

УДК 535.42

НОВИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ ІНТРАОКУЛЯРНИХ ЛІНЗ

Колобродов В. Г., Кучугура І. О., Сірий Є. А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна

Стаття присвячена теоретичному обґрунтуванню нового підходу до проектування мультифокальних інтраокулярних лінз (ІОЛ) із виправленою хроматичною аберацією. Запропоновано взяти за основу проектування не традиційні дифракційні лінзи, а багатопорядкові (БПДЛ), у яких частково скомпенсовані хроматичні аберації. Показано, що для уникнення паразитного кольорового ореолу навколо сфокусованого зображення розрахунковий параметр p підбирається таким чином, щоб у кожній точці зображення були присутні три дифракційно ефективні кольорові складові – червона, зелена та синя. Досліджено, що БПДЛ мають характерну особливість – безкінечну акомодацию, тобто здатність формувати зображення предметів, розміщених на деякій відстані а від спостерігача і до безкінечності. На основі запропонованого методу спроектовано ІОЛ, яка забезпечує формування зображення на відстані від 700 мм до безкінечності.

Ключові слова: багатопорядкова мультифокальна.

Вступ

Сьогодні дифракційні лінзи (ДЛ) широко використовуються як мультифокальні інтраокулярні лінзи (ІОЛ) [1-3]. Зазвичай, дифракційні ІОЛ для створення поліхроматичного зображення об'єкта, розташованого на певній відстані, використовують один дифракційний порядок. Основним недоліком таких лінз є значний хроматизм. У той же час існують так звані багатопорядкові ДЛ (БПДЛ), що використовують одночасно кілька дифракційних порядків та здатні створювати ахроматичні зображення у широкому спектральному діапазоні [3-4].

Постановка задачі

Метою даної статті є теоретичне обґрунтування нового підходу до проектування багатопорядкових мультифокальних інтраокулярних лінз із виправленою хроматичною аберацією.

Багатопорядкова дифракційна лінза складається із концентричних зон Френеля. Радіуси зон визначають із розв'язку рівняння $\varphi(r_j) = 2\pi r_j$, де $\varphi(r_j)$ представляє фазову функцію ДЛ, де j – номер зони. Ширина кожної зони проектується за умови забезпечення зміни фази хвильового фронту на межі кожної зони на $2\pi i$, де $i = 1, \dots, p$.

Фокусна відстань залежить від властивостей матеріалу, з якого виготовляють лінзу, а також від положення та періоду зон Френеля. БПДЛ має безкінечну кількість фокусних відстаней f_N , які розраховуються за формулою

$$f_N = \frac{pf_0\lambda_0}{N\lambda}, \quad (1)$$

де f_0 – фокусна відстань для розрахункової довжини хвилі λ_0 ; N – робочий порядок дифракції; $\lambda \neq \lambda_0$; p – розрахунковий параметр.

Із рівняння (1) слідує, що фокусна відстань пропорційна p і обернено пропорційна до довжини падаючої хвилі та дифракційного порядку N . Коли відношення $\frac{p\lambda_0}{N\lambda}$ дорівнює 1, то одразу декілька довжин хвиль із заданого діапазону можуть приходити в спільну точку, тобто є можливість сформувати високоякісне зображення для декількох довжин хвиль.

Дифракційна ефективність БПДЛ для N -го порядку дифракції в фокальних точках має вигляд [5]

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

де α – параметр, який визначається як доля фазової затримки 2π для довжин хвиль, відмінних від розрахункової $\lambda \neq \lambda_0$, задається виразом $\alpha = \frac{\lambda_0[n(\lambda) - 1]}{\lambda[n(\lambda_0) - 1]}$,

де $n(\lambda)$ – показник заломлення лінзи; μ – коефіцієнт товщини мікрорельєфу, що розраховується за формулою $\mu = \frac{t'}{t}$, де t' і t – реальна і розрахункова товщини профілю відповідно.

Залежність дифракційної ефективності від довжини хвилі $\eta(\lambda)$, коли параметр $p=6$, $N = \{5,6,7\}$ показана на рис. 1 в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,4...0,7$ мкм.

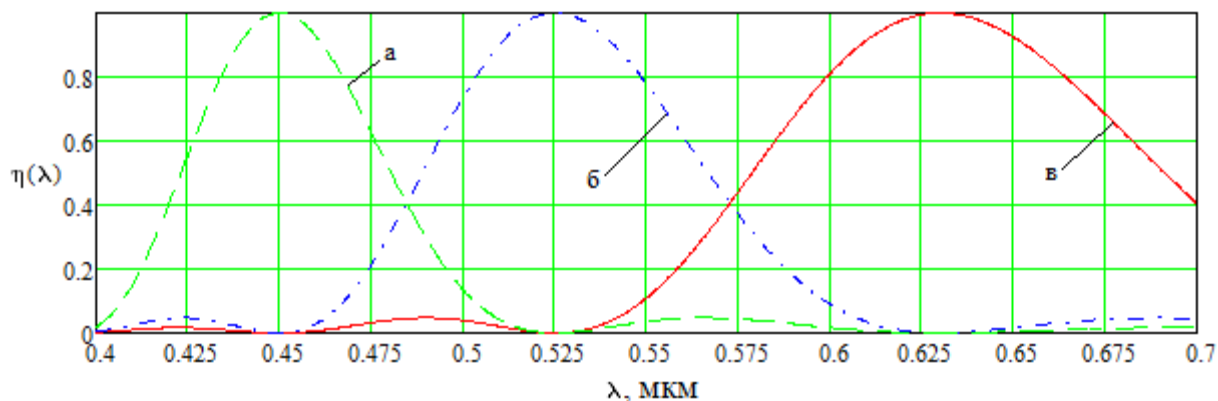


Рис. 1. Залежність дифракційної ефективності від довжини хвилі λ , де: а) $N = 7$, б) $N = 6$, в) $N = 5$

У наступному пункті показано, яким чином багатопорядковою лінзою формується поліхроматичне зображення.

Дослідження формування поліхроматичного зображення

Із рис. 1 видно, що для певних довжин хвиль із заданого спектрального діапазону лінза створює високоефективне зображення (дифракційна ефективність становить 100%). Згідно із властивістю БПДЛ величини відповідних довжин

хвиль були отримані з формули (1) для заданої фокусної відстані $f_N = 74,8$ мкм, при умові що $f_N = f_0$ для розрахункової довжини хвилі $\lambda_0 = 0,525$ мкм. У результаті був отриманий набір довжин хвиль для різних дифракційних порядків N : для 5-го порядку $\lambda_5 = 0,63$ мкм; для 6-го – $\lambda_6 = 0,525$ мкм; для 7-го – $\lambda_7 = 0,45$ мкм.

Як видно із рис. 1, задана лінза для певних довжин хвиль здатна працювати як біфокальна (дифракційна ефективність у кожному порядку складає по 40,5%), при чому її хроматизм, у порівнянні зі звичайною ДЛ, значно менший. Довжини хвиль отримані із формули (2) та визначаються за формулою

$$\lambda = \frac{2\lambda_0 \mu p}{N_n + N_{n+1}}, \quad (3)$$

де N_n, N_{n+1} – номери сусідніх порядків.

За формулами (1), (3) розрахуємо довжини хвиль та місце розміщення відповідних фокусних точок (табл. 1).

Таблиця 1. Розміщення точок фокусування відповідно до довжини хвилі

Довжина хвилі, мкм	0,485	0,573
Ближня фокусна точка, мм	69,452	65,561
Дальня фокусна точка, мм	81,027	82,274

Було детально проаналізовано поведінку світла з іншими довжинами хвиль при проходженні через лінзу такого типу. Спектральний діапазон був розділений на умовні відрізки, що відповідають наступним спектрам світла:

- а. синій $\lambda_c = 0,420 \dots 0,485$ мкм;
- б. зелений $\lambda_z = 0,485 \dots 0,573$ мкм;
- в. червоний $\lambda_q = 0,573 \dots 0,700$ мкм.

Незалежно від номера порядку дифракції світло із довжиною хвилі з кожного діапазону фокусується у відрізки на оптичній осі, які накладаються і мають спільну частину (рис. 2).

Для виявлення того, яким чином світло із заданих діапазонів розподіляється вздовж оптичної осі, на основі поєднання рисунків 1 та 2, було побудовано рисунок 3, який дає пояснення з якою ефективністю світло кожного діапазону фокусується на прямій уздовж оптичної осі. Для наочності було проаналізовано світло з ефективністю більше 40%.

Як показали дослідження, розрахована БПДЛ фокусує біле світло у відрізок довжиною ≈ 15 мм з високою ефективністю. У кожній точці на відрізку присутня складова кожного спектрального діапазону. Підсумовуючи викладені у цьому пункті міркування, варто зазначити, що у БПДЛ хроматична аберация може бути скоректована для певного набору довжин хвиль.

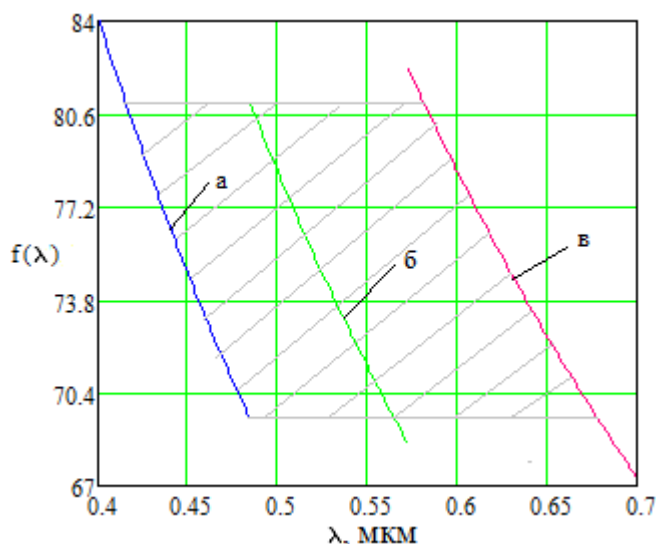


Рис. 2. Залежність фокусної відстані від довжини хвилі, де: а) синій діапазон; б) зелений діапазон; в) червоний діапазон; область перекривання заштрихована

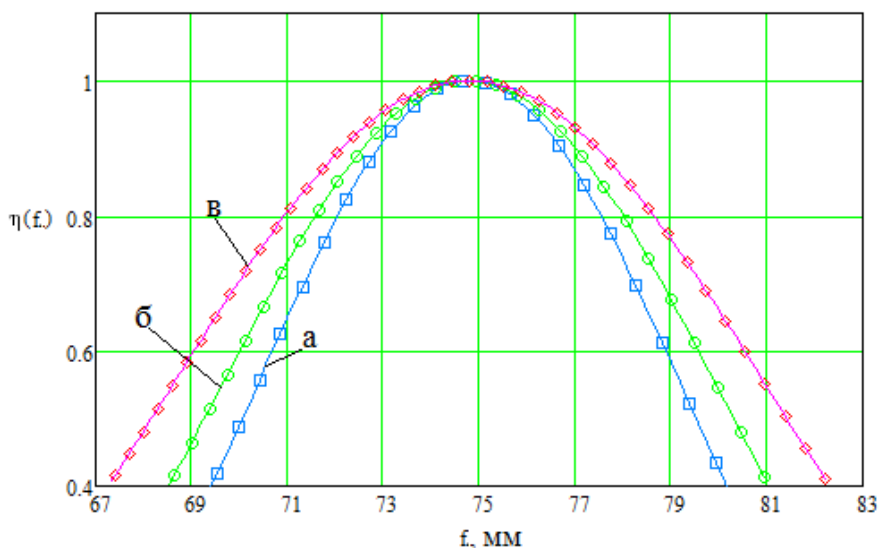


Рис. 3. Розподіл світла заданих спектральних діапазонів вздовж оптичної осі, де: а) синій; б) зелений; в) червоний

До того ж, як видно з рис.3, кожна точка відрізка сформованого зображення на оптичній осі має три кольорові складові – червону, зелену та синю, проте різної ефективності. Ця властивість може бути використана при проектуванні інтраокулярних лінз для заміщення природного кришталіка ока людини. Річ у тім, що при наявності хроматичної аберації людина з імплантованою лінзою бачитиме кольоровий ореол навколо зображення, а проектування лінзи як БПДЛ коректує цю аберацию.

Загальновідомо, що кольорове зображення можна утворити комбінацією трьох базових кольорів – спостерігається адитивна кольорова RGB-модель (від англ. Red – червоний, Green – зелений, Blue – синій). Тобто, ДЛ, спроектована для трьох довжин хвиль, наприклад, $\lambda_R = 0,630$ мкм, $\lambda_G = 0,525$ мкм,

$\lambda_B = 0,450$ мкм, будуватиме якісне кольорове зображення, яке буде зосереджуватись не в площині фокусної точки, а у відріжку на осі.

Варто зазначити, що звичайні ДЛ мають малу оптичну силу, що обумовлює значний хроматизм. БПДЛ, у свою чергу, можуть мати більшу оптичну силу. Дослідивши властивості БПДЛ, було виявлено, що окрім формування якісної кольорової картинки, такі лінзи мають також і безкінечну акомодацию. БПДЛ фокусують світло у відрізок, обмежений двома фокусними точками - ближньою F_{bl} та дальньою F_d (рис. 4; табл.1). Принцип проектування таких лінз полягає в тому, що зображення предмета у безкінечності, розмішуватиметься 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_{bl} . Зображення проміжних предметів розташовуватимуться у межах відріжку $F_d F_{bl}$. Тобто формується зображення предметів, розміщених на відстані від a і до безкінечності. У наступному пункті приведений приклад розрахунку такої БПДЛ.

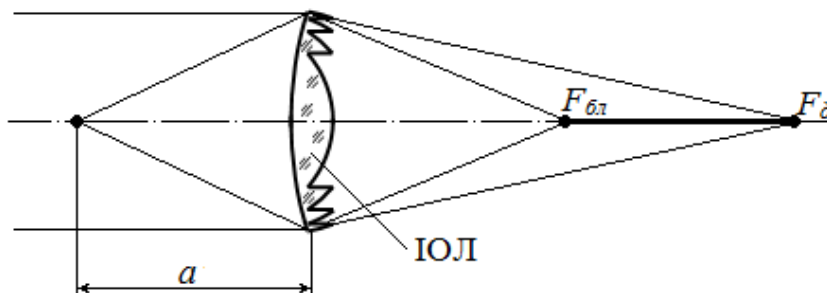


Рис. 4. Принцип проектування БПДЛ

Таблиця 2. Параметри моделі ока із дифракційною лінзою

Коефіцієнт заломлення	Радіус, мм	Відстань між компонентами, мм
$n_1 = 1$	$R_1 = 7,7$	$d_1 = 0,5$
$n_2 = 1,38$	$R_2 = 6,8$	$d_2 = 3,1$
$n_3 = 1,34$	$R_3 = 10,91$	$d_3 = 3,6$
$n_4 = 1,49$	$R_4 = \infty$	$d_4 = 15$

Метод проектування

На основі наведених вище міркувань запропоновано метод, яким було спроектовано БПДЛ із такими параметрами: фокусна відстань у повітрі $f=100$ мм, $p=6$, матеріал ПММА, розрахункова довжина хвилі $\lambda_0 = 0,525$ мкм. У межах світлового діаметру $D = 7$ мм розміщується 19 дифракційних зон, а максимальна глибина канавки складає 6 мкм. За основу для проектування ІОЛ було взято рефракційно-дифракційну ІОЛ, перша поверхня якої є сферичною, а на другу, плоску, нанесений рельєф розрахованої БПДЛ. Спроектовану гібридну ІОЛ бу-

ло поміщено у схематичну модель ока людини за Гульєстрандом [6] на місце природного кришталіка (рис. 5).

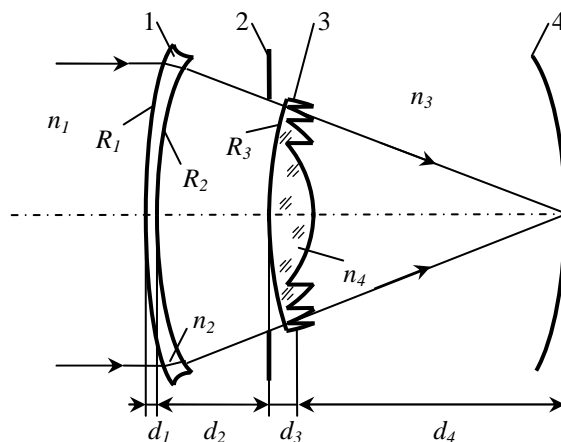


Рис. 5. Схематична модель ока, де: 1 – рогівка; 2 – зіниця; 3 – дифракційна лінза; 4 – сітківка

Моделювання здійснювалося у програмі Zemax. Відповідно до пояснення з попереднього пункту, із використанням положення дальньої фокусної точки F_d , взятої із табл.1, за умови розміщення предмету в безкінечності визначалась кривизна рефракційної частини ДЛ ($R_3 = 10,91$ мм). Використовуючи положення ближньої фокусної точки F_{bl} , визначено, відстань до ближнього об'єкту складає ≈ 700 мм. Таким чином, система «око + ІОЛ» забезпечує чітке зображення об'єктів, розміщених на відстані від 700 мм до безкінечності.

Висновки

Використання БПДЛ як інтраокулярних дозволяє частково компенсувати хроматичні аберації, які проявляються у вигляді паразитного кольорового ореолу навколо сфокусованого зображення. У результаті дослідження визначено, що БПДЛ фокусує біле світло у відрізок на оптичній осі. Розрахунковий параметр p можна підібрати таким чином, щоб у кожній точці відрізка були присутні три складові – червона, зелена та синя. Був запропонований метод проектування і розроблена методика для розрахунку ІОЛ з нескінченною глибиною акомодатії, що забезпечує різке бачення предметів, розташованих на деякій відстані a від спостерігача і до безкінечності. Метою подальших досліджень є абераційний аналіз лінз такого типу.

Література

1. Lenkova G. A. Chromatic Aberrations of Diffractive-Refractive Intraocular Lenses in an Eye Model / G.A. Lenkova // Optoelectr., Instrum. Data Process. – 2009. – Vol. 45, No. 2. – P. 171 – 183.
2. Vega F. Energy Efficiency Of A New Trifocal Intraocular Lens / F. Vega, F. Alba-Bueno, M. S. Millan // Journal Of The European Optical Society — Rapid Publications. – 2014. – Vol. 9. – P. 140021 – 140028.

3. Колобродов В. Г. Проективання дифракційних оптичних елементів і систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 196 с.
4. Lou D. Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum / D. Lou, J. Bai, X. Hou, G. Yang // Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II. – 2005. – Vol. 5636. – P. 78 – 85.
5. Reichelt S. Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays / S. Reichelt, H. Sahm, N. Leister, A. Schwerdtner // Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications. – 2008. – Vol. 6912. – P. 69120 – 69130.
6. Сокурєнко В. М. Око людини та офтальмологічні прилади: навч. посіб. / В. М. Сокурєнко, Г. С. Тимчик, І. Г. Чиж. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – 264 с.

*Надійшла до редакції
20 лютого 2015 року*

© Колобродов В. Г., Кучугура І. О., Сірий Є. А., 2015

УДК 621.384.3

ВЫБОР ЭКСПОЗИЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОАППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Колобродов В. Г., Пивторак Д. А.

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
г. Киев, Украина
E-mail: p_diana@i.ua*

Для снижения информационных потерь при фотосъемке в условиях большого интервала яркости в пределах кадра, используются мультипликативный, аддитивный и комбинированный способы регистрации изображений.

При комбинированном способе регистрации изображений проводится экспонирование светочувствительного сенсора через заранее построенную частотно избирательную фильтр-маску оптического изображения объекта фотографирования и изображения экрана равномерной яркости.

Получено выражение, позволяющее определить значения регулирующих экспозицию параметров, обеспечивающих получение изображения с заданной интегральной экспозицией кадра, учитывающее яркостные характеристики объекта фотографирования, экрана и характеристики маски. Выражение может быть положено в основу работу экспонометрической системы с локальным управлением экспозиции в фотоаппаратах, использующих комбинированный способ регистрации изображений.

Ключевые слова: *изображение, экспозиция, динамический диапазон.*

Введение

Для снижения потерь информации, вызванных несоответствием динамического диапазона входного сигнала (интервала яркости объектов фотографирования) динамическому диапазону регистратора изображения, в современных фотокамерах широко используется предварительная пространственно-частотная фильтрация оптического сигнала. Функции простейших фильтров обычно выполняют экспонометрические устройства, обеспечивающие подавление низких пространственных частот изображения, в основном не несущих по-