

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ

Грейсх Г.И., Ежов Е.Г., Сидякина З.А., Степанов С.А.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация

Приведены уравнения рельефов микроструктур однослойных дифракционных оптических элементов, размещённых на криволинейных поверхностях раздела двух сред, которые обеспечивают совпадающую с расчётной форму формируемого волнового фронта и 100% дифракционную эффективность на одной длине волны независимо от числа зон Френеля. Даны рекомендации по использованию приведённых уравнений при изготовлении двухслойных двухрельефных структур, обеспечивающих высокую дифракционную эффективность в пределах заданного спектрального диапазона.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, рельеф микроструктуры, зона Френеля, дифракционная эффективность.

Введение

В работе [1] для микроструктур дифракционных оптических элементов (ДОЭ), размещённых на плоских поверхностях раздела двух сред, приведены уравнения так называемых коррелированных рельефов. Эти рельефы микроструктур обеспечивают совпадающую с расчётной форму формируемого ДОЭ волнового фронта и 100% дифракционную эффективность на одной длине волны независимо от числа зон Френеля, а в случае двухслойных структур – близкую к 100% дифракционную эффективность в широком спектральном диапазоне. В настоящей работе получены уравнения коррелированных рельефов микроструктур однослойных ДОЭ, размещённых на криволинейных поверхностях раздела двух сред, и даны рекомендации по использованию этих уравнений при изготовлении двухслойных двухрельефных структур.

Фокусирующие и абберационные свойства ДОЭ, как правило, описываются в рамках модели бесконечно тонкого фазового транспаранта, вносящего фазовую задержку в падающий на него волновой фронт. Одним из вариантов представления этой фазовой задержки для случая ДОЭ с кольцевой микроструктурой является используемый в программе оптического проектирования ZEMAX [2] степенной ряд

$$\Psi(\rho) = m \sum_{j=1}^J A_j \rho^{2j}, \quad (1)$$

где m – номер рабочего дифракционного порядка, ρ – расстояние, отсчитываемое от оптической оси.

Оптическая сила ДОЭ определяется коэффициентом A_1 :

$$\Phi = -\frac{m\bar{\lambda}A_1}{\pi}, \quad (2)$$

а коэффициенты A_j при $j=2; 3; \dots; J$ являются коэффициентами асферических добавок. В выражении (2) $\bar{\lambda}$ – расчётная длина волны, на которой задаются все коэффициенты A_j . В дальнейшем рабочим будем считать первый порядок дифракции, т.е. $m=1$.

В качестве криволинейной поверхности вращения оптического элемента, в котором будет выполняться

рельеф путём удаления материала с его поверхности алмазным точением или травлением, может рассматриваться, например, «чётная» асферическая поверхность, описываемая в ZEMAX уравнением:

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} + \sum_{p=1}^P \alpha_p \rho^{2p}, \quad (3)$$

где $z(\rho)$ – координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстояние ρ в системе координат, плоскость XOY которой касается вершины этой поверхности; c – кривизна поверхности в её вершине; κ – коническая константа; α_p при $p=1; 2; \dots; P$ – коэффициенты асферичности поверхности.

1. Уравнения коррелированных рельефов микроструктур однослойных ДОЭ

Наиболее достоверную комплексную оценку работоспособности ДОЭ с точки зрения его функциональных возможностей даёт распределение интенсивности в картине дифракции Фраунгофера монохроматической световой волны на двух, установленных вплотную друг за другом оптических элементах. Одним из элементов является ДОЭ с рельефно-фазовой микроструктурой, а вторым – эталонный бесконечно тонкий фазовый транспарант, вносящий фазовую задержку, равную по величине требуемой, но имеющей противоположный знак [1]. Сразу же отметим, что фазовая задержка бесконечно тонкого транспаранта в соответствии с уравнением (1) является гладкой и может быть как положительной, так и отрицательной. Что же касается фазовой задержки, вносимой коррелированным рельефом ДОЭ, то она, будучи подобной фазовой задержке эталонного транспаранта, является кусочно-непрерывной и испытывает скачки на границах зон Френеля. Здесь отметим, что применительно к рельефно-фазовому ДОЭ с линейно-пилообразной или коррелированной микроструктурой под термином «зона Френеля» понимается участок элемента, в пределах которого фазовая задержка, вносимая элементом в падающий на него волновой фронт, изменяется от 0 до 2π [3, 4].

Предположим сначала, что коррелированный рельеф ДОЭ выполняется на криволинейной поверхности выпукло-плоской линзы, на выпуклую поверхность которой падает из воздуха коллимированный световой пучок нормально к вершинной касательной плоскости этой поверхности. Направление распространения света выбрано совпадающим с направлением движения обрабатываемого инструмента, приближающегося к криволинейной поверхности заготовки. Осевую толщину линзы положим равной d , и тогда (см. рис. 1а) длина оптического пути на расчётной длине волны $\bar{\lambda}$ от вершинной касательной плоскости к криволинейной поверхности, имеющей рельефную структуру, до плоской поверхности линзы будет равна

$$l_{CR} = h(\rho) + n_{\bar{\lambda}}[d - h(\rho)] = n_{\bar{\lambda}}d - (n_{\bar{\lambda}} - 1)h(\rho), \quad (4)$$

где $h(\rho)$ – глубина рельефа, отсчитываемая от вершинной касательной плоскости криволинейной поверхности; $n_{\bar{\lambda}}$ – показатель преломления материала структуры ДОЭ на расчётной длине волны.

Если же рельеф на криволинейной поверхности отсутствует, но на неё нанесён эталонный фазо-задерживающий слой, то выражение для оптического пути между указанными плоскостями будет иметь вид

$$l_{PT} = \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \Psi(\rho) + z(\rho) + n_{\bar{\lambda}}[d - z(\rho)] = \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \Psi(\rho) + n_{\bar{\lambda}}d - (n_{\bar{\lambda}} - 1)z(\rho), \quad (5)$$

где фазовая задержка эталонного транспаранта $\Psi(\rho)$ и координата точки криволинейной поверхности $z(\rho)$ могут описываться, например, уравнениями (1) и (3).

Здесь заметим, что, как видно из уравнения (3), при $\alpha_p = 0$ знак координаты точки поверхности $z(\rho)$ совпадает со знаком кривизны при вершине поверхности s , выбираемым в соответствии с правилом знаков, принятым в оптике: величины s , и $z(\rho)$ положительны, если центр поверхности находится после неё по направлению распространения света. Аналогичное правило в настоящей статье принято и для знака глубины рельефа. Она считается положительной, если, отсчитываясь от вершинной касательной плоскости, совпадает с направлением распространения света (см. рис. 1а).

Искажения волнового фронта, обусловленные рельефно-фазовой микроструктурой ДОЭ, можно оценить по разности оптических путей, определяемых выражениями (4) и (5), т.е.

$$\Delta l = l_{CR} - l_{PT} = (n_{\bar{\lambda}} - 1)[z(\rho) - h(\rho)] - \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \Psi(\rho). \quad (6)$$

Для того чтобы изображение, формируемое ДОЭ на расчётной длине волны, было дифракционно-ограниченным, а дифракционная эффективность равна 100%, необходимо обеспечить постоянство разности оптических путей в пределах каждой зоны

Френеля и её скачкообразное приращение на $\bar{\lambda}$ от зоны к зоне. В случае $\Psi(\rho) < 0$ это условие имеет вид

$$\Delta l = (i - 1)\bar{\lambda}, \quad (7)$$

а при $\Psi(\rho) > 0$ записывается как

$$\Delta l = -i\bar{\lambda}. \quad (8)$$

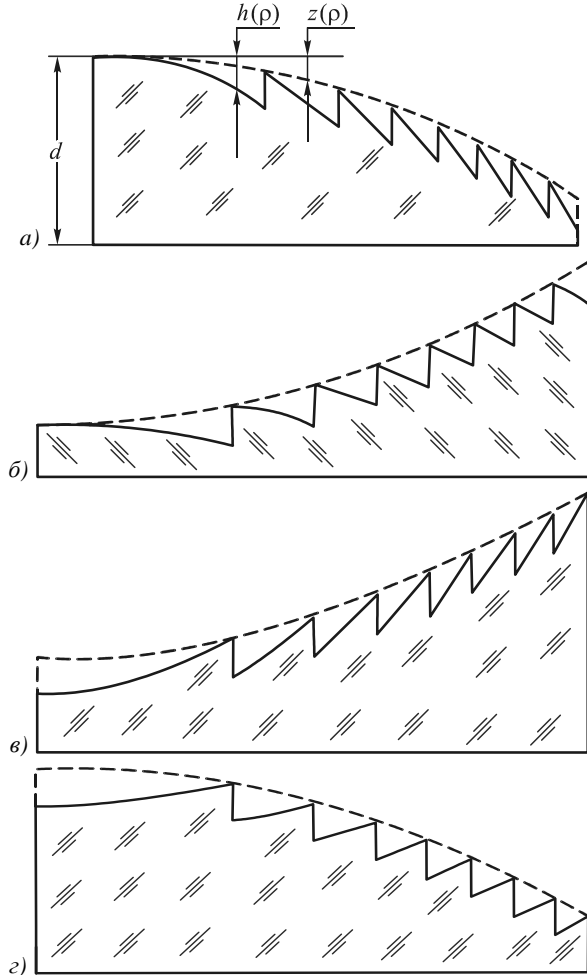


Рис. 1. Рельефно-фазовые микроструктуры ДОЭ на асферической поверхности: а) при $\Psi(\rho) < 0$ и $z(\rho) > 0$; б) при $\Psi(\rho) > 0$ и $z(\rho) > 0$; в) при $\Psi(\rho) < 0$ и $z(\rho) < 0$; з) при $\Psi(\rho) > 0$ и $z(\rho) < 0$

В формулах (7) и (8) i – номер зоны Френеля, определяемый текущим значением расстояния от оптической оси в соответствии с условием $\rho_{i-1} < \rho \leq \rho_i$. В этом условии ρ_{i-1} и ρ_i – внутренний и внешний радиусы, ограничивающие i -ю зону Френеля [для центральной, т.е. первой ($i=1$) зоны Френеля $\rho_0=0$]. Радиусы, ограничивающие зоны Френеля, являются действительными и положительными корнями уравнения

$$|\Psi(\rho)| = 2\pi i. \quad (9)$$

Из уравнения (6) с учётом формул (7) и (8) трудно получить глубины коррелированных рельефов ДОЭ:

$$h(\rho) = z(\rho) - H \left[i - 1 + \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right] \text{ при } \Psi(\rho) < 0 \quad (10)$$

и

$$h(\rho) = z(\rho) - H \left[-i + \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right] \text{ при } \Psi(\rho) > 0. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) H – толщина рельефного слоя, т.е. модуль максимальной глубины рельефа [3]:

$$H = \bar{\lambda} / (n_{\bar{\lambda}} - 1). \quad (12)$$

Легко видеть, что уравнения рельефов (10), (11) справедливы и в случае выполнения рельефов в вогнутой криволинейной поверхности, когда $z(\rho) < 0$ (см. рис. 1а и рис. 1б). Более того, эти же формулы, но при $z(\rho) = 0$ дают глубину рельефа, отсчитываемую от исходной поверхности, т.е. глубину съёма материала на этапе формирования дифракционной микроструктуры.

2. Уравнения коррелированных рельефов микроструктур двухслойных двухрельфных ДОЭ

Высокую дифракционную эффективность рельефно-фазовых дифракционных микроструктур в пределах заданного спектрального диапазона достигают, используя несколько рельефных слоёв из оптических материалов, отличающихся дисперсией. При этом наибольший практический интерес представляет двухслойная структура с двумя рельефами [5] (см. рис. 2). При переходе к двухслойной структуре с двумя рельефами выбираются оптические материалы слоёв и определяется толщина рельефа каждого из слоёв H_1 и H_2 , обеспечивающие предельно высокую дифракционную эффективность в заданном спектральном диапазоне ($\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$).

Величины H_1 и H_2 могут быть получены либо приближенно аналитически (см., например, [7]), либо численным методом, но более точно, как это предложено в [6]. В случае двухслойной структуры с внутренним и наружным рельефами (рис. 2а) уравнения рельефов ДОЭ зависят не только от знака функции $\Psi(\rho)$ (как это было у однослойной структуры), но и от соотношения показателей преломления n_1 и n_2 слоёв структуры, что можно учесть, как это сделано в работе [1], с помощью величины $G = \text{sgn}(1 - n_1/n_2)$. В результате, при $G\Psi(\rho) < 0$ глубины рельефов каждого из двух слоёв описываются уравнениями

$$h_1(\rho) = z(\rho) - H_1 \left[i - 1 + \frac{1}{2\pi} G\Psi(\rho) \right] \quad (13)$$

и

$$h_2(\rho) = z(\rho) - (H_1 - H_2) \left[i - 1 + \frac{1}{2\pi} G\Psi(\rho) \right], \quad (14)$$

а при $G\Psi(\rho) > 0$ – уравнениями

$$h_1(\rho) = z(\rho) - H_1 \left[-i + \frac{1}{2\pi} G\Psi(\rho) \right] \quad (15)$$

и

$$h_2(\rho) = z(\rho) - (H_1 - H_2) \left[-i + \frac{1}{2\pi} G\Psi(\rho) \right]. \quad (16)$$

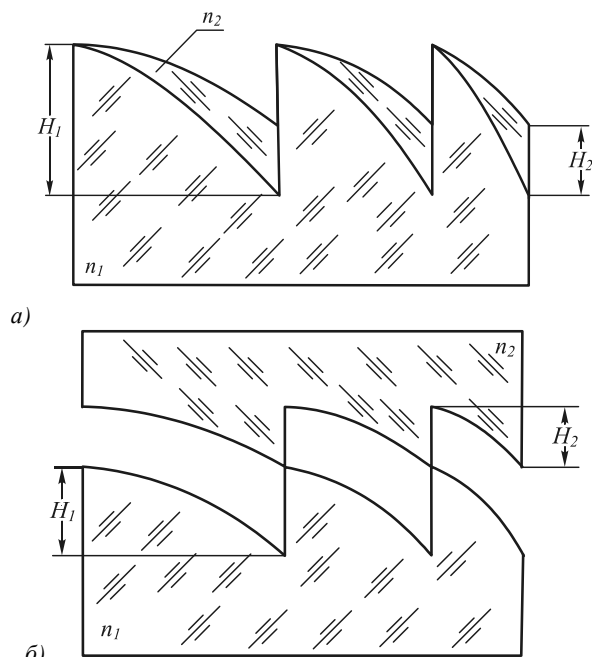


Рис. 2. Двухслойные микроструктуры с коррелированным рельефом, обеспечивающие высокую дифракционную эффективность в широком спектральном диапазоне (показан случай, когда $\Psi(\rho) < 0$ и $n_1 < n_2$): а) структура с внутренним и наружным рельефами; б) структура с двумя внутренними рельефами

В случае двухслойной структуры с двумя внутренними рельефами (рис. 2б) уравнение рельефа нижнего слоя (с текущей координатой исходной криволинейной поверхности $z_1(\rho)$, толщиной слоя $\Psi(\rho)$ и его показателем преломления n_1) совпадает по форме с уравнениями (11) и (12).

При $\Psi(\rho) < 0$

$$h_1(\rho) = z_1(\rho) - H_1 \left[i - 1 + \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right], \quad (17)$$

и при $\Psi(\rho) > 0$

$$h_1(\rho) = z_1(\rho) - H_1 \left[-i + \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right]. \quad (18)$$

Что же касается рельефа верхнего слоя (с текущей координатой исходной криволинейной поверхности $z_2(\rho)$, толщиной слоя H_2 и его показателем преломления n_2), то он, как легко видеть из рис. 2б, с точки зрения изготовления является обратным (с точностью до толщины рельефа) по отношению к рельефу первого слоя. Текущая координата исходной криволинейной поверхности $z_2(\rho) = -z_1(\rho)$, а глубина рельефа описывается уравнениями при $\Psi(\rho) < 0$

$$h_2(\rho) = z_2(\rho) - H_2 \left[-i - \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right] \quad (19)$$

и при $\Psi(\rho) > 0$

$$h_2(\rho) = z_2(\rho) - H_2 \left[i - 1 - \frac{1}{2\pi} \Psi(\rho) \right]. \quad (20)$$

Нетрудно показать, что уравнения рельефов (13)-(20), также как и уравнения (10), (11), справедливы и в случае выполнения рельефов в вогнутой криволинейной поверхности, когда $z(\rho) < 0$. И, также как уравнения (10), (11), при $z(\rho) = 0$ они дают глубину рельефа, отсчитываемую от исходной поверхности, т.е. глубину съёма материала оптического элемента на этапе формирования дифракционной микроструктуры.

Закljučая раздел, отметим, что, как показано в работе [6], в спектральном интервале, охватывающем видимый и ближний ИК диапазоны, при отношении периода однослойной или двухслойной структуры к глубине микрорельефа $k \geq 2,5$ разница в значениях дифракционной эффективности и в оптимальных значениях максимальных глубин рельефов, получаемых в скалярном и бесконечно тонком приближении и методами, основанными на строгом решении системы уравнений Максвелла, весьма незначительна. Поэтому все результаты, получаемые в бесконечно тонком приближении, при $k \geq 2,5$ являются вполне надёжными.

Заключение

Теория коррелированного рельефа дифракционной микроструктуры, представленная в [1], распространена на структуры, выполненные на криволинейных поверхностях. Это, в частности, позволяет рассчитывать высокоэффективные гибридные рефракционно-дифракционные оптические системы, у которых на одной или нескольких сферических или асферических поверхностях рефракционных линз сформированы рельефно-фазовые микроструктуры дифракционных линз. Такие системы имеют более простую конструкцию, чем системы, содержащие только рефракционные линзы, либо включающие помимо рефракционных линз и дифракционные линзы, микроструктуры которых выполнены на плоских поверхностях рефракционных линз или плоскопараллельных пластин. Упрощение конструкции оказывается возможным благодаря тому, что большее число эффективных коррекционных параметров позволяет существенно снизить уровень монохроматических и хроматических аберраций всех порядков (со всеми вытекающими отсюда позитивными последствиями) [8-12].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных № МД-2293.2012.9.

Литература

1. Грейсух, Г.И. Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля

/ Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.В. Калашников, И.А. Левин, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113, В. 4. – С. 468-473.

2. <http://www.zemax.com>.
3. **Бобров, С.Т.** Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
4. **Коронкевич, В.П.** Современные зонные пластинки / В.П. Коронкевич, И.Г. Пальчикова // Автотриетрия. – 1992. – № 1. – С. 85-100.
5. **Грейсух, Г.И.** Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 43-46.
6. **Грейсух, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых структур / Г.И. Грейсух, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, В. 4. – С. 694-699.
7. **Arieli, Y.** Design of Diffractive Optical Elements for Multiple Wavelengths / Y. Arieli, S. Noach, S. Ozeri, N. Eisenberg // Applied Optics. – 1998. – Vol. 23, Iss. 26. – P. 6174-6177.
8. **Greisukh, G.I.** Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, Iss. 23. – P. 4379-4384.
9. **Грейсух, Г.И.** Расчёт высокоапертурных конфокальных дифракционно-линзовых объективов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, №1. – С. 22-28.
10. **Greisukh, G.I.** Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50, Iss. 19. – P. 3254-3258.
11. **Грейсух, Г.И.** Расчёт пластмассово-линзовых микрообъективов суперхроматов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т.35, №4. – С. 473-479.
12. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, Iss. 20. – P.4597-4604.

References

1. **Greisukh, G.I.** The efficiency of relief-phase diffractive elements at a small number of Fresnel zones / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Optics and Spectroscopy. – 2012. Vol. 113 (4). – P. 425-430. – (In Russian).
2. <http://www.zemax.com>.
3. **Bobrov, S.T.** Optics of diffractive elements and systems / S.T. Bobrov, G.I. Greisukh, Yu.G. Turkevich – L.: Mashinostroenie, 1986. – 223 p. – (in Russian).
4. **Koronkevich, V.P.** Modern zone plates / V.P. Koronkevich, I.G. Pal'chikova // Avtometriya. – 1992. – No 1. – P. 85-100 – (in Russian).
5. **Greisukh, G.I.** Select of materials for "achromatization" of the relief-phase diffraction structures / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Computer optics. – 2008. – Vol. 32 (1). – P 43-46. – (in Russian).
6. **Greisukh, G.I.** Suppression of the spectral selectivity of two-layer relief-phase diffraction structures / G.I. Greisukh, E.A. Bezus, D.A. Bykov, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Optics and Spectroscopy. – 2009. – Vol. 106 (4). – P. 621-626.

7. **Arieli, Y.** Design of Diffractive Optical Elements for Multiple Wavelengths / Y. Arieli, S. Noach, S. Ozeri, N. Eisenberg // *Applied Optics*. – 1998. – Vol. 23, Iss. 26. – P. 6174-6177.
8. **Greisukh, G.I.** Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49, Iss. 23. – P. 4379-4384.
9. **Greisukh, G.I.** Design of high aperture confocal diffractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Computer optics*. – 2011. – Vol. 35 (1). – P. 22-28. – (in Russian).
10. **Greisukh, G.I.** Design of the double-telecentric high-aperture diffractive–refractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50, Iss. 19. – P. 3254-3258.
11. **Greisukh, G.I.** Design of superachromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Computer optics*. – 2011. – Vol. 35 (4). – P. 473-479. – (in Russian).
12. **Greisukh, G.I.** Diffractive–refractive correction units for plastic compact zoom lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, Iss. 20. – P. 4597-4604.

RELIEF-PHASE DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS ON FORMED REVOLUTION SURFACES HAVING THE HIGH DIFFRACTION EFFICIENCY

*G.I. Greysukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov
Penza State University of Architecture and Construction*

Abstract

The equations of microstructure reliefs of the single-layer diffractive optical elements disposed on curvilinear interfaces of two mediums are given. These reliefs provide the demanded form of a wave front and 100 p.c. the diffraction efficiency on one wave length irrespective of number of Fresnel zones. Recommendations about use of the given equations for manufacturing of the double-layer two-relief structures providing high diffraction efficiency within the given spectral range are given.

Key words: diffractive optical element, relief of microstructure, fresnel zone, diffraction efficiency.

Сведения об авторах



Грейсук Григорий Исаевич, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Грейсук Г.И. – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха 165 статей, 3 монографии, 11 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: grey@pguas.ru.

Grigoriy Isaevitch Greysukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in radio engineering. He is the deserved worker of the Russian higher school, Doctor of Technical Sciences (1990), professor, chief of the Physics and Chemistry Department of Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greysukh is EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 135 scientific papers, 3 monographs and 11 inventions and patents.



Езов Евгений Григорьевич, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 год). Работает профессором кафедры информационных систем и компьютерного моделирования Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Специалист в области расчёта оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Езова свыше 50 статей, учебник и 2 патента.

E-mail: grey@pguas.ru.

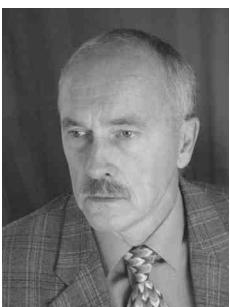
Eugeni Grigorievich Ezhov (b. 1977) graduated (1981) from the Penza State University majoring in radio engineering. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (2008), professor of the Information Systems and Computer Modeling department of Penza State University of Architecture and Construction. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is co-author over 55 scientific papers, tutorial and 2 patents.



Сидякина Зоя Александровна, 1980 года рождения. В 2002 году окончила Пензенский государственный педагогический университет по специальности «Учитель математики и физики». Ассистент кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

E-mail: grey@pguas.ru.

Zoya Aleksandrovna Sidiyagina (b. 1980) graduated (2002) from the Penza State Pedagogical University on a speciality «The mathematics teacher and physicists». She is assistant of the Physics and Chemistry Department of Penza State University of Architecture and Construction.



Степанов Сергей Алексеевич, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне – Самарский государственный университет) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (1999г.). Работает профессором кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Степанов С.А. – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова 155 статей, 2 монографии, 7 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: grey@pguas.ru.

Sergei Alekseevich Stepanov (b. 1951) graduated (1974) from the Kuibyshev State University (presently, Samara State University), majoring in Physics. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (1999), professor of the Physics and Chemistry Department of Penza State University of Architecture and Construction. S. Stepanov is a EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 85 scientific papers, 2 monographs and 7 inventions and patents.

Поступила в редакцию 21 января 2013 г.