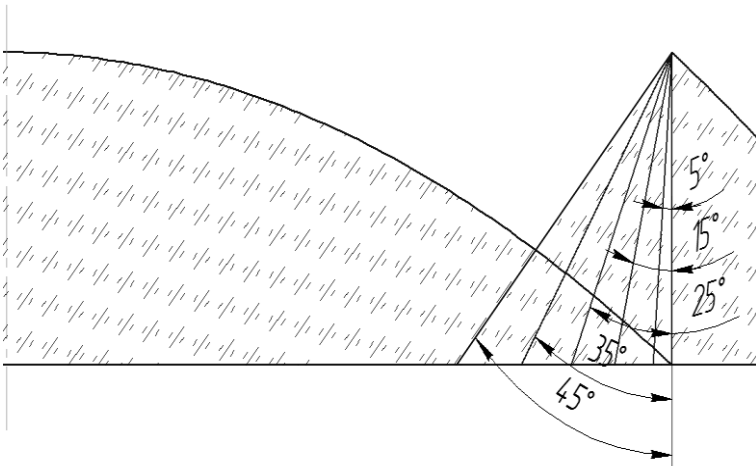


Рис. 13. Схема моделей БПДЛ

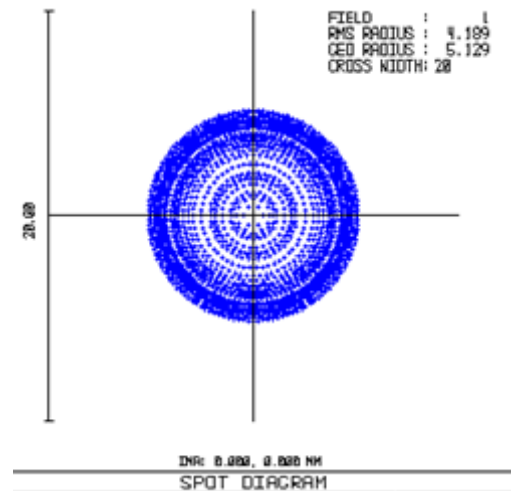


Рис. 14. RMS радіус БПДЛ

Для вимірювання ДЕ зазвичай використовують установку, реєструючим пристроєм в якій є фотоприймач. Його переміщують вздовж оптичної осі для послідовної фіксації інтенсивності дифрагованого світла у кожному дифракційному порядку окремо.

Зовнішній вигляд вимірювального стенда представлено на рис. 15. На вході коліматора 2 встановлено спеціальний освітлювач 1 із галогенною лампою, матовим склом та конденсором. Конденсор фокусує розсіяне матовим склом світло від галогенної лампи на входну діафрагму коліматора 2, розміщену у фокальній площині його об'єктива. Паралельний пучок світла, який виходить з коліматора, потрапляє на ДЛ 3, яка фокусує світло в плями на оптичній осі, що відповідають порядкам дифрагованого світла. Для спостереження зображення дифракційних порядків у збільшеному вигляді у світлі, що проходить, використовується мікроскоп 5. Зображення з об'єктива мікроскопа фіксується фотоприймачем 7. Для того, щоб виміряти інтенсивність зображення в одному з дифракційних порядків, необхідно закрити світло від інших порядків діафрагмою 6, яка розміщена впритул до фотоприймача 7. Фотоприймачем служить цифрова фотокамера Canon PowerShot A720 IS.



Рис. 15. Макет стану для вимірювання ДЕ (позиції 6,7 не показані)

На представленому станді були здійснені кілька серій знімків. На рис. 16 приведені результати вимірювання інтенсивності у найбільш ефективних дифракційних порядках +1, +3, +5, отриманих зі встановленням фільтра КС15. Результати для від'ємних дифракційних порядків не представлені, оскільки вони дублюють їх.

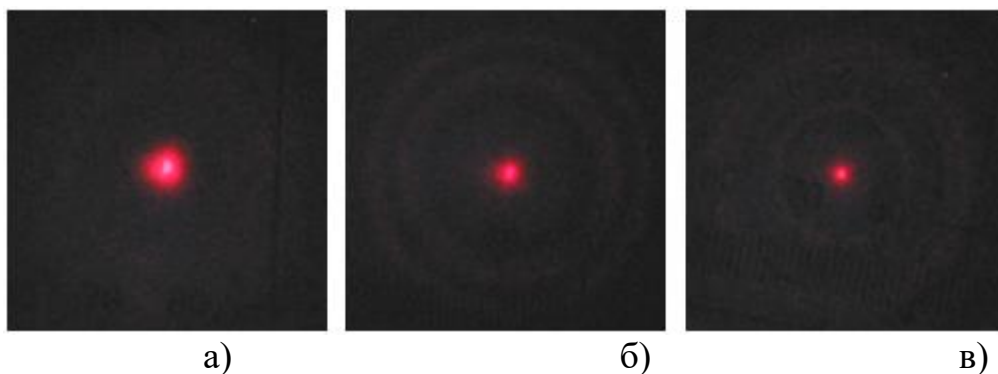
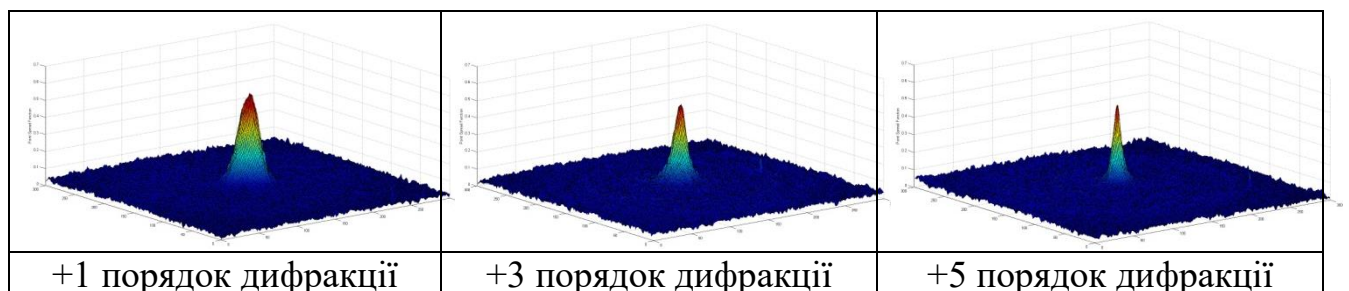


Рис. 16. Знімки розподілів інтенсивності в фокальних площинах ДЛ в порядках дифракції: а) +1-й; б) +3; в) +5

Проведена обробка отриманих знімків за допомогою програми «MatLab», в результаті якої побудовані функції розсіювання точок для кожного з дифракційних порядків (табл. 2).

Таблиця 2

Функції розсіювання точки для дифракційних порядків



У результаті проведених вимірювань були отримані експериментальні значення фокусних відстаней, які порівнювались із теоретично розрахованими значеннями (табл.3). Як видно, спостерігається достатнє узгодження чисельних та експериментальних результатів.

Таблиця 3

Порівняльні характеристики фокусів		
N	Фокусна відстань, мм	
	Експеримент	Чисельне моделювання
+1	$120,1 \pm 0,3$	120
+3	$40,3 \pm 0,3$	40
+5	$23,9 \pm 0,3$	24

На основі вимірюваних розподілів інтенсивності обчислені значення дифракційної ефективності в основних дифракційних порядках, які порівнювались із відомими теоретичними значеннями, характерними для такого типу дифракційних лінз. Таким чином, отримані значення дифракційної ефективності у головних порядках – складають 35,6%, 4,2% та 1,2%, що на 12%, 7% та 15% менше від теоретичних значень.

Як видно, дифракційна ефективність падає пропорційно квадрату номера локального фокуса. Оскільки радіус локальних фокусів також зменшується пропорційно номеру фокуса, інтенсивність в ньому наближається до значення інтенсивності в основному фокусі. Результати експериментальних даних в значній мірі підтверджують теоретичні розрахунки.

Проведене експериментальне дослідження дифракційної ефективності дворівневої фазової ДЛ показало достовірні результати, що свідчить про можливість використання запропонованого стенду для вимірювань такого роду.

У **додатках** приведені: програма розрахунку фазової функції ДЛ; уточнюючі математичні викладки; список публікацій здобувача за темою дисертації; акти впровадження результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача вдосконалення методів проектування дифракційних лінз шляхом проектування їх як багатопорядкових, що дозволяє покращити такі характеристики лінз, як акомодативну здатність та зменшення хроматичної аберації.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

1. Аналіз сучасного стану методів проектування ДЛ показав, що подальше їх удосконалення можливе за рахунок вирішення такої проблеми, як зменшення хроматичної аберації шляхом використання багатопорядкових ДЛ. Запропоновано та обґрунтовано вирішення цих проблем на основі

проектування ДЛ як багатопорядкових, а також як дифракційно-рефракційних із багатопорядковою дифракційною поверхнею.

2. У результаті теоретичного дослідження властивостей звичайних ДЛ встановлено залежності дифракційної ефективності і для БПДЛ. Таким чином, були отримані вирази для розрахунку ДЕ БПДЛ в залежності від параметрів спектрального діапазону роботи ДЛ, кута падіння світла на ДЛ, найменшого розміру канавки, нахилу вертикальної стінки та ін. Ці вирази дозволяють аналізувати та синтезувати ДЛ із заданими характеристиками.

3. Теоретично обґрунтовано та розроблено нові методи проектування ДЛ на основі використання багатопорядкових лінз:

- Ітераційний метод проектування біфокальних БПДЛ на основі вдосконалення алгоритму зменшення похибки Герчберга-Секстона обчислює фазову функцію ДЛ, яка створює два розподіли інтенсивностей, розміщених на різних відстанях з ефективністю відтворення 73% та середньоквадратичним відхиленням 11%.

- Метод проектування біфокальної БПДЛ дозволяє керувати енергією, що потрапляє у фокуси, сформовані різними дифракційними порядками, на відміну від звичайних ДЛ. Проектування за вказаним методом дозволяє контролювати кількість енергії у двох фокусах за допомогою коефіцієнта глибини мікрорельєфу.

- Метод проектування БПДЛ із безкінечною глибиною акомодатції оснований на властивості фокусувати світло різних спектральних діапазонів, необхідних для створення поліхроматичного зображення, у відрізок на оптичній осі. Комп'ютерне моделювання спроектованої БПДЛ, у поєднанні із рефракційною частиною, показує, що така система забезпечує фокусування зображення об'єктів, розміщених на відстані від 712 мм до нескінченності, у відрізок.

4. Розроблені та обґрунтовані алгоритми управління дифракційною ефективністю були використані в описаних методах проектування БПДЛ. Керування енергією можна здійснювати за допомогою параметрів глибини фазової модуляції, коефіцієнта глибини мікрорельєфу та шляхом вибору заданої довжини хвилі світла, що потрапляє в необхідні сусідні дифракційні порядки.

5. Обґрунтовано можливість використання дифракційно-рефракційних лінз з багатопорядковою дифракційною поверхнею як біфокальних інтраокулярних в офтальмології, що здатні створювати зображення предметів, розташованих на певній відстані від спостерігача і у нескінченності, а також мультифокальних інтраокулярних, що фокусують весь простір у відрізок на осі.

6. Розроблений метод комп'ютерного дослідження параметрів ДЛ із внесеними похибками дозволяє дослідити вплив технологій виробництва на якість зображення, створеного ДЛ. Запропонований метод і проведені експериментальні дослідження дифракційної ефективності бінарної ДЛ підтверджує математичне моделювання ДЕ бінарної лінзи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кучугура І. О. Розробка методу розрахунку дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – №5. – С.115-119. (Входить до WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем розроблено метод розрахунку дифракційних лінз із заданим коефіцієнтом пропускання, який дає змогу визначити конструктивні параметри дифракційних лінз та проведено аналіз розподілу інтенсивності, сформованої такою лінзою.

2. Кучугура І. О. Метод проектування фазових дифракційних ґраток / С. Т. Коваль, В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2013. – Вип. 46. – С.86 – 90 (Входить до Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE та інших).

Здобувачем запропоновано аналітичний метод проектування фазових дифракційних ґраток за заданим коефіцієнтом пропускання. Показано можливість керування розподілом вхідної енергії в заданій площині спостереження, а також дифракційною ефективністю ґратки.

3. Кучугура І. О. Метод оцінки модуляційної передавальної функції трифокальної інтраокулярної лінзи / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура, В. І. Микитенко, Є.А. Сірий // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №2. – С.99–102. (Входить до WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем досліджено контраст зображень, сформованих трифокальною інтраокулярною лінзою.

4. Кучугура І. О. Проектування багатопорядкових дифракційних лінз / В.Г. Колобродов, Є. О. Кучугура, І. О. Кучугура, // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – №2. – С.82–88. (Входить до WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus та інших).

Здобувачем проведено теоретичне дослідження властивостей багатопорядкових дифракційних лінз, в результаті якого було встановлено залежність розподілу енергії по порядкам дифракції від коефіцієнта товщини.

5. Кучугура І. О. Новий підхід до проектування інтраокулярних лінз / В. Г. Колобродов, Є. А. Сірий, І. О. Кучугура // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2015. – Вип. 49. – С.39 – 45. (Входить до Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE та інших).

Здобувачем обґрунтовано підхід до проектування мультифокальних інтраокулярних лінз із виправленою хроматичною аберацією на основі багатопорядкових дифракційних лінз.

6. Кучугура І. О. Проектирование многопорядковых интраокулярных линз / В. Г. Колобродов, И. О. Кучугура, Г. С. Тымчик // Приборы и методы измерений. – 2015. – №2. – С.204–210. (Закордонне видання, входить до Web of Science Core Collection, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ та інших).

Здобувачем встановлена здатність багатопорядкової дифракційної лінзи фокусувати поліхроматичне світло з високою дифракційною ефективністю у

відрізок, в кожній точці якого присутня складова кожного спектрального діапазону, які в комбінації будують кольорове зображення.

7. Кучугура І. О. Комп'ютерне проектування дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // VI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (23-24 квітня 2013). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 40.

Здобувачем запропоновано метод розв'язання нелінійного інтегрального рівняння Френеля для заданого одновимірного простору розподілу інтенсивності.

8. Кучугура І. О. Итерационный метод компьютерного проектирования дифракционных линз / В. Г. Колобродов, И. О. Кучугура // Новые направления развития приборостроения. Материалы 6-й Международной студенческой научно-технической конференции. Сборник тезисов докладов / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2013. – С.188. (Входить до WorldCat, OpenAIRE, Base та інших).

Здобувачем запропоновано метод вирішення нелінійного інтегрального рівняння Френеля для заданого двовимірного простору розподілу інтенсивності.

9. Кучугура І. О. Проектування багатопорядкових дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23-24 квітня 2014). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2014. – С. 60.

Здобувачем розроблено математичну модель впливу похибки виготовлення глибини мікрорельєфу багатопорядкової лінзи на її дифракційну ефективність.

10. Кучугура І. О. Особенности проектирования многопорядковых дифракционных линз / В. Г. Колобродов, И. О. Кучугура // Новые направления развития приборостроения. Материалы 7-й Международной студенческой научно-технической конференции. Сборник тезисов докладов / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2014. – С.156. (Входить до WorldCat, OpenAIRE, Base та інших).

Здобувачем проведено моделювання багатопорядкової дифракційної лінзи та досліджена дифракційна ефективність в залежності від точності виготовлення її мікрорельєфу.

11. Кучугура І. О. Корекція монохроматичних аберацій інфрачервоних оптичних систем дифракційними лінзами / І. О. Кучугура, В. Г. Колобродов // Українська науково-технічна конференція «Аерокосмічне приладобудування»: (10-11 грудня 2014). Збірник тез доповідей / КП СІБ «Арсенал». – Київ, 2014. – С. 81.

Здобувачем здійснено розрахунок хроматичної аберації оптичної системи з дифракційними лінзами.

12. Kuchugura I. O. Method of bifocal Diffractive Lenses Designing / I. O. Kuchugura, V. G. Kolobrodov, Ie. A. Siryi // 15th International Young

Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2014 (October 23-26, 2014). Scientific Works / TSNUK. – Kyiv, 2014. – P.186.

Здобувачем запропоновано метод проектування біфокальної дифракційної лінзи як багатопорядкової та проведена оцінка якості змодельованої лінзи.

13. Кучугура І. О. Інтраокулярна лінза із виправленою хроматичною аберацією / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2015). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 73.

Здобувачем запропоновано удосконалення дифракційної частини лінзи шляхом нанесення багатопорядкової лінзи замість традиційної дифракційної.

14. Кучугура І. О. Інтраокулярные линзы с бесконечной аккомодацией / И. О. Кучугура // Новые направления развития приборостроения. Материалы 8-й Международной студенческой научно-технической конференции. Сборник тезисов докладов/БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2015. – С.248. (Входить до WorldCat, OpenAIRE, Base та інших).

Здобувачем проведено дослідження властивостей багатопорядкових лінз та виявлена властивість так званої безкінечної акомодатії.

15. Кучугура І. О. Комп'ютерне моделювання багатопорядкових дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2016). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2016. – С. 82.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання багатопорядкової дифракційної лінзи та проаналізовані її оптичні характеристики.

16. Кучугура І. О. Метод оцінки дифракційної ефективності багатопорядкових дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (16-17 травня 2017). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2017. – С. 48.

Здобувачем проведено дослідження впливу похибки нахилу вертикальної стінки на ефективності дифракційної лінзи.

17. Васильковська І. О. Розрахунок хроматичної аберації дифракційно-рефракційної лінзи з багатопорядковим мікрорельєфом / І. О. Васильковська // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (15-16 травня 2018). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 40.

Здобувачем запропоновано спосіб розрахунку хроматичної аберації багатопорядкової дифракційної лінзи.

АНОТАЦІЯ

Васильковська І.О. Удосконалення методів проектування дифракційних лінз. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробці нових та вдосконаленню наявних методів проектування дифракційних лінз на основі проектування їх як багатопорядкових для зменшення хроматичної аберації та покращення акомодативної здатності дифракційних лінз.

На основі дослідження властивостей багатопорядкових дифракційних лінз встановлено залежності інтенсивності зображення, сформованого такою лінзою, від конструктивних параметрів лінзи, що дозволяють направляти необхідну кількість падаючої енергії в потрібні дифракційні порядки. Обґрунтовано та розроблено нові методи проектування на основі використання багатопорядкових лінз для зменшення хроматичної аберації та покращення акомодативної здатності. Встановлено, що використання багатопорядкових дифракційних лінз у комбінації з рефракційною частиною можна використовувати в офтальмології як штучний кришталік ока.

Розроблено інженерні методи розрахунку мікрорельєфу дифракційно-рефракційних інтраокулярних лінз, які можуть бути використані в офтальмології. Удосконалено метод розрахунку багатопорядкових дифракційних лінз, що дозволяє зменшити їх хроматичні аберації. Розроблено метод і експериментальний стенд для дослідження дифракційної ефективності бінарної лінзи.

Ключові слова: методи проектування дифракційних лінз, багатопорядкова дифракційна лінза, дифракційна ефективність, інтраокулярна лінза.

АННОТАЦИЯ

Васильковская И.О. Усовершенствование методов проектирования дифракционных линз. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 «Оптические приборы и системы». – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке новых и усовершенствованию существующих методов проектирования дифракционных линз на основании проектирования их как многопорядковых для уменьшения хроматической аберрации и улучшения аккомодационной способности дифракционных линз.

Основываясь на исследованиях свойств многопорядковых дифракционных линз, установлены зависимости интенсивности изображения,

сформированной такой линзой, от конструктивных параметров линзы, которые позволяют направлять необходимое количество падающей энергии в необходимые дифракционные порядки. Обоснованы и разработаны новые методы проектирования на основе использования многопорядковых линз для уменьшения хроматической аберрации и улучшения аккомодационной способности. Установлено, что использование многопорядковых дифракционных линз в сочетании с рефракционной частью можно использовать в офтальмологии как искусственный хрусталик глаза.

Разработаны инженерные методы расчета микрорельефа дифракционно-рефракционной интраокулярной линзы, которые могут быть использованы в офтальмологии. Усовершенствован метод расчета многопорядковых дифракционных линз, который позволяет уменьшить их хроматические аберрации. Разработан метод и экспериментальный стенд для исследования дифракционной эффективности бинарной линзы.

Ключевые слова: методы проектирования дифракционных линз, многопорядковая дифракционная линза, дифракционная эффективность, интраокулярная линза.

ABSTRACT

Vasylykovska I.O. Improvement of designing methods of diffractive lenses. Qualification scientific work is manuscript copyright.

Thesis for the *scientific degree of Candidate* of technical sciences in specialty 05.11.07 "Optical devices and systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES, Kyiv, 2019.

The diffractive lens (DL) is one of the main types of diffractive optical elements (DOEs), which are used in the formation and measurement of the wave front, in optical communication, in the optical recording of information, in optical scanners, in ophthalmology and other fields of science and technology. DL has unique focusing and aberration properties. By their functions, they can partially or completely replace the refractive optics. The main advantages of DL before refractive lenses are their compact size and small weight.

The current state of use in the instrumentation of diffractive elements and diffractive lenses, in particular, is considered. It has been shown that the most widespread area of effective use of diffractive lenses is ophthalmology, in which on the basis of diffractive lenses are created intraocular lenses (IOLs) to replace the natural lens of the eye. It is shown the improvement of the multiorder diffractive lenses (MODLs) is relevant at this stage of development by studying their basic properties and studying the characteristics.

A systematic analysis of DL shapes has been carried out and substantiated their aberration and focal properties, as well as mass-dimensional characteristics, that makes them indispensable optical elements. DLs have special aberration properties – they are significantly dependent on the wavelength and have a negative dispersion, therefore, it is important to conduct a study of the design of a polychromatic DL image.

It is shown that the most important task in the formation of diffractive lenses is to achieve high diffraction efficiency in working diffraction orders, which is determined by the depth and shape of the microrelief on the surface of the DL.

The process of forming an image of DL in different diffraction orders during the passage of polychromatic light was investigated. The influence of individual spectral ranges according to the diffraction order of its formation is established. It is shown that the use of several diffractive orders is much more effective than one or two diffractive orders when forming a polychromatic image.

The influence of the main types of manufacturing errors of DL on the diffractive efficiency of lenses is evaluated. It is investigate the dependence of the most important characteristic of diffractive lenses – diffraction efficiency on the following parameters: the spectral range of the DL, the change of the angle of incidence of incident light and the manufacturing errors of DL.

The diffraction method of calculating DL for the formation of a given intensity distribution in a plane that is perpendicular to the optical axis and is located at a given distance from the element is improved. The method consists in solving the inverse problem of diffraction of light to determine the phase function by using the improved Gerchberg-Sexton error reduction algorithm. The proposed method calculates the DL phase function, which forms the necessary intensity distributions. The method allows to simplify the cumbersome calculations of the Fresnel transform using the built-in functions of the MathCad package.

The method of calculating DL with a given transmittance coefficient for determining the position of the lens focal length and its diameter, as well as the calculation of the intensity which a lens creates in a given plane of observation, is developed. The method consists of sequentially computing the given field amplitude in the center of the diffraction pattern in accordance with the Fresnel diffraction theory and the intensity along the optical axis. The study of the received intensity distribution is determined that for such a DL the position of focal points depends on number of bands and focus number. It is shown that the proposed approach to the design of DL can also be applied to the design of phase diffraction gratings, for example, according to a given complex phase coefficient, the calculation of which is carried out on the basis of the Fraunhofer diffraction theory.

The method of designing the MODL has been developed, the main idea of which is that, unlike multifocal lenses, which are projected for 0 and 1 order of diffraction, a multi-order lens is designed for neighboring diffraction patterns other than 0 and 1. The proposed method allows you to design a bifocal lens with the possibility to manage energy in focal points using the microrelief thickness factor.

The basis of the design method of the MODL with the infinite depth of accommodation is the ability to focus all incident light in the segment on the optical axis with high intensity. The proposed method of calculating MODL as multifocal gives the possibility to design bifocal lenses, the microrelief sizes of which are considerably increased compared to conventional multifocal DLs, and therefore they are more technological. The simple criteria for choosing the phase delay parameter and the numbers of the effective diffraction orders on the basis of the given focal

length are described, which allows to calculate the design parameters of the lenses. The bifocal lens, imported by the human eye model, calculated by the above method, can form images of objects located at the distance of the best vision of the human eye and infinite, which shows the possibility of using it as an IOL.

An experimental study of the characteristics of diffractive lenses is carried out.

The modeling of the optical system with MODL was carried out, in which the lens was an integral part of the diffractive-refractive IOL in the model of the eye. The results of the study of the system optical characteristics have shown the feasibility of using DL for this purpose.

The lenses with the main types of manufacturing errors introduced into the ideal profile were simulated. As a result of the computer research of the optical characteristics of the models in the ZEMAX software, it was established that the RMS radius for all cases of the angle of inclination of the vertical wall was almost unchanged, but with increasing angle the diffraction efficiency was reduced.

At the experimental stand were performed several series of measurements of intensity distributions, created by the investigated binary DL. On the basis of the obtained data, corresponding distributions of intensity were constructed in the most effective diffraction orders. It is established that the calculated values of diffraction efficiency are sufficiently consistent with the theoretical values, which gives grounds to use an experimental stand for measuring diffraction efficiency.

Keywords: designing methods of diffractive lenses, multiorder diffractive lens, diffraction efficiency, intraocular lens.