

СПЕКТРАЛЬНАЯ И УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХСЛОЙНОЙ ОДНОРЕЛЬЕФНОЙ ПИЛООБРАЗНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Г.И. Грейсух¹, В.А. Данилов², А.И. Антонов¹, С.А. Степанов¹, Б.А. Усиевич³

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия,

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия,

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Аннотация

Проанализирована спектральная и угловая зависимость дифракционной эффективности двухслойных однорельефных пилообразных микроструктур, компонуемых из оптических пластмасс и недавно разработанных специальных марок стекла, позволяющих легко тиражировать элементы с дифракционным микрорельефом прецизионным литьем или штамповкой. Продемонстрированы широкие возможности ослабления зависимости дифракционной эффективности таких микроструктур от длины волны и угла падения излучения на элемент.

Ключевые слова: дифракционная эффективность, дифракционный оптический элемент, рельефно-фазовая дифракционная микроструктура, скалярная и строгая теории дифракции.

Цитирование: Грейсух, Г.И. Спектральная и угловая зависимость эффективности двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, А.И. Антонов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 38-43. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-38-43.

Введение

Зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) дифракционного оптического элемента (ДОЭ) от длины волны и угла падения излучения на элемент в совокупности с технологическими сложностями, сопровождающими подавление вышеуказанной зависимости, по-прежнему остаётся главной проблемой, препятствующей широкому использованию ДОЭ в изображающих оптических системах [1]. Здесь, конечно, в первую очередь имеются в виду объективы фото- и видеокамер мобильных устройств, линзы которых массово тиражируются сегодня путём прецизионной штамповки.

Действительно, одиночный ДОЭ с небольшой оптической силой, вводимый в схему рефракционно-линзового объектива, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, позволяющих изготавливать преломляющие поверхности прецизионной штамповкой [2–4]. Поэтому конкурентноспособная технология нанесения на сферическую или асферическую преломляющую поверхность пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры с подавленной спектральной и угловой энергетической зависимостью, несомненно, открыла бы путь широкому внедрению рефракционно-дифракционной оптики в массовые, но при этом высококачественные фото- и видеокамеры.

Известные эффективные решения ослабления зависимости ДЭ пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры от длины волны и угла падения излучения на элемент предполагают переход от однослойных микроструктур к структурам, содержащим несколько слоёв и рельефов [5–8]. При этом простейшей и технологически предпочтительной является двухслойная однорельефная микроструктура, представленная на рис. 1.

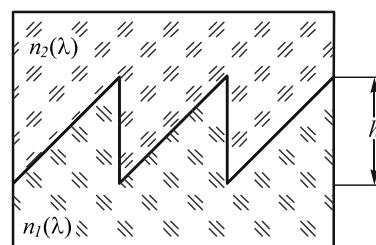


Рис. 1. Двухслойная однорельефная пилообразная микроструктура

Непрерывным условием ослабления спектральной зависимости ДЭ двухслойной однорельефной микроструктуры является определенное соотношение между показателями преломления и коэффициентами дисперсии материалов слоёв – материал с большим показателем преломления должен иметь и больший коэффициент дисперсии (большее число Аббе) [9]. В случае оптических стёкол наиболее приемлемой парой материалов является тяжелый крон и лёгкий флинт. К сожалению, сегодня среди технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс отсутствуют пары с требуемым соотношением оптических констант. В то же время требуемые тяжелые кроны имеются среди недавно разработанных специальных марок стекла (*glass for molded optics lenses*, GMOL) [10], позволяющих легко тиражировать линзы из этих материалов прецизионным литьём или штамповкой. Практически без удорожания тиражироваться таким образом могут линзы с дифракционным микрорельефом на сферической или даже асферической поверхности (см., например, [11]). Поэтому настоящая статья посвящена исследованию и оценке возможностей ослабления зависимости ДЭ от длины волны и угла падения излучения на дифракционные элементы, микроструктуры которых компонуется из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс и GMOL. При этом исследование проводится в рамках как скалярной, так и строгой теории дифрак-

ции методом, основанным на решении системы уравнений Максвелла.

Методики и результаты исследований

В рамках скалярной теории дифракции (СТД) зависимость ДЭ двухслойной однорельефной микроструктуры в первом рабочем порядке дифракции от длины волны λ и от угла падения излучения на элемент θ из воздуха в среду с показателем преломления $n_1(\lambda)$ (см. рис. 1) можно оценить по формуле [12]

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi(1 - \Delta l/\lambda))}{\pi(1 - \Delta l/\lambda)} \right]^2, \quad (1)$$

где

$$\Delta l = h \left(\sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_1^2(\lambda) - \sin^2 \theta} \right). \quad (2)$$

Здесь Δl – приращение оптического пути на одном периоде (на одной кольцевой зоне) пилообразного рельефа, зависящее от угла падения излучения θ , а также показателей преломления материалов $n_i(\lambda)$ и глубины рельефа h .

С использованием формул (1) и (2) производился подбор пар оптических материалов для компоновки двухслойной однорельефной микроструктуры. Эти пары должны были обеспечить наибольшее значение ДЭ в точке или точках её минимума в пределах всего заданного спектрального диапазона и выбранного интервала углов падения излучения на микроструктуру при глубине рельефа, не превышающей заданную величину.

Ограничение глубины рельефа обусловлено тем, что, как показали предыдущие исследования (см., например, [7]), стремление максимально расширить диапазон допустимых углов падения излучения на элемент с микроструктурой того или иного типа накладывает ограничение на относительный период микроструктуры Λ/h , который должен как минимум на порядок превышать глубину рельефа однорельефной микроструктуры или суммарную глубину рельефов двухрельефной микроструктуры.

Для слоя микроструктуры с показателем преломления $n_1(\lambda)$ оптические пластмассы выбирались из каталогов Misc и Zeon компьютерной программы оптического проектирования Zemax [13], а для слоя с показателем преломления $n_2(\lambda)$ GMOL выбирались из каталога HOYA GROUP Optics Division [10]. Результаты этого этапа исследования сведены в табл. 1 и 2. При этом строку №1 в этих таблицах занимает пара материалов, обеспечивающая наибольшее значение ДЭ в точке или точках её минимума в пределах всего заданного спектрального диапазона и выбранного интервала углов падения излучения на микроструктуру $\eta_{S,\min}$ при глубине рельефа $h < 5$ мкм. Строку №2 – при $h < 6$ мкм, №3 – при $h < 8$ мкм, №4 – при $h < 12$ мкм, №5 – при $h < 19$ мкм. Предельный угол падения излучения на микроструктуру θ_{\max} принят равным 25° , заведомо превышающим, как показали

предыдущие исследования, реально достижимый предельный угол.

Данные табл. 1 получены в спектральном диапазоне $0,43 \text{ мкм} \leq \lambda \leq \lambda_c$, ограниченном сверху красной С-линией водорода ($\lambda_c = 0,65626$ мкм). На этот спектральный диапазон часто рассчитывают объективы камер, сопрягаемых с ЖК-дисплеями. Данные табл. 2 получены в расширенном спектральном диапазоне ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм), призванном обеспечить нормальную работу камеры и при ограниченном освещении.

На следующем этапе микроструктуры, скомпонованные из всех пар материалов табл. 1 и 2, исследовались в рамках строгой теории дифракции так называемым строгим методом связанных волн (*rigorous coupled-wave analysis*, RCWA) [14] с использованием компьютерной программы, представленной в [15]. Прежде чем перейти к описанию результатов исследований, выполненных этим методом, заметим, что для сопоставления углов падения излучения на микроструктуру, приводящих к снижению ДЭ до одного и того же уровня, но полученных двумя различными методами, целесообразно обозначить эти углы разными буквами. Поэтому угол падения излучения на микроструктуру, используемый в RCWA-методе, ниже обозначен буквой ψ .

Сразу же следует заметить, что при расчёте ДЭ этим методом (в отличие от расчёта в рамках СТД) учитываются френелевские потери, обусловленные отражением излучения от поверхности раздела воздух/пластик и от рельефа. Это и является первопричиной отличия величин $\eta_{EM,\max}^{(\psi=0)}$ и $\eta_{S,\max}^{(\theta=0)} = 1$. При этом величина $\eta_{EM,\max}^{(\psi=0)}$, зависящая в основном от показателей преломления материалов, из которых компонуется микроструктура, у всех исследованных в настоящей статье микроструктур лежала в диапазоне $0,925 \leq \eta_{EM,\max}^{(\psi=0)} \leq 0,935$.

Что касается зависимости ДЭ пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры от угла падения излучения, то в силу асимметрии рельефа модуль отрицательного угла падения $|\psi_M|$ и положительный угол падения ψ_P , приводящие к снижению ДЭ до одного и того же уровня, могут существенно отличаться [7]. Чтобы гарантировать, что независимо от знака угла падения ДЭ, рассчитанная RCWA-методом, не опустится ниже заданного уровня, за оценочный угол ψ был принят наименьший из углов $|\psi_M|$ и ψ_P . При этом за оптимальную принималась глубина рельефа h , обеспечивающая в выбранном спектральном диапазоне максимально возможный интервал углов падения излучения, в пределах которого ДЭ (в точке её минимума) не опускается ниже минимально допустимого значения, равного 0,95 от максимального значения ДЭ при нормальном падении излучения на микроструктуру, т.е. $\eta_{EM,\min}^{(\psi)} / \eta_{EM,\max}^{(\psi=0)} \geq 0,95$. Это значение гарантирует не только отсутствие гало, но и любого другого визуально наблюдаемого негативного влияния побочных дифракционных порядков на каче-

ство изображения, формируемого оптической системой с ДОЭ.

Исследования показали, что с точки зрения достижения высокой ДЭ в пределах максимально широкого интервала углов падения излучения на элемент наибольший интерес представляют микроstructures, скомпонованные из пар материалов, занесённых в строки №2 и 3 табл. 1 и 2.

Поэтому ниже в табл. 3 и 4 представлены результаты исследования только этих двух микроstructures. Отличительной особенностью GMOL этих микроstructures является то, что они относятся к группе так называемых сверхтяжелых кронов (показатель преломления и коэффициент дисперсии на желтой d -линии гелия $\lambda_d=0,58756$ мкм у M-TAC60 соответственно равны $n_d=1,75501$ и $v_d=51,16$, а у M-LAC8 – $n_d=1,71300$ и $v_d=53,94$ [16]). В то же время оптические пластмассы, из которых выполняется слой с показателем преломления $n_1(\lambda)$ в микроstructures, представленных в табл. 3 и 4, относятся к группе легких флинтгов: $n_d=1,650527$ и $v_d=22,52$ у AL-6265 (ОКР-850) и $n_d=1,631926$ и $v_d=23,33$ у AL-6263 (ОКР4НТ) [13]).

Табл. 1. Параметры микроstructures, полученные в рамках СТД в спектральном диапазоне $0,43 \text{ мкм} \leq \lambda \leq \lambda_c$ при $\theta_{\max} = 25^\circ$

№	Материалы микроstructures		h , мкм	$\eta_{s, \min}$
	Пластик	GMOL		
1	POLYCARB	M-LAC14	4,86	0,91
2	AL-6265 (ОКР-850)	M-TAC60	5,51	0,97
3	AL-6263-(ОКР4НТ)	M-LAC8	7,18	0,98
4	SAN	M-PCD4	10,99	0,96
5	POLYCARB	M-BACD15	16,56	0,96

Табл. 2. Параметры микроstructures, полученные в рамках СТД в спектральном диапазоне $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм при $\theta_{\max} = 25^\circ$

№	Материалы микроstructures		h , мкм	$\eta_{s, \min}$
	Пластик	GMOL		
1	POLYCARB	M-LAC14	4,91	0,87
2	AL-6265 (ОКР-850)	M-TAC60	5,64	0,95
3	AL-6263-(ОКР4НТ)	M-LAC8	7,32	0,97
4	SAN	M-PCD4	11,26	0,94
5	POLYCARB	M-BACD15	18,31	0,85

Табл. 3. Нормированная ДЭ, полученная в спектральном диапазоне $0,43 \text{ мкм} \leq \lambda \leq \lambda_c$ RCWA-методом для ряда значений углов падения излучения на двухслойную микроstructure

Материалы микроstructures	Оптимальная глубина рельефа h , мкм	Λ / h	$\eta_{EM, \min}^{(\psi)} / \eta_{EM, \max}^{(\psi=0)}$				
			$\Psi = 0$	$\Psi = 18^\circ$	$\Psi = 20^\circ$	$\Psi = 22^\circ$	$\Psi = 24^\circ$
AL-6265/ MTAC60	5,51	20	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93
		30	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94
AL-6263/ M-LAC8	7,18	20	0,98	0,96	0,96	0,95	0,94
		30	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95

Табл. 4. Нормированная ДЭ, полученная в спектральном диапазоне $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм RCWA-методом для ряда значений углов падения излучения на двухслойную микроstructure

Материалы микроstructures	Оптимальная глубина рельефа h , мкм	L / h	$\eta_{EM, \min}^{(\psi)} / \eta_{EM, \max}^{(\psi=0)}$			
			$\Psi = 0$	$\Psi = 15^\circ$	$\Psi = 20^\circ$	$\Psi = 22^\circ$
AL-6265/ MTAC60	5,64	20	0,95	0,94	0,93	0,92
		30	0,95	0,95	0,94	0,93
AL-6263/ M-LAC8	7,32	20	0,97	0,95	0,95	0,94
		30	0,97	0,96	0,95	0,95

Табл. 3 и 4 показывают, что независимо от спектрального диапазона и относительного периода микроstructures оптимальная глубина рельефа, определяемая RCWA-методом, практически совпадает с оптимальной глубиной, получаемой в рамках СТД. Более того, отход от оптимальной глубины на $\pm 0,5\%$ приводит к падению ДЭ также не более, чем на $0,5\%$.

У ДОЭ с микроstructure, выполненной из пары оптических материалов AL-6265/MTAC60 в спектральном диапазоне $0,43 \text{ мкм} \leq \lambda \leq \lambda_c$, можно рассчитывать на относительную ДЭ $\eta_{EM, \min}^{(\psi)} / \eta_{EM, \max}^{(\psi=0)} \geq 0,95$ при углах падения излучения на элемент почти до 22° , если минимальный период в микроstructure превышает 165 мкм. В расширенном спектральном диапазоне ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) можно рассчитывать на относи-

тельную ДЭ, большую или равную 0,95, при углах падения излучения на элемент почти до 15° , если минимальный период в микроstructure превышает 170 мкм.

У ДОЭ с микроstructure, выполненной из пары оптических материалов AL-6263/M-LAC8 в спектральном диапазоне $0,43 \text{ мкм} \leq \lambda \leq \lambda_c$, предельно допустимый угол падения излучения на элемент достигает 24° при минимальном периоде в микроstructure, превышающем 215,5 мкм. В расширенном спектральном диапазоне предельно допустимый угол падения излучения на элемент равен примерно 21° при минимальном периоде в микроstructure, превышающем 220 мкм. Сопоставляя эти результаты с результатами, полученными для двухслойной двухрельефной микроstructure-

ры (см., например, работу [6]), нетрудно видеть, что при одинаковых минимальных периодах в микроструктурах данная однорельефная микроструктура допускает существенно больший угол падения излучения на элемент. Достигается это в результате замены пары оптических материалов пластик/пластик на пару пластик/GMOL. Сравнить же спектральную и угловую зависимость эффективности рассмотренных здесь двухслойных однорельефных микроструктур с соответствующими зависимостями однослойных киноформов можно, обратившись к работе [17].

Заключение

В статье продемонстрированы широкие возможности ослабления зависимости дифракционной эффективности двухслойной однорельефной микроструктуры от длины волны и угла падения излучения на элемент. Эти возможности открылись благодаря использованию для компоновки микроструктуры недавно разработанных специальных марок стекла (GMOL), позволяющих легко тиражировать элементы с дифракционным микрорельефом прецизионным литьём или штамповкой.

Показано, что если оптимальную глубину рельефа для выбранной пары материалов можно достоверно прогнозировать в рамках скалярной теории дифракции, то оптимальный выбор материалов и достоверную оценку дифракционной эффективности скомпонованной микроструктуры можно выполнить только с привлечением методов строгой теории дифракции, например, строгим методом связанных волн.

С использованием этого метода, в частности, показано, что в видимом спектральном диапазоне ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) при оптимальном выборе пары оптических материалов пластик/GMOL и при минимальном периоде микроструктуры, сопоставимом с соответствующим периодом двухслойной двухрельефной микроструктуры, предельно допустимый угол падения излучения на элемент превышает соответствующий угол двухрельефной микроструктуры более, чем в 1,4 раза (21° против 15°).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01461).

Литература

1. **Грейсукх, Г.И.** Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств / Г.И. Грейсукх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 218-226. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.
2. **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, Issue 23. – P. 4379-4384. – DOI: 10.1364/AO.49.004379.
3. **Greisukh, G.I.** Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-NIR spectrum / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, Issue 23. – P. 5843-5850. – DOI: 10.1364/AO.52.005843.
4. **Грейсукх, Г.И.** Компоновка и расчёт рефракционно-дифракционного объектива перископического типа для мобильного устройства связи / Г.И. Грейсукх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 11. – С. 51-57.
5. **Грейсукх, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсукх, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, № 4. – С. 692-697.
6. **Greisukh, G.I.** Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth / G.I. Greisukh, V.A. Danilov, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov, B.A. Usievich // Optics Communication. – 2015. – Vol. 338. – P. 54-57. – DOI: 10.1016/j.optcom.2014.10.037.
7. **Грейсукх, Г.И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трёхслойной микроструктурами / Г.И. Грейсукх, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 6. – С. 997-1004. – DOI: 10.7868/S0030403415060094.
8. **Грейсукх, Г.И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой / Г.И. Грейсукх, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 5. – С. 56-61.
9. **Грейсукх, Г.И.** Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсукх, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 43-46.
10. HOYA GROUP optics division. Glass molded lenses [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/moldlenses.html> (дата обращения 1.07.2017).
11. Edmund optics [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://www.edmundoptics.com> (дата обращения 1.07.2017).
12. **Buralli, D.A.** Optical performance of holographic kinoforms / D.A. Buralli, G.M. Morris, J.R. Rogers // Applied Optics. – 1989. – Vol. 28, Issue 5. – P. 976-983. – DOI: 10.1364/AO.28.000976.
13. Zemax [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://www.zemax.com> (дата обращения 1.07.2017).
14. **Moharam, M.G.** Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // Journal of the Optical Society of America. – 1982. – Vol. 72, Issue 10. – P. 1385-1392. – DOI: 10.1364/JOSA.72.001385.
15. **Lyndin, N.M.** Modal and C methods grating design and analysis software [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <http://www.mcgrating.com> (дата обращения 1.07.2017).
16. HOYA GROUP optics division. HOYA (excel file) (updated: 2017 April 01). – URL: <http://www.hoya-opticalworld.com/english/datadownload/index.html> (дата обращения 27.08.2017).
17. **Greisukh, G.I.** Diffractive elements for imaging optics of mobile communication devices / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41, Issue 4. – P. 581-584. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-581-584.

Сведения об авторах

Грейсух 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. Г.И. Грейсух – специалист в области расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 150 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств. E-mail: grey@pguas.ru.

Данилов Виктор Анатольевич, 1958 года рождения. В 1981 году окончил Московский институт электронного машиностроения по специальности «Прикладная математика». Научный сотрудник лаборатории акустооптики Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН. В.А. Данилов – специалист в области дифракционной оптики. В списке научных работ В.А. Данилова более 30 публикаций, 7 авторских свидетельств. E-mail: viktordanilov@bk.ru.

Антонов Артем Иванович, 1993 года рождения. В 2014 окончил бакалавриат Пензенского государственного университета по направлению «Физика». В 2016 окончил магистратуру Пензенского государственного университета по направлению «Физика». Аспирант кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства по направлению «Приборы и методы экспериментальной физики». В списке научных работ А.И. Антонова 2 статьи и 1 авторское свидетельство. E-mail: grey@pguas.ru.

Степанов Сергей Алексеевич, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне Самарский университет) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (1999 г.), профессор (2001 г.), 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. С.А. Степанов – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова более 120 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств. E-mail: asut@pguas.ru.

Усиевич Борис Александрович, 1967 года рождения. В 1990 году окончил Московский физико-технический институт по специальности «Прикладная математика и физика». Научный сотрудник лаборатории нелинейной и волноводной оптики Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Специалист в области моделирования и расчёта волноводов и дифракционных решёток. В списке научных работ Б.А. Усиевича более 60 публикаций. E-mail: borisu@kapella.gpi.ru.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 27 июля 2017 г. Окончательный вариант – 24 сентября 2017 г.

SPECTRAL AND ANGULAR DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF A TWO-LAYER AND SINGLE-RELIEF SAWTOOTH MICROSTRUCTURE

G.I. Greisukh¹, V.A. Danilov², A.I. Antonov¹, S.A. Stepanov¹, B.A. Usievich³

¹ Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia,

² Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of RAS, Moscow, Russia,

³ Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

Abstract

Spectral and angular dependences of the diffraction efficiency of two-layer single-relief sawtooth microstructures are analyzed. The microstructures are assembled from optical plastics and new brands of special optical glass. This makes it easy to replicate elements with diffraction microrelief by precision casting or stamping. Wide possibilities of weakening the dependence of the diffraction efficiency of such microstructures on the wavelength and the angle of incidence of radiation on the element are demonstrated.

Keywords: diffraction efficiency, diffractive optical element, relief-phase diffraction microstructure, scalar and rigorous diffraction theories.

Citation: Greisukh GI, Danilov VA, Antonov AI, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependence of the efficiency of a two-layer and single-relief sawtooth microstructure. Computer Optics 2018; 42(1): 38-43. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-38-43.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Russian Science Foundation (Project No. 17-19-01461)

References

- [1] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices. *Computer Optics* 2016; 40(5): 217-226. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.
- [2] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives. *Appl Opt* 2010; 49(23): 4379-4384. DOI: 10.1364/AO.49.004379.
- [3] Greisukh GI, Ezhov EG, Sidiyakina ZA, Stepanov SA. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-NIR spectrum. *Appl Opt* 2013; 52(23): 5843-5850. DOI: 10.1364/AO.52.005843.
- [4] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Layout and calculation of a refractive-diffraction objective of a periscope type for a mobile communication device. *J Opt Techn* 2016; 83(11): 687-691. DOI: 10.1364/JOT.83.000687.
- [5] Greisukh GI, Bezus EA, Bykov DA, Ezhov EG, Stepanov SA. Suppression of the spectral selectivity of two-layer relief-phase diffraction structures. *Opt Spectrosc* 2009; 106(4): 621-626. DOI: 10.1134/S0030400X09040249.
- [6] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Levin IA., Stepanov SA, Usievich BA. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth. *Opt Commun* 2015; 338: 54-57. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.10.037.
- [7] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependences of the efficiency of the relief-phase diffraction lenses with two- and three-layer microstructures. *Opt Spectrosc* 2015; 118(6): 964-970. DOI: 10.1134/S0030400X15060090.
- [8] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependences of the efficiency of diffraction lenses with a two-relief and two-layer microstructure. *J Opt Techn* 2015; 82(5): 308-311. DOI: 10.1364/JOT.82.000308.
- [9] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Choice of materials for "achromatization" of diffraction structures. *Computer Optics* 2008; 32(1): 43-46.
- [10] HOYA GROUP optics division. Glass molded lenses. Source: <http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/moldlenses.html>.
- [11] Edmund optics. Source: <http://www.edmundoptics.com>.
- [12] Buralli DA, Morris GM, Rogers JR. Optical performance of holographic kinoforms. *Appl Opt* 1989; 28(5): 976-983. DOI: 10.1364/AO.28.000976.
- [13] Zemax. Source: <http://www.zemax.com>.
- [14] Moharam MG, Gaylord TK. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings. *JOSA* 1982; 72(10): 1385-1392. DOI: 10.1364/JOSA.72.001385.
- [15] Lyndin NM. Modal and C methods grating design and analysis software. Source: <http://www.mcgrating.com>.
- [16] HOYA GROUP optics division. HOYA (excel file) Source: <http://www.hoya-opticalworld.com/english/download/index.html>.
- [17] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Diffractive elements for imaging optics of mobile communication devices. *Computer Optics* 2017; 41(4): 581-584. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-581-584.

Author's information

Grigoriy Isaevitch Greisukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh 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 150 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions.

Viktor Anatolievich Danilov (b. 1958) graduated (1981) from the Moscow Institute of Electronic Engineering, majoring in Applied Mathematics. He is a scientific employee of Acousto-Optics laboratory of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences. V.A. Danilov is a specialist in the field of diffraction optics. He is co-author of 30 publications, 7 inventions.

Artyom Ivanovich Antonov (b. 1993). In 2014 he graduated from the Penza State University, direction of "Physics", as bachelor. In 2016 he acquired the master degree of direction of "Physics". Now he is a post-graduate student of Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction in the direction "Devices and Methods of Experimental Physics". A.I. Antonov is co-author of 2 articles and 1 invention.

Sergei Alekseevich Stepanov (b. 1951) graduated (1974) from the Kuibyshev State University (presently, Samara University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara State Aerospace University, professor (2001). He is professor in the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. He 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 more 120 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

Boris Aleksandrovich Usievich (b.1967) graduated (1990) from the Moscow Institute of Physics and Technology, majoring in Applied Mathematics and Physics. He is a scientific employee of Nonlinear and Waveguide Optics laboratory of the Prokhorov General Physics Institute. B.A. Usievich is a specialist in the design of waveguides and diffraction gratings. He is co-author of more 60 publications.

Received July 27, 2017. The final version – September 24, 2017.