

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.42

СПЕКТРАЛЬНАЯ И УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ С ДВУХРЕЛЬЕФНОЙ И ДВУХСЛОЙНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

© 2015 г. Г. И. Грейсух*, доктор техн. наук; В. А. Данилов**, Е. Г. Ежов*, доктор физ.-мат. наук; С. А. Степанов*, доктор физ.-мат. наук; Б. А. Усиевич***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза

**Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

***Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: grey@pguas.ru, subscribing_2002@mail.ru

Представлены результаты сравнения зависимостей эффективности дифракционных линз, имеющих двухслойную микроструктуру с внутренним и внешним рельефами, от длины волны и угла падения излучения. Эти зависимости получены в рамках скалярной теории дифракции и методом, основанным на решении системы уравнений Максвелла. Определены требования к микроструктуре, при которых дифракционная линза как элемент оптической системы, рассчитанной на работу в видимом спектральном диапазоне, имеет наивысшую дифракционную эффективность.

Ключевые слова: дифракционная эффективность, дифракционная линза, рельефно-фазовая микроструктура

Коды OCIS: 050.0050.

Поступила в редакцию 28.07.14.

Введение

Возможности совершенствования оптических систем за счет совместного использования рефракционных и дифракционных линз (ДЛ) хорошо известны (см., например, [1–4]). В частности, достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, можно с помощью ДЛ, используя ограниченный набор оптических материалов, например коммерчески доступные оптические пластмассы [5–7].

Микроструктура ДЛ, входящей в изображающую оптическую систему, является, как правило, осесимметричной, и к ней предъявляется ряд требований, важнейшими из которых являются следующие. Во-первых, фазовая задержка, вносимая ДЛ, должна обеспечивать заданные фокусирующие и абберрационные свойства изображающей оптической системы в целом. Во-вторых, дифракционная эффективность (ДЭ)

ДЛ в рабочем порядке дифракции должна быть близкой к 100% в пределах всего заданного спектрального диапазона и в пределах всего поля зрения изображающей оптической системы. В противном случае качество изображения, формируемого оптической системой, будет снижаться. В частности, при невыполнении второго требования это снижение обусловлено тем, что на изображение, формируемое излучением, дифрагированным на микроструктуре ДЛ в рабочий порядок дифракции, накладывается паразитное излучение, дифрагированное на этой же микроструктуре в побочные порядки. ДЭ, близкую к 100% в требуемом порядке дифракции, обеспечивает пилообразная рельефно-фазовая микроструктура ДЛ. К сожалению, в случае однорельефной однослойной микроструктуры это выполняется только на одной длине волны и только для одного угла падения излучения на ДЛ. Для уменьшения зависимости ДЭ в рабочем порядке от длины волны и угла

падения и соответствующего снижения ДЭ в побочных дифракционных порядках используются микроstructures с несколькими рельефами и слоями (см., например, [8–10]).

Зависимость ДЭ (η_m) в любом порядке дифракции микроstructures, имеющих произвольное число рельефов и слоев, от длины волны λ и угла падения излучения θ можно приближенно оценить по известной формуле, полученной в рамках скалярной теории дифракции (СТД)

$$\eta_m = \left[\frac{\sin(\pi(m - \varphi))}{\pi(m - \varphi)} \right]^2. \quad (1)$$

Здесь m – номер дифракционного порядка, φ – составляющая фазовой задержки, зависящая от типа рельефно-фазовой микроstructure.

В случае однорельефной и однослойной микроstructure

$$\varphi = (h/\lambda) \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right), \quad (2)$$

где h – глубина рельефа, n – показатель преломления подложки, на которой выполнена микроstructure, на длине волны λ [11].

Если предполагается, как далее в данной статье, что рабочим является первый дифракционный порядок ($m = 1$), то глубина рельефа, обеспечивающего 100%-ную ДЭ при $\theta = 0$ на расчетной длине волны λ_0 , определяется уравнением

$$h = \lambda_0 / (n_0 - 1), \quad (3)$$

из которого нетрудно видеть, что в случае однорельефной однослойной микроstructure глубина рельефа соизмерима с длиной волны. В случае же структуры с подавленной спектральной зависимостью ДЭ полная глубина рельефа может превышать минимальную длину волны выбранного спектрального диапазона λ_{\min} в десятки раз.

В силу относительной простоты уравнений, получаемых в рамках СТД, она широко используется при расчете и оптимизации конструктивных параметров микроstructures. Однако при очень больших глубинах рельефов достоверность прогнозов, полученных в рамках СТД в отношении угловой зависимости ДЭ у рельефно-фазовых микроstructures, требует дополнительной проверки. Это связано с нижеизложенным. Анализ соответствия оценок ДЭ, получаемых в рамках СТД и на основе строгой (электромагнитной) теории дифракции, посвящено значительное количество опубликованных работ (см., например [12–15]). Однако

такой анализ отсутствует в отношении угловой зависимости ДЭ в первом дифракционном порядке микроstructures с полной глубиной рельефа $h \geq (30-40)\lambda_{\min}$.

Сопоставительный анализ спектральной и угловой зависимостей ДЭ

Строгая теория дифракции основана на решении системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. Одним из наиболее распространенных численных методов решения системы уравнений Максвелла применительно к расчету ДЭ является так называемый строгий метод связанных волн (rigorous coupled-wave analysis – RCWA) [16]. При использовании метода RCWA пилообразный рельеф дифракционной микроstructure заменяется ступенчатым и к каждой ступени применяется разложение в ряд Фурье. Точность метода определяется высотой равновысоких ступеней и числом гармоник ряда Фурье.

Авторы настоящей статьи при расчетах ДЭ методом RCWA использовали компьютерную программу, представленную в [17]. Наши предварительные исследования показали, что при высоте ступеней порядка $0,2\lambda_{\min}$ и числе гармоник ряда Фурье, большем 300, достигается хорошая сходимость результатов расчета, а следовательно, и их высокая достоверность. Последующие исследования, результаты которых приведены ниже, преследовали две основные цели. Во-первых, оценить соответствие прогнозов, получаемых в рамках СТД и методом RCWA, в отношении угловой зависимости ДЭ в первом дифракционном порядке глубоких микроstructures. Во-вторых, определить, при каких соотношениях глубины и периода пилообразного рельефа расчеты, проведенные в рамках СТД и методом RCWA, дают сопоставимые результаты.

Исследования проводились, в частности, на примере двухслойной микроstructure с внутренним и наружным рельефами (см. рис. 1) [9, 18, 19]. Этот выбор обусловлен тем, что такая микроstructure, выполненная из двух коммерчески доступных оптических пластмасс (полиметилметакрилата и поликарбоната), обеспечивает при постоянном угле падения излучения практически полное подавление спектральной зависимости ДЭ в пределах видимого спектрального диапазона. Для ДЭ этой микроstructure также справедлива формула (1), но состав-

ляющая фазовой задержки φ вычисляется по формуле [10]

$$\varphi = (1/\lambda) \left[h_1 \left(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) - h_2 \left(\sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) \right]. \quad (4)$$

Глубины рельефов h_1 и h_2 , а также показатели преломления сред n_1 и n_2 , входящие в формулу (4), показаны на рис. 1. Здесь индекс “1” относится к полиметилметакрилату, а индекс “2” – к поликарбонату.

В рамках СТД оптимальные значения глубин рельефов составляют $h_1 = 15,1$ мкм и $h_2 = 11,7$ мкм, а полная глубина рельефа, равная глубине h_1 , превышает минимальную длину волны выбранного спектрального диапазона λ_{\min} почти в 40 раз. При этом за оптимальные принимались глубины, обеспечивающие максимально возможное значение угла падения излучения, при котором ДЭ в точке ее минимума в пределах выбранного спектрального диапазона на $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм не опускалась ниже 0,95. При этом спектральном диапазоне и выбранных материалах структуры максимальным углом, приводящим к падению ДЭ не ниже выбранного уровня, является угол $\theta_{\max} = 20^\circ$.

Спектральная и угловая зависимости ДЭ данной микроstructures в первом рабочем порядке дифракции, полученные в рамках СТД с использованием уравнений (1) и (4), приведены на рис. 2. Из этого рисунка следует, что при $\theta = 0$ максимальное значение ДЭ $\eta_{S,\max,\theta=0} = 1$, а минимальное $\eta_{S,\min,\theta=0} \geq 0,952$. С ростом угла падения вплоть до $\theta_{\max} = 20^\circ$ минимальное значение ДЭ $\eta_{S,\min}$ не опускается ниже 0,952, причем так же, как и при $\theta = 0$, минимум ДЭ приходится на максимальную длину волны выбранного спектрального диапазона $\lambda = 0,7$ мкм, а ДЭ, близкая к минимальной, наблюдается на длине волны $\lambda = 0,48$ мкм.

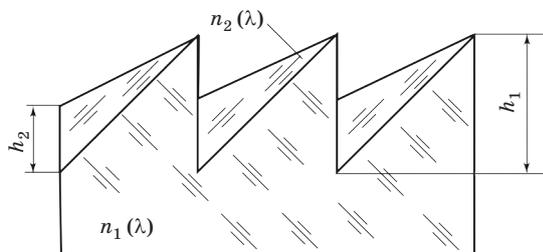


Рис. 1. Двухслойная пилообразная рельефо-фазовая микроstructure с внутренним и наружным рельефами.

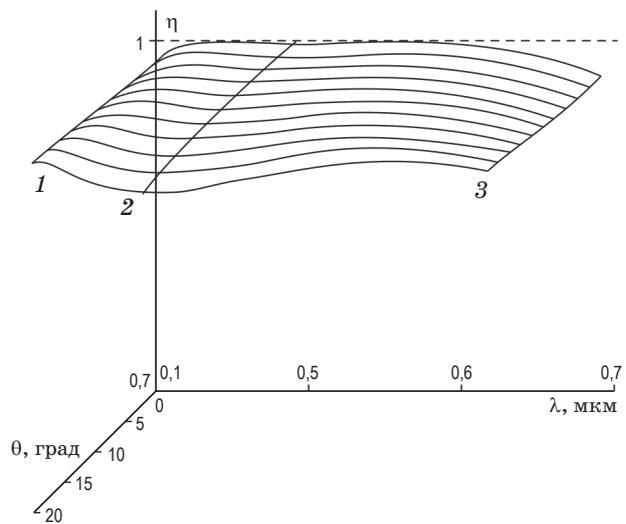


Рис. 2. Зависимость ДЭ, полученная в рамках СТД, от длины волны и угла падения излучения на микроstructure. 1, 2 и 3 – огибающие, соответствующие длинам волн 0,4, 0,48 и 0,7 мкм.

Прежде чем перейти к описанию результатов исследований, выполненных методом RCWA, заметим, что для сопоставления углов падения излучения на микроstructure, 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 микроstructure, используемый в методе RCWA, ниже обозначен буквой ψ .

Исследования спектральной и угловой зависимостей ДЭ у выбранной двухслойной микроstructure методом RCWA проводились, в частности, для двух значений отношения периода рельефа Λ к его полной глубине: $\Lambda/h_1 = 10$ и $\Lambda/h_1 = 20$. Результаты этих исследований, выполненных при оптимальных глубинах рельефа, полученных в рамках СТД (т.е. при $h_1 = 15,1$ мкм и $h_2 = 11,7$ мкм) и при падении излучения вдоль нормали к подложке микроstructure, т.е. при $\psi = 0$, сведены в табл. 1. В ней $\eta_{EM,\max,\psi=0}$ и $\eta_{EM,\min,\psi=0}$ – максимальное и минимальное значения ДЭ в пределах выбран-

Таблица 1. ДЭ, полученная методом RCWA, при падении излучения на микроstructure вдоль нормали к подложке

Λ/h_1	$\eta_{EM,\max,\psi=0}$	$\eta_{EM,\min,\psi=0}$	$\eta_{EM,\min,\psi=0}/\eta_{EM,\max,\psi=0}$
10	0,934	0,894	0,957
20	0,939	0,893	0,952

ного спектрального диапазона, рассчитанные методом RCWA.

Зависимость ДЭ от длины волны излучения, полученная методом RCWA при $\psi = 0$ и $\Lambda/h_1 = 20$, представлена на рис. 3. Здесь следует заметить, что при расчете ДЭ этим методом (в отличие от расчета в рамках СТД) учитываются френелевские потери, обусловленные отражением излучения от обоих рельефов. Это и является первопричиной отличия величин $\eta_{EM, \max, \psi=0}$ и $\eta_{S, \max, \theta=0}$. Что касается зависимости ДЭ пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры от угла падения излучения, то в силу асимметрии рельефа модуль отрицательного угла падения $|\psi_N|$ и положительный угол падения ψ_P , приводящие к снижению ДЭ до одного и того же уровня (см. рис. 4), могут существенно отличаться.

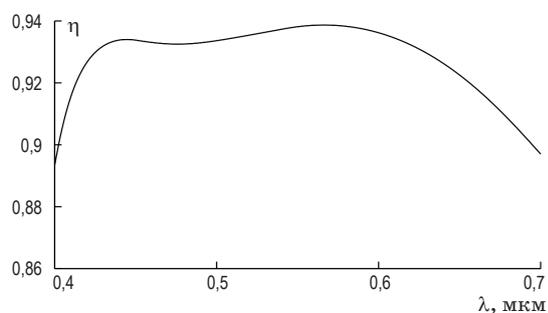


Рис. 3. Зависимость ДЭ, полученной методом RCWA при $\Lambda/h_1 = 20$, от длины волны излучения, падающего вдоль нормали к подложке микроструктуры.

Данное явление обусловлено влиянием и взаимодействием целого ряда факторов, зависящих, в частности от знака угла падения излучения на микроструктуру и включающих френелевские отражения и переотражения от обоих рельефов; экранирования излучения вертикальными поверхностями рельефов при наклонном падении излучения; отличия глубины каждого из рельефов от оптимального значения в результате отклонения от нормального падения излучения.

Чтобы гарантировать, что независимо от знака угла падения ДЭ, рассчитанная методом RCWA, не опустится ниже заданного уровня, за оценочный угол Ψ был принят наименьший из углов $|\psi_N|$ и ψ_P , приводящих к снижению ДЭ до заданного уровня. Результаты сопоставительных расчетов приведены в табл. 2. В ней Θ – модуль угла падения излучения, приводящего к снижению ДЭ до заданного уровня, но полученный в рамках СТД.

При сопоставлении результатов расчета ДЭ, получаемых методом RCWA и в рамках СТД, будем считать, что для ДЛ в составе оптической системы с ростом угла падения допустимо снижение ДЭ до уровня 0,95 от $\eta_{EM, \max, \psi=0}$ или от $\eta_{S, \max, \theta=0}$ в зависимости от метода расчета. Тогда, как следует из табл. 2, рассмотренная двухслойная пилообразная рельефно-фазовая микроструктура, выполненная из оптических пластмасс (полиметилметакрилата и поликарбоната), в пределах спектрального диапазона $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм реально способна обеспечить

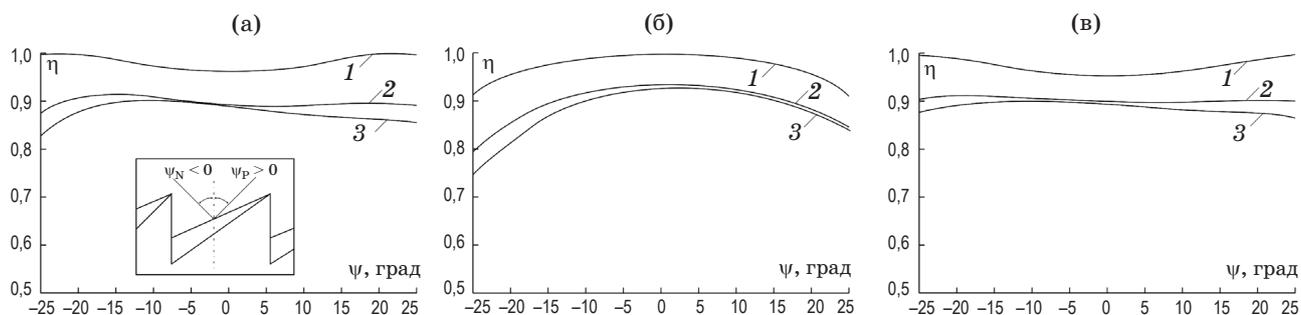


Рис. 4. Зависимости ДЭ от угла падения излучения, полученные в рамках СТД (1) и методом RCWA (2, 3). При $\Lambda/h_1 = 20$ (2); при $\Lambda/h_1 = 10$ (3). Рис. (а), (б) и (в) соответствуют длинам волн 0,4, 0,48 и 0,7 мкм.

Таблица 2. Нормированная ДЭ, полученная методом RCWA и в рамках СТД, для ряда значений углов падения излучения на двухслойную микроструктуру

Λ/h_1	$\eta_{EM, \psi} / \eta_{EM, \max, \psi=0}$			$\eta_{S, \psi} / \eta_{S, \max, \psi=0}$		
	$\Psi = 10^\circ$	$\Psi = 15^\circ$	$\Psi = 20^\circ$	$\Theta = 10^\circ$	$\Theta = 15^\circ$	$\Theta = 20^\circ$
10	0,933	0,925	0,873	0,952		
20	0,950	0,950	0,909			

требуемую ДЭ при углах падения излучения, не превышающих 15° , в то время как СТД прогнозирует угол в 20° .

Завершая раздел, отметим, что подлинно оптимальные значения глубин h_1 и h_2 практически совпадают со значениями, получаемыми в рамках СТД. Действительно, изменение этих глубин даже на десятые доли микрометра приводят к ощутимому сужению оценочного угла Ψ .

Заключение

В настоящей статье в рамках СТД и методом RCWA проведено исследование двухрельефной и двухслойной микроструктуры, выполненной из полиметилметакрилата и поликарбоната, при ее освещении полихроматическим излучением, охватывающим видимый спектральный диапазон. Оно показало, что СТД дает завышенную ширину интервала углов падения излучения на микроструктуру, в пределах которого ДЭ не падает ниже заданного уровня. При этом степень завышения зависит от значений допустимого падения ДЭ и относительного периода Λ/h_1 . Так, в частности, при допустимом падении

* * * * *

ДЭ до уровня $0,95\eta_{EM,max,\psi=0}$ и при $\Lambda/h_1 \geq 20$ это завышение не превышает 35%.

Указанное значение относительного периода требует, чтобы ширина самой узкой зоны Френеля ДЛ, имеющей рассмотренную в данной статье двухслойную и двухрельефную микроструктуру, превышала 300 мкм. Это, как правило, может быть выполнено в гибридных рефракционно-дифракционных оптических системах, где ДЛ играет роль корректора хроматизма и монохроматических аберраций (см., например, [5–7]). Следовательно, как видно из табл. 2, при использовании ДЛ с двухслойной и двухрельефной микроструктурой в гибридной изображающей оптической системе, работающей в видимом спектральном диапазоне, ДЭ в рабочем порядке дифракции на всех длинах волн не упадет ниже $0,95\eta_{EM,max,\psi=0}$ при выполнении условия $\Lambda/h_1 \geq 20$ и углах падения на микроструктуру, не превышающих 15° .

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jennifer L.R., Crawford M.K., Fischer D.J., Harkrider C.J., Moore D.T., Tomkinson T.H. Design of three-element night-vision goggle objectives // Appl. Opt. 1998. V. 37. № 4. P. 622–626.
2. Hua H., Ha Y., Roland J.P. Design of an ultralight and compact projection lens // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 1. P. 97–107.
3. Бармичева Г.В., Ган М.А. Объектив // Патент России № 2258247. 2005.
4. Canon unveil EF 400 mm f/4 DO IS USM super telephoto lens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ephotozine.com/article/canon-unveil-ef-400-mm-f-4-do-is-usm-super-telephoto-lens-551>
5. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives // Appl. Opt. 2010. V. 49. № 23. P. 4379–4384.
6. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Kalashnikov A.V., Stepanov S.A. Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 20. P. 4597–4604.
7. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Sidiyakina Z.A., Stepanov S.A. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum // Appl. Opt. 2013. V. 52. № 23. P. 5843–5850.
8. Arieli Y., Ozeri S., Eisenberg N. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth // Opt. Lett. 1998. V. 23. № 11. P. 823–824.
9. Грейсукх Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106. № 4. С. 694–699.
10. Zhao Y.H., Fan C.J., Ying C.F., Liu S.H. The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency // Opt. Com. 2013. V. 295. P. 104–107.

11. *Buralli D.A., Morris G.M., Rogers J.R.* Optical performance of holographic kinoforms // *Appl. Opt.* 1989. V. 28. № 5. P. 976–983.
12. *Pommet D.A., Moharam M.G., Grann E.B.* Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1994. V. 11. № 6. P. 1827–1834.
13. *Levy U., Marom E., Mendlovic D.* Thin element approximation for the analysis of blazed gratings: simplified model and validity limits // *Opt. Com.* 2004. V. 229. P. 11–21.
14. *Francés J., Bledab S., Gallegob S., Neippb C., Márquez A., Pascual I., Beléndez A.* Accuracy analysis of simplified and rigorous numerical methods applied to binary nanopatterning gratings in non-paraxial domain // *Physics Letters A.* 2013. V. 377. P. 2245–2250.
15. *Ruan D., Zhu L., Jing X., Tian Y., Wang L., Jin S.* Validity of scalar diffraction theory and effective medium theory for analysis of a blazed grating microstructure at oblique incidence // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. № 11. P. 2357–2365.
16. *Moharam M.G., Gaylord T.K.* Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction // *Opt. Soc. Am.* 1981. V. 71. № 7. P. 811–818.
17. *Lyndin N.M.* Modal and c methods grating design and analysis software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mcgrating.com>
18. *Kleemann B., Seeßelberg M., Ruoff J.* Design concepts for broadband high-efficiency DOEs // *The European Optical Society – Rapid Publications.* 2008. V. 3. P. 08015-1–08015-16.
19. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Подавление зависимости дифракционной эффективности двух-порядковых рельефно-фазовых дифракционных структур от длины волны // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 2. С. 3–6.