

Минимизация суммарной глубины внутренних пилообразных рельефов двухслойной рельефно-фазовой дифракционной микроструктуры

© Г.И. Грейсх¹, В.А. Данилов², С.А. Степанов¹, А.И. Антонов¹, Б.А. Усиевич³

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028 Пенза, Россия

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 117342 Москва, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

e-mail: grey@pguas.ru

Поступила в редакцию 15.06.2017 г.

В окончательной редакции 08.08.2017 г.

Представлены результаты исследования возможности уменьшения суммарной глубины рельефов двухслойной микроструктуры, имеющей два внутренних пилообразных микрорельефа, обеспечивающих снижение зависимости дифракционной эффективности микроструктуры от длины волны излучения и угла падения излучения на микроструктуру. Эти результаты позволяют минимизировать трудоемкость получения в рамках электромагнитной теории дифракции оптимальных глубин микрорельефов в зависимости от требований, предъявляемых к дифракционному оптическому элементу. Оптимальные глубины обеспечат в заданных спектральном диапазоне и интервале углов падения излучения максимально возможное (для выбранной ширины самой узкой зоны пилообразного микрорельефа) значение дифракционной эффективности в точке ее минимума.

DOI: 10.21883/OS.2018.01.45365.143-17

1. Введение

Одним из факторов, ограничивающих широкое использование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в изображающих оптических системах, рассчитанных на полихроматическое излучение, по-прежнему остается зависимость их дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру. Например, в случае простейшей однослойной пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры (РФМ) ДЭ в первом рабочем порядке, близкой к единице, может быть получена только на одной длине волны и при одном значении угла падения излучения на микроструктуру. На других длинах волн и при других углах падения излучения ДЭ в рабочем порядке падает, а в побочных порядках растет, что может привести к возникновению цветного ореола (гало), сопровождающего наиболее яркие фрагменты изображения, формируемого оптической системой в полихроматическом излучении.

Интегрально уровень побочных дифракционных порядков, как правило, оценивается по отличию ДЭ в первом рабочем порядке от единицы. Известный метод снижения зависимости ДЭ РФМ от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру предполагает ее компоновку, как минимум, из пары оптических материалов. Причем в случае однорельефной микроструктуры, представленной на рис. 1, значения коэффициента дисперсии ν и показателя преломления

n выбранной пары материалов должны удовлетворять условию: если $\nu_1 > \nu_2$, то и $n_1 > n_2$. То есть у кроноподобного оптического материала показатель преломления должен быть больше, чем у флинтоподобного [1]. Данное условие сегодня не позволяет использовать для компоновки однорельефных РФМ пар оптических пластмасс наиболее технологичных и коммерчески доступных марок.

Указанное ограничение снимается с переходом к двухрельефным РФМ, представленным на рис. 2, *a, b* [2–5].

Обе эти микроструктуры с точки зрения скалярной теории дифракции (СТД) идентичны, так как считаются бесконечно тонкими транспарантами, каждый из которых вносит в нормально падающий на него плоский волновой фронт определенную фазовую задержку. Эти

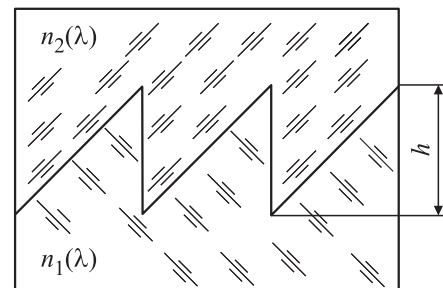


Рис. 1. Двухслойная однорельефная пилообразная микроструктура.

фазовые задержки и соответственно ДЭ в рамках СТД при равенстве одинаково обозначенных показателей преломления и глубин совпадают [2]. При переходе к наклонному падению излучения на ДОЭ концепция бесконечно тонкого транспаранта используется также (см., например, работы [3–6]). Ее адекватность независимо от компоновки, числа слоев и рельефов экспериментально подтверждена в работе [7]. В результате в рамках СТД ДЭ РФМ в первом рабочем порядке дифракции рассчитывается по формуле [3,4,6]

$$\eta = \left\{ \frac{\sin(\pi - 0.5\Delta\varphi)}{\pi - 0.5\Delta\varphi} \right\}^2. \quad (1)$$

При этом микроstructures, представленные на рис. 2, *a, b*, вносят в падающий на них волновой фронт фазовую задержку $\Delta\varphi$, определяемую одним и тем же уравнением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[h_1 \left(\sqrt{n_1^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) - h_2 \left(\sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) \right], \quad (2)$$

где λ — длина волны падающего на микроstructure излучения, h_i и $n_i(\lambda)$ — как это показано на рис. 2, соответственно глубины рельефов и показатели преломления материалов, из которых эти рельефы выполнены, θ — угол падения излучения на ДОЭ из воздуха в среду с показателем преломления $n_1(\lambda)$.

С точки зрения массового производства микроstructure, представленные на рис. 2, *a, b*, далеко не идентичны: микроstructure с двумя внутренними рельефами более технологична по сравнению с микроstructure с внутренним и наружным рельефами.

Оценки ДЭ РФМ, полученные по формулам (1) и (2), сопоставлялись с результатами, полученными в рамках строгой теории дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла с использованием строгого метода связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis (RCWA)). В соответствии с ним пилообразные рельефы дифракционной микроstructure заменялись ступенчатыми, и каждая ступень ограничивала тонкий слой, образующий бинарную диэлектрическую решетку, к которой применялось разложение в ряд Фурье [8]. Наши исследования, выполненные RCWA-методом с использованием компьютерной программы, представленной в [9], показали, что в случае двухслойной микроstructure с внутренним и наружным рельефами (рис. 2, *a*) хорошая сходимость результатов расчета, а следовательно, и их высокая достоверность достигается при высоте ступеней порядка $0.2\lambda_{\min}$ и числе гармоник ряда Фурье больше 300 [4]. Здесь λ_{\min} — минимальная длина волны рабочего спектрального диапазона. Такие же ограничения на высоту ступеней и число гармоник обеспечивают хорошую сходимость результатов расчета

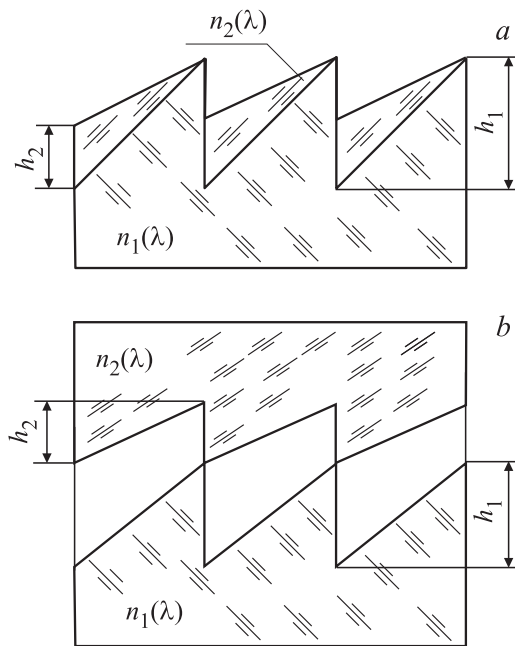


Рис. 2. Двухслойные двухрельфные пилообразные микроstructure: *a* — с внутренним и наружным рельефами, *b* — с двумя внутренними рельефами.

и в случае микроstructure с двумя внутренними рельефами (рис. 2, *b*).

Сопоставительный анализ оценок ДЭ РФМ, полученных в рамках СТД и RCWA-методом [4,5], показал, что достоверность оценки по СТД зависит от относительного периода микроstructure, т.е. от отношения периода микроstructure к суммарной глубине рельефов Λ/h_{Σ} . При этом принципиальным является то, что оценки по СТД всегда завышены по сравнению с оценками, полученными RCWA-методом, и степень завышения тем больше, чем меньше Λ/h_{Σ} [5].

Здесь следует заметить, что ДОЭ, включаемый во вращательно-симметричную оптическую систему с целью коррекции хроматизма и монохроматических аберраций, имеет кольцевую квазипериодическую микроstructure, и за характерный пространственный период Λ мы будем принимать ширину самой узкой зоны пилообразного микрорельефа.

Нетрудно видеть (рис. 2, *a, b*), что у микроstructure с внутренним и наружным микрорельефами $h_{\Sigma} = h_1$, а у микроstructure с двумя внутренними микрорельефами $h_{\Sigma} = h_1 + h_2$. Отсюда следует, что задача уменьшения суммарной глубины рельефов наиболее актуальна для РФМ с двумя внутренними микрорельефами. Не менее актуальна для такой РФМ и минимизация трудоемкости получения (в рамках строгой теории дифракции) оптимальных глубин двух внутренних микрорельефов в зависимости от требований, предъявляемых к ДОЭ. Решению вышеуказанных задач и посвящена настоящая работа.

Таблица 1. Минимальная нормированная ДЭ, полученная RCWA-методом и в рамках СТД, для ряда значений углов падения излучения на двухслойную микроструктуру с внутренним и наружным рельефами

Λ/h_1	$\eta_{EM,min}^{(\psi)}/\eta_{EM,max}^{(\psi=0)}$			$\eta_{S,min}^{(\theta)}/\eta_{S,max}^{(\theta=0)}$		
	$\psi = 10^\circ$	$\psi = 15^\circ$	$\psi = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 20^\circ$
10	0.933	0.925	0.873	0.952		
20	0.950	0.950	0.909			

Спектральная и угловая зависимости ДЭ РФМ при оптимальных глубинах рельефов, полученных RCWA-методом

Оптимальные значения глубин рельефов h_1 и h_2 для выбранной пары оптических материалов зависят от выбора критерия оптимальности. Если предполагается использовать ДОЭ в качестве корректора аберраций изображающей оптической системы, то для исключения гало наиболее адекватным является критерий, предложенный в работе [5]. В соответствии с ним за оптимальные значения глубин h_1 и h_2 принимаются значения, обеспечивающие в выбранном спектральном диапазоне максимально возможный интервал углов падения излучения, в пределах которого ДЭ (в точке ее минимума) не опускалась ниже заданного уровня, обеспечивающего отсутствие гало.

С использованием описанного выше критерия сопоставительный анализ оценок ДЭ, полученных в рамках скалярной и строгой теорий дифракции в ходе всесторонних исследований двухслойной микроструктуры, состоящей из полиметилметакрилата и поликарбоната, проводился ранее в видимом спектральном диапазоне $0.4 \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$ только в варианте с внутренним и наружным микрорельефами [5]. Основные результаты этого анализа представлены в табл. 1, заимствованной из указанной работы для удобства сопоставления их с результатами исследования двухслойной микроструктуры с двумя внутренними рельефами. Сразу же заметим, что в этой таблице для сопоставления углов падения излучения на микроструктуру, приводящих к снижению ДЭ до одного и того же уровня, но полученных двумя различными методами, эти углы обозначены разными буквами: θ — в рамках СТД и ψ — RCWA-методом. Это вызвано тем, что в силу асимметрии рельефа модуль отрицательного угла падения $|\psi_N|$ и положительный угол падения излучения ψ_P , приводящие к снижению ДЭ, оцениваемого RCWA-методом, до одного и того же уровня могут существенно отличаться и за оценочный угол ψ и в работе [5], и в настоящей работе принят наименьший из углов $|\psi_N|$ и ψ_P падения излучения из воздуха на ДОЭ, приводящий к снижению ДЭ до заданного уровня.

В спектральном диапазоне $0.4 \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$ оптимальные значения глубин рельефов двухслойной двухрельефной микроструктуры, состоящей из полиметилметакрилата и поликарбоната, даваемые СТД, составляют в полиметилметакрилате $h_1 = 15.1 \mu\text{m}$ и в поликарбонате $h_2 = 11.7 \mu\text{m}$ [5]. В таблице 1, как и далее, $\eta_{EM,min}^{(\psi)}$ и $\eta_{S,min}^{(\theta)}$ — минимальные значения ДЭ в пределах выбранного спектрального диапазона при заданном угле падения излучения на ДОЭ, полученные RCWA-методом и в рамках СТД, а $\eta_{EM,max}^{(\psi=0)}$ и $\eta_{S,max}^{(\theta=0)}$ — максимальные значения ДЭ в пределах выбранного спектрального диапазона, полученные соответствующим методом, но при нормальном падении излучения на ДОЭ ($\psi = \theta = 0$).

Сразу же отметим, что в настоящей работе, так же как и в работах [4,5], при расчете ДЭ RCWA-методом (в отличие от расчета в рамках СТД) учитываются френелевские потери, обусловленные отражением излучения от обоих рельефов. Это и является первопричиной отличия максимальных (в пределах выбранного спектрального диапазона) значений ДЭ, достигаемых при $\psi = \theta = 0$, т.е. $\eta_{EM,max}^{(\psi=0)}$ и $\eta_{S,max}^{(\theta=0)}$, полученных RCWA-методом и в рамках СТД соответственно.

Прежде чем перейти к представлению результатов наших исследований РФМ с двумя внутренними рельефами, отметим, что подобные исследования, но с использованием в качестве оценочной функции проинтегрированной по спектру ДЭ, уже проводились в ряде работ (см., например, [10,11]). Очевидно, что использование такой оценочной функции вполне уместно при анализе ДОЭ, предназначенных для концентрации полихроматического излучения, например солнечного. Однако такая оценочная функция мало чувствительна к провалам ДЭ на отдельных участках выбранного спектрального диапазона, а именно такие провалы могут приводить к возникновению гало у изображающих оптических систем.

В табл. 2 представлены полученные в рамках скалярной и строгой теорий дифракции результаты наших исследований РФМ с двумя внутренними рельефами, состоящей из полиметилметакрилата и поликарбоната. Глубина рельефа в полиметилметакрилате $h_1 = 15.1 \mu\text{m}$, а глубина рельефа в поликарбонате при расчете RCWA-методом оптимизировалась и превышала полученную в рамках СТД $h_2 = 11.7 \mu\text{m}$ не более чем на $0.01 \mu\text{m}$.

Сопоставляя данные табл. 1 и 2, легко видеть, что переход к РФМ с двумя внутренними рельефами привел в представляющем интерес интервале углов падения излучения ($0 \leq \psi \leq 15^\circ$) лишь к незначительному падению ДЭ (порядка 3–4%), но это потребовало увеличения периода микроструктуры Λ почти в 1.8 раза.

Исследование возможности уменьшения периода путем уменьшения суммарной глубины рельефов включало поиск оптимальных значений глубины рельефа h_2 для ряда убывающих значений глубины h_1 . При этом за оптимальное принималось значение глубины рельефа h_2 , которое обеспечивало в спектральном диапазоне

Таблица 2. Минимальная нормированная ДЭ, полученная RCWA-методом и в рамках СТД, для ряда значений углов падения излучения на двухслойную микроструктуру с двумя внутренними рельефами при $h_{\Sigma} = 26.81 \mu\text{m}$

Λ/h_1	$\eta_{EM,\min}^{(\psi)}/\eta_{EM,\max}^{(\psi=0)}$			$\eta_{S,\min}^{(\theta)}/\eta_{S,\max}^{(\theta=0)}$		
	$\psi = 10^\circ$	$\psi = 15^\circ$	$\psi = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 20^\circ$
10	0.900	0.897	0.843	0.952		
20	0.942	0.940	0.892			

$0.4 \leq \lambda \leq 0.7 \mu\text{m}$ и в интервале углов падения излучения $0 \leq \psi \leq 15^\circ$ максимально возможное значение ДЭ в точке ее минимума. Поиск показал, что в достаточно широком диапазоне значений глубины рельефа в полиметилметакрилате $8 \leq h_1 \leq 15.1 \mu\text{m}$ и при $10 \leq \Lambda/h_{\Sigma} \leq 20$ зависимость оптимальных значений h_2 от h_1 почти строго линейная:

$$h_2 \approx a + bh_1. \quad (3)$$

Здесь $a = -0.90 \mu\text{m}$, $b = 0.84$. Линейность указанной зависимости, сохраняющаяся для всех практически приемлемых пар материалов, из которых может компоноваться двухслойная РФМ, существенно облегчает поиск оптимального значения одной из глубин рельефа при заданном значении другой.

В табл. 3 представлены полученные в рамках строгой теории дифракции результаты оценки ДЭ для двух уменьшенных и характерных значений суммарной глубины рельефов.

Сопоставляя данные табл. 1–3, нетрудно видеть, что при одинаковых отношениях Λ/h_{Σ} нормированные ДЭ микроструктур с одним внутренним и с двумя внутренними микрорельефами, полученные RCWA-методом, весьма близки при глубинах рельефов, определенных СТД-методом ($h_1 = 15.1 \mu\text{m}$ и $h_2 = 11.7 \mu\text{m}$). При уменьшении суммарной глубины рельефов микроструктуры с двумя внутренними микрорельефами нормированная ДЭ монотонно снижается. В то же время характер зависимостей ДЭ от длины волны и угла падения излучения

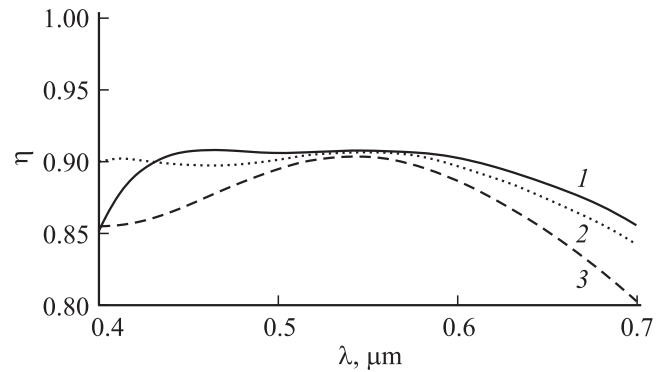


Рис. 3. Зависимости ДЭ, полученные методом RCWA при $\Lambda/h_{\Sigma} = 20$, от длины волны излучения, падающего вдоль нормали к подложке микроструктуры: 1 — $h_{\Sigma} = 26.81$, 2 — 21.12 , 3 — $13.78 \mu\text{m}$.

сохраняется (ср., например, кривые рис. 3 с кривыми рис. 4 работы [4] или рис. 3 работы [5]).

В работе [12] показано, что отрицательное влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого оптической системой с ДЭ, может не сказываться при снижении нормированной ДЭ вплоть до 0.85. Следовательно, имеется возможность значительного уменьшения h_{Σ} и соответственно минимально допустимой ширины самой узкой зоны пилообразного микрорельефа до уровня, необходимого для эффективной коррекции хроматизма и монохроматических aberrаций оптической системы, без риска снижения качества изображения из-за побочных порядков дифракции и, в частности, без риска появления гало.

Заключение

Результаты, представленные в настоящей работе, позволяют существенно снизить трудоемкость получения в рамках строгой теории дифракции оптимальных глубин двух внутренних микрорельефов двухслойной микроструктуры в зависимости от требований, предъявляемых

Таблица 3. Полученные RCWA-методом результаты оценки влияния суммарной глубины рельефов на ДЭ микроструктуры с двумя внутренними рельефами

Λ/h_{Σ}	$\psi, ^\circ$	$h_1, \mu\text{m}$	$h_2, \mu\text{m}$	$h_{\Sigma}, \mu\text{m}$	$\eta_{EM,\min}^{(\psi)}$	$\eta_{EM,\max}^{(\psi=0)}$	$\eta_{EM,\min}^{(\psi)}/\eta_{EM,\max}^{(\psi=0)}$
10	10	8	5.78	13.78	0.763	0.882	0.865
		12	9.12	21.12	0.814	0.898	0.906
	15	8	5.78	13.78	0.727	0.882	0.824
		12	9.12	21.12	0.796	0.898	0.887
20	10	8	5.78	13.78	0.799	0.889	0.898
		12	9.12	21.12	0.837	0.902	0.929
	15	8	5.78	13.78	0.758?	0.889	0.852
		12	9.12	21.12	0.832	0.902	0.923

к ДОЭ. Эти глубины обеспечат в заданных спектральном диапазоне и интервале углов падения излучения максимально возможное (для выбранной ширины самой узкой зоны пилообразного микрорельефа) значение ДЭ в точке ее минимума.

Несмотря на то, что представленные закономерности продемонстрированы на примере микроструктуры, скомпонованной только из одной пары коммерчески доступных оптических пластмасс — полиметилметакрилата и поликарбоната, они имеют общий характер. Действительно, замена материалов приводит лишь к изменению оптимальных значений глубин рельефов, даваемые СТД, и изменению значений размерного и безразмерного коэффициентов a и b в уравнении (3). К сожалению, другим парам из коммерчески доступных сегодня оптических пластмасс соответствуют большие оптимальные значения глубин рельефов, даваемые СТД. Именно этим и объясняется выбор авторами пары полиметилметакрилат/поликарбонат.

Двухслойные микроструктуры с минимизированной суммарной глубиной внутренних пилообразных рельефов представляют практический интерес и могут найти применение в изображающих системах, проекционных дисплеях и т. д.

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

Список литературы

- [1] Грейсук Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 1. С. 43.
- [2] Грейсук Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А. // Опт. и спектр. 2009. Т. 106. № 4. С. 694.
- [3] Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Stepanov S.A., Usievich B.A. // Opt. Commun. 2015. V. 338. P. 54.
- [4] Грейсук Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. // Опт. и спектр. 2015. Т. 118. № 6. С. 118.
- [5] Грейсук Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 56.
- [6] Zhao Y.H., Fan C.J., Ying C.F., Liu S.H. // Opt. Commun. 2013. V. 295. P. 104.
- [7] Choi J., Cruz-Cabrera A.A., Tanbakuchi A. Spectral Diffraction Efficiency Characterization of Broadband Diffractive Optical Elements. Sandia report SAND20132603. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2013. 30 p.
- [8] Moharam M.G., Gaylord T.K. // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. N 10. P. 1385.
- [9] Lyndin N.M. Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mcgrating.com>
- [10] Yang H., Xue C., Li C., Wang J. // Appl. Opt. 2016. V. 55. N 7. P. 1675.
- [11] Yang H., Xue C., Li C., Wang J., Zhang R. // Appl. Opt. 2016. V. 55. N 25. P. 7126.
- [12] Грейсук Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 3. С. 27.