

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 535.42

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

МЕТОД ОЦІНКИ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ ТРИФОКАЛЬНОЇ ІНТРАОКУЛЯРНОЇ ЛІНЗИ

The article investigates the quality of images formed by multifocal optical elements. The method for calculating of multifocal diffractive lens modulation transfer function (MTF) at presence of background is proposed. The method is based on a geometric calculation of the intensity of background images and the diffraction efficiency of the main image in each focal plane is considered. The article has studied the contrast of main images formed by trifocal intraocular lens (IOL). Based on the proposed models of uniform and non-uniform background intensity distributions MTF of given IOL are calculated in each focal plane. It is shown that the main image diffraction efficiency determines a decrease in its contrast at low spatial frequencies with uniform and non-uniform backgrounds. The MTF dependence on the type and background position is analyzed and found that in the case of non-uniform background the main image contrast is slightly higher than for a uniform.

Keywords: multifocal diffractive lens, modulation transfer function..

Вступ

У наш час дифракційні оптичні елементи (ДОЕ) широко використовуються при проектуванні різноманітних оптичних систем. Сучасні алгоритми розрахунку і методи виготовлення дифракційної оптики уможливають створення ДОЕ з різноманітними функціями пропускання, що дає змогу сформувати довільний хвильовий фронт [1–3].

Особливу увагу привертає такий тип ДОЕ, як дифракційна лінза (ДЛ), яка здатна виконувати функції традиційної лінзи. ДЛ характеризується незначними габаритами і масою, відносно простим виготовленням і низькою собівартістю [2]. Завдяки своїм унікальним оптичним характеристикам ДЛ успішно використовуються при створенні ахроматичних, атермічних, мультифокальних та інших оптичних систем, здатних створювати зображення [2–4]. Однією зі сфер застосування ДЛ є офтальмологія, де використання ДЛ як компоненти інтраокулярної лінзи (ІОЛ) забезпечує останню мультифокальністю.

У дійсній статті розглянута трифокальна ІОЛ, що забезпечує різке бачення об'єктів, розміщених на трьох фіксованих відстанях [4]. Недоліком такої лінзи є наявність фонового зображення, що призводить до пониження контрасту головного зображення [5, 6]. Тому при проектуванні мультифокальних ІОЛ завжди актуально проводити оцінку якості головного зображення, що кількісно виконується через обчислення модуляційної передавальної функції (МПФ).

Постановка задачі

Метою роботи є розроблення методу розрахунку МПФ трифокальної ІОЛ за наявності фонового зображення.

Оцінка контрасту зображення, створеного дифракційною трифокальною ІОЛ

Розглянемо дифракційну ІОЛ (рис. 1), що має три фокуси, зміщені відносно центрального фокуса $f_0 = 22,6$ мм на ± 2 дптр [4]. Діаметр лінзи $D = 7$ мм, дифракційна ефективність для світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,555$ мкм у кожному фокусі становить 30%. Очевидно, що в кожній фокальній площині F_1 , F_0 , F_2 , крім головного, буде створюватися фонове зображення, в результаті чого понижується контраст головного зображення [5, 6]. Проведемо оцінку контрасту зображення такої лінзи без урахування аберацій і додаткового фону із сумарною ефективністю 10%.

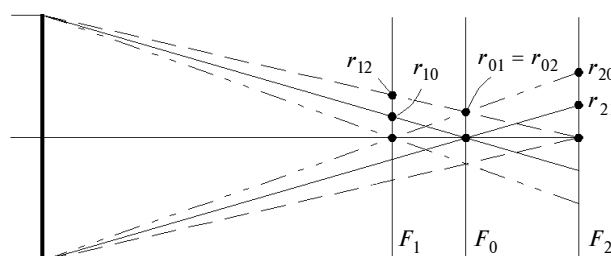


Рис. 1. Формування зображення трифокальною ІОЛ

Як відомо, оцінка контрасту зображення зводиться до розрахунку МПФ, яка в полярній

системі координат є модулем перетворення Фур'є–Бесселя від функції розподілу інтенсивності в зображенні нескінченно віддаленого об'єкта $I(r_0)$ [7]:

$$M(v) = 2\pi \left| \int_0^\infty I(r_0) J_0(2\pi r_0 v) r_0 dr_0 \right|, \quad (1)$$

де v_r – просторова частота; r_0 – радіальна координата в площині зображення. Згідно зі схемою формування зображення трифокальною ІОЛ (див. рис. 1), розподіл інтенсивності в i -й фокальній площині є сумою інтенсивностей головного $I_i(r_0)$ і фонового $I_{BG}(r_0)$ зображень, що можна записати як $I(r_0) = I_i(r_0) + I_{BG}(r_0)$ (рис. 2).

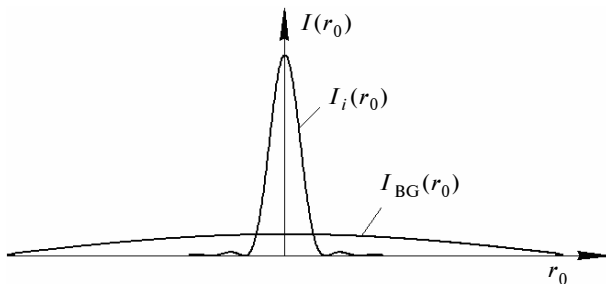


Рис. 2. Розподіл інтенсивності світла в i -й фокальній площині мультифокальної ІОЛ

Виходячи з міркувань, що в кожній фокальній площині трифокальна ІОЛ будує головне зображення подібно до тонкої лінзи, для якої зображення нескінченно віддаленого об'єкта є функцією розсіювання точки (ФРТ), то інтенсивність головного зображення в i -й фокальній площині можна описати виразом ФРТ тонкої лінзи [7]:

$$I_i(r_0) = \left(\frac{R}{r_0} \right)^2 J_1^2 \left(\frac{2\pi r_0 R}{\lambda f_i} \right), \quad (2)$$

де R – світловий радіус ІОЛ; λ – довжина хвилі світла, що освітлює лінзу; f_i – фокусна відстань ІОЛ для i -ї фокальної площини.

Фонове зображення в i -й фокальній площині є сумою фонових зображень від сусідніх фокальних площин (див. рис. 1). Наприклад, головне зображення в площині F_1 , отримане фокусуванням лінзою світла саме в цю площину, спостерігається на фоні розмитих зображень від фокальних площин F_0 і F_2 . Радіальні розміри цих зображень становлять r_{10} і r_{12} відповідно (перша цифра індексу вказує на i -ту

фокальну площину, в якій розглядається зображення, а друга – на j -ту фокальну площину, яка створює фон у площині, що розглядається). Оскільки відомі діаметр ІОЛ і положення її фокальних площин, то з допомогою геометричного розрахунку можна обчислити радіальний розмір фонових складових r_{ij} у кожній фокальній площині. Наприклад, у першій фокальній площині лінзи радіус фону r_{10} в 72 рази більший за радіус кружка Ері головного зображення, а r_{12} – більший у 145 разів. Інтенсивність фонових зображень визначається ефективністю світла в кожній фокальній площині. Оскільки ці ефективності рівні (становлять по 30% у кожній площині), то об'єм під кривою $I_{BG}(r_0)$ буде в два рази більший за об'єм під кривою $I_i(r_0)$ для будь-якої фокальної площини (див. рис. 2).

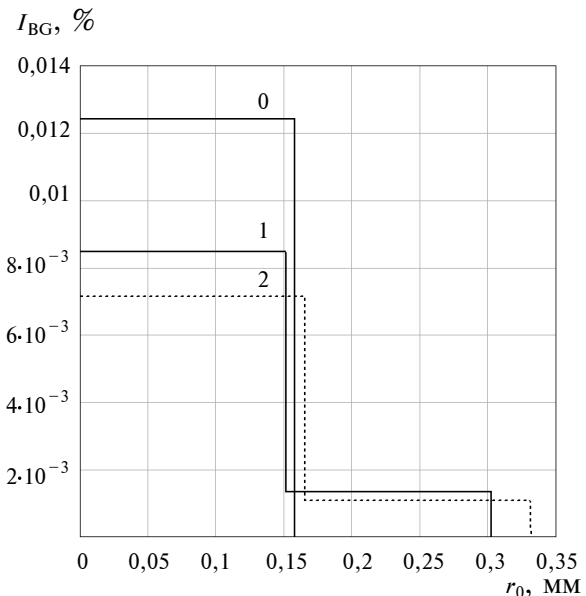


Рис. 3. Інтенсивність рівномірного фону, нормована до $I_0(0)$: 0 – відносна інтенсивність у 0-й фокальній площині; 1 – відносна інтенсивність у 1-й фокальній площині; 2 – відносна інтенсивність у 2-й фокальній площині

Для кількісного визначення інтенсивності фону в кожній фокальній площині в першому наближенні будемо вважати, що фонове зображення є рівномірним у межах площі, яку воно займає. Тоді, виходячи із геометрії побудови зображень і дифракційної ефективності, було визначено інтенсивність фонових зображень у кожній фокальній площині. На рис. 3 зображені графіки сумарних поперечних інтен-

сивностей, нормованих до максимальної інтенсивності головного зображення в нульовій фокальній площині $I_0(0)$. “0”, “1” і “2” позначають фокальну площину, для якої розраховано фон (F_0, F_1, F_2).

З використанням розрахованих абсолютних значень інтенсивностей рівномірних фонових зображень було побудовано графіки МПФ для відповідних фокальних площин (рис. 4). На рисунку також зображено графік дифракційно обмеженої МПФ. Графіки МПФ у першій і другій фокальних площинах зображені однією кривою (як і далі в статті), оскільки вони практично збігаються, що пояснюється майже однаковим розподілом інтенсивності фону (див. рис. 3). Як видно з рис. 4, зниження МПФ на низьких просторових частотах пропорційне дифракційній ефективності лінзи ($\eta = 0,3$), що відповідає висновкам попередніх досліджень [5, 6]. Виходячи з того, що контраст головного зображення в нульовій фокальній площині на декілька відсотків нижчий, ніж у першій і другій, можна зробити висновок: чим більшу площу займає фон, тим вищий контраст головного зображення, оскільки відношення максимальних інтенсивностей головного і фонового зображень збільшується.

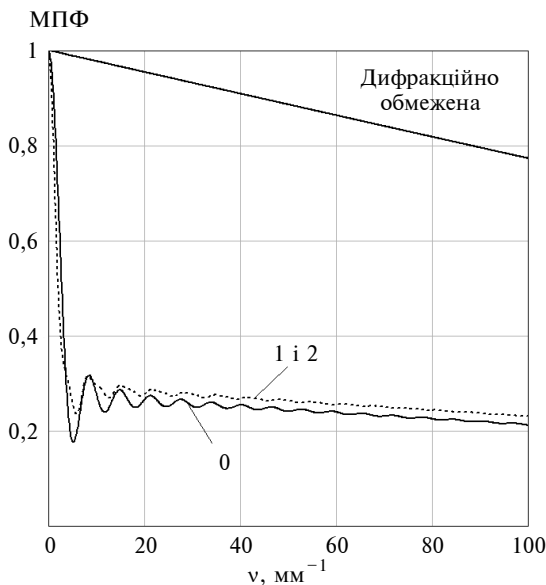


Рис. 4. МПФ трифокальної ІОЛ за наявності рівномірного фону: 0 – МПФ у 0-й фокальній площині; 1, 2 – МПФ у 1 і 2-й фокальних площинах

Наступним етапом оцінювання якості зображень, що створює трифокальна ІОЛ, був розгляд фонового зображення з нерівномірним розподілом інтенсивності. Нерівномірна інтен-

сивність від j -ї фокальної площини (з урахуванням ефективності) визначалась із міркувань, що її форма має бути подібною до форми інтенсивності головного зображення, а її перший мінімум міститься на границі існування фону. Наприклад, для фокальної площини F_1 перший мінімум фонові інтенсивності від нульової фокальної площини міститься в точці r_{10} , а від другої – в точці r_{12} . Виходячи з наведених міркувань, отримано вираз розподілу інтенсивності нерівномірного фону в заданій i -й площині від j -ї площини:

$$I_{ij}(r_0) = \left(\frac{R}{r_0}\right)^2 J_1^2 \left(\frac{2\pi r_0 \frac{r_i}{r_{ij}} R}{\lambda f_i} \right), \quad (3)$$

де r_i – радіус кружка Ері головного зображення в i -й фокальній площині; r_{ij} – радіус фонового зображення, створеного j -ю фокальною площиною в i -й. Сумарне фонове зображення $I_{BG}(r_0)$ в i -й площині, як і у випадку рівномірного фону, є сумою інтенсивностей від сусідніх площин.

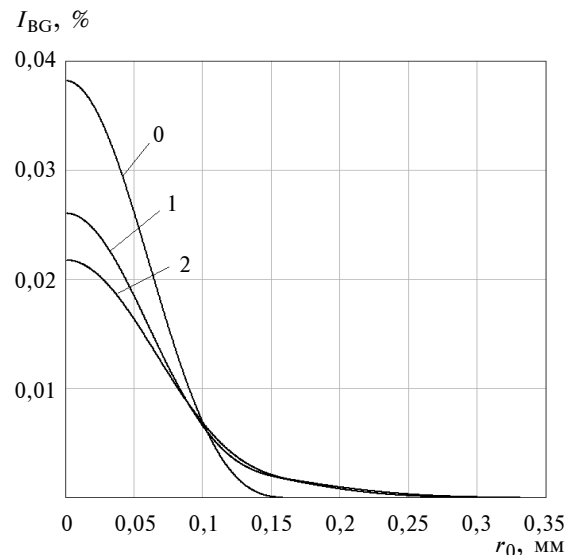


Рис. 5. Інтенсивність нерівномірного фону, нормована до $I_0(0)$: 0 – відносна інтенсивність у 0-й фокальній площині; 1 і 2 – відносна інтенсивність у 1 і 2-й фокальних площинах

На рис. 5 зображені графіки поперечних інтенсивностей нерівномірних фонових зображень, нормованих до максимальної інтенсивності головного зображення в нульовій фокальній площині $I_0(0)$. Як і у випадку рівно-

мірного фону, "0", "1" і "2" позначають фокальну площину, для якої розраховано фон (F_0, F_1, F_2).

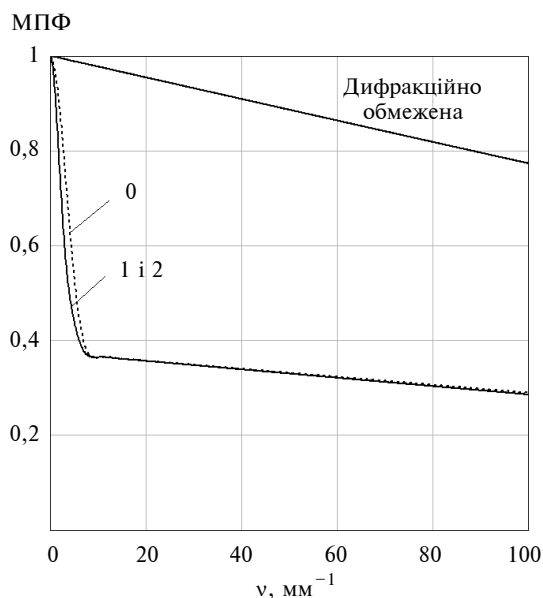


Рис. 6. МПФ трифокальної ІОЛ за наявності нерівномірного фону: 0 – МПФ у 0-й фокальній площині; 1 і 2 – МПФ у 1 і 2-й фокальних площинах

З використанням отриманого виразу (3) були побудовані графіки МПФ для відповідних фокальних площин (рис. 6). На рисунку також зображено графік дифракційно обмеженої МПФ. На відміну від випадку із рівномірним фоновим зображенням, графіки МПФ для кожної фокальної площини практично збігаються. Із порівняння рис. 4 і 6 видно, що у випадку

нерівномірного фону контраст головного зображення дещо вищий.

Слід зазначити, що припущення щодо описання інтенсивності головного зображення виразом ФРТ тонкої лінзи є достовірним, оскільки результати на рис. 4 і 6 відповідають попереднім дослідженням [5, 6].

Отже, для розрахунку МПФ мультифокальних ІОЛ не обов'язково виконувати громіздкі хвильові перетворення. Достатньо геометрично (з урахуванням ефективності) визначити розподіл інтенсивності фону в бажаній площині зображення.

Висновок

Запропонований метод розрахунку як рівномірного, так і нерівномірного фонових зображень дає змогу достатньо точно визначити МПФ мультифокальної ІОЛ. Розрахунок інтенсивності фону саме геометричним способом з урахуванням його ефективності значно спрощує процедуру визначення МПФ. Метод дає можливість визначити пряму залежність якості зображення дифракційної лінзи від площі, положення та розподілу інтенсивності фону, що сприяє розвитку методів підвищення контрасту зображення мультифокального елемента.

У результаті розрахунку МПФ мультифокальної ІОЛ запропонованим методом було підтверджено, що зниження контрасту зображення для низьких просторових частот пропорційне його ефективності. Подальшим напрямом дослідження є розрахунок МПФ мультифокальної ІОЛ з урахуванням абераций.

Список літератури

1. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С. Проективання дифракційних оптичних елементів і систем. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 196 с.
2. D.C. O'Shea et al., *Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test*. Washington: SPIE-Press, 2004, 254 p.
3. *Micro-optics elements, systems and applications*, H.P. Herzig, Ed. UK, London: Taylor and Francis, 1997, p. 359.
4. P.J. Valle et al., "Visual axial PSF of diffractive trifocal lenses", *Optics Express*, vol. 13, no. 7, pp. 2782–2792, 2005.
5. D. A. Buralli and G. M. Morris, "Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses", *Applied Optics*, vol. 31, no. 22, pp. 4389–4386, 1992.
6. F. Castignoles et al., "Comparison of the efficiency, MTF and chromatic properties of four diffractive bifocal intraocular lens designs", *Optics Express*, vol. 18, no. 5, pp. 5245–5256, 2010.
7. Колобродов В.Г., Тимчик Г.С. Дифракційна теорія оптичних систем. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 148 с.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
факультету НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
28 жовтня 2013 року