

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.42

## ПОДАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХПОРЯДКОВЫХ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

© 2009 г. Г. И. Грейсух, доктор техн. наук; Е. Г. Ежов, доктор физ.-мат. наук;  
С. А. Степанов, доктор физ.-мат. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза

E-mail: grey@gasa.penza.com.ru

Теоретически исследованы и сопоставлены спектральные распределения дифракционной эффективности одно- и двухслойных рельефно-фазовых дифракционных микроструктур. Показано, что благодаря использованию второго слоя энергетическая спектральная селективность пилообразных микроструктур, предназначенных для формирования двух (одного из первых и нулевого) дифракционных порядков равной интенсивности, может быть существенно снижена.

Коды OCIS: 050.0050.

Поступила в редакцию 06.05.2008.

### Введение

Многopорядковые дифракционные оптические элементы составляют весьма широкий класс элементов, осуществляющих некоторые заданные преобразования падающего излучения в нескольких дифракционных порядках. Данный класс включает многopорядковые решетки и фокусаторы [1], бифокальные дифракционные линзы [2, 3] и т. д. При этом наиболее широкое применение находят элементы с рельефно-фазовой микроструктурой, сочетающие, благодаря современным технологиям изготовления, высокие потребительские качества с рентабельностью их массового производства.

Требуемое соотношение между дифракционными эффективностями (ДЭ) в нескольких дифракционных порядках рельефно-фазовой микроструктуры может быть получено на заданной длине волны

путем выбора формы и глубины рельефа. Однако с отходом длины волны падающего излучения от расчетного значения заданное соотношение между ДЭ в различных дифракционных порядках нарушается, что в ряде случаев может оказаться весьма существенным негативным фактором.

Для подавления зависимости ДЭ рельефно-фазовой микроструктуры от длины волны, т. е. для подавления энергетической спектральной селективности (ЭСС) и выравнивания ДЭ в заданном спектральном диапазоне, в работах [4–6] предложено компоновать микроструктуру из нескольких, и в частности из двух, оптических материалов. В последнем случае микроструктура может иметь один или два рельефа, как показано на рис. 1.

В случае двухслойной рельефно-фазовой микроструктуры с одним внутренним рельефом требуемое подавление ЭСС возможно, как показано в

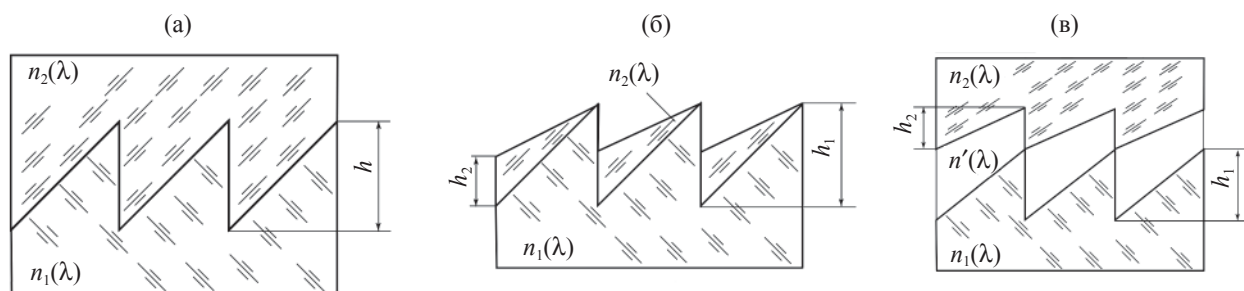


Рис. 1. Двухслойные пилообразные рельефно-фазовые микроструктуры с ослабленной ЭСС. а – с одним внутренним рельефом, б – с внутренним и наружным рельефами, в – с двумя внутренними рельефами.

работах [4, 5], только при условии, что с ростом длины волны разность показателей преломления двух оптических материалов неуклонно возрастает. Поэтому материалы двух слоев должны иметь разную дисперсию и материал с меньшей дисперсией должен иметь больший показатель преломления. При использовании стекол это реализуется парой, включающей крон (малая дисперсия) и флинт (большая дисперсия), причем показатель преломления кроны должен превышать показатель преломления флинта [7].

Что касается пластмасс, позволяющих организовать массовое производство дифракционных элементов путем копирования микроструктуры, то их выбор весьма ограничен и кроноподобные пластмассы [типа акрила или полиметилметакрилата (ПММА)] имеют меньший показатель преломления, чем флинтподобные [типа полистирола или поликарбоната (ПК)]. Для подавления ЭСС дифракционных микроструктур, выполненных из таких материалов, в работе [6] предложено использовать два рельефа разной глубины. Методика и результаты исследования влияния глубин рельефов на достижимую степень подавления ЭСС приведены в работе [8]. При этом необходимо отметить, что в работах [4–8] подавление ЭСС рассматривалось в одном (на пилообразных рельефах) или двух симметричных рабочих порядках дифракции ( $+1$ -м и  $-1$ -м на бинарных рельефах) при глубинах, обеспечивающих максимально достижимую ДЭ в этих порядках. В то же время известны задачи, требующие, чтобы у дифракционного элемента заданное соотношение ДЭ выполнялось для несимметричных порядков дифракции. Одним из характерных примеров такого элемента является бифокальная дифракционная линза, вносящая сферическую аберрацию в волновой фронт, формируемый только в одном дифракционном порядке. Однослойная микроструктура такой дифракционной линзы имеет пилообразный рельеф с глубиной, обеспечивающей приращение оптического пути на одном периоде рельефа, равное половине длины волны, для которой рассчитывается рельеф. Благодаря этому значения ДЭ на расчетной длине волны  $\lambda_c$  в одном из первых и нулевом порядках дифракции равны между собой и составляют примерно 0,4 [3].

### Аппарат и результаты исследований

Оценить уровень ЭСС дифракционной микроструктуры и сравнить неравномерность ДЭ структур разного типа можно, например, вычислив для них относительные изменения эффективностей по формуле

$$\delta\eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\eta_c} 100\%, \quad (1)$$

где  $\eta_{\max}$  и  $\eta_{\min}$  – максимальное и минимальное значения ДЭ в пределах заданного спектрального диапазона,  $\eta_c$  – ДЭ на длине волны  $\lambda_c$ . Для вычисления самой ДЭ однослойной микроструктуры можно воспользоваться выражением, полученным в скалярном приближении и приведенным в работе [9]:

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

Здесь  $m$  – номер порядка дифракции,  $\lambda$  – длина волны падающего на микроструктуру излучения,  $k$  – число уровней в ступенчатом рельефе ( $k = 2$  при бинарном и  $k \rightarrow \infty$  при пилообразном рельефе),  $\Delta l$  – приращение оптического пути на одном периоде ступенчатого рельефа на длине волны  $\lambda$ .

Приращение оптического пути  $\Delta l$  связано с глубиной рельефа  $h$  простым соотношением

$$\Delta l = h(n - 1), \quad (3)$$

а сама глубина рельефа может быть определена по формуле [9]

$$h = p\lambda_c \frac{k-1}{k(n_c-1)}, \quad (4)$$

где  $n_c$  – показатель преломления материала микроструктуры на длине волны  $\lambda_c$ . Что касается коэффициента  $p \leq 1$ , то он позволяет уменьшать глубину рельефа для перераспределения энергии между дифракционными порядками. Полагая  $k \rightarrow \infty$ , формулу (2) можно привести к виду, наиболее удобному для исследования микроструктур с идеальным пилообразным рельефом:

$$\eta = \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi(m + \Delta l/\lambda)}{\lambda}\right]}{\pi(m + \Delta l/\lambda)} \right\}^2. \quad (5)$$

Используя формулы (1)–(5), нетрудно показать, что на расчетной длине волны  $\lambda_c$  бинарный рельеф однослойной структуры обеспечивает  $\eta \approx 0,405$  при  $p = 1$  и  $m = \pm 1$ , а пилообразный рельеф дает  $\eta = 1$  при  $p = 1$  и  $m = -1$  или  $\eta \approx 0,405$  при  $p = 0,5$  и  $m = -1$  и  $m = 0$ . В видимом спектральном диапазоне от  $\lambda_{\min} = 0,4$  мкм до  $\lambda_{\max} = 0,7$  мкм минимально возможное относительное изменение ДЭ однослойной микроструктуры, выполненной из ПММА, достигаемое при  $\lambda_c = 0,5(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})$  составляет 36% в случае бинарного рельефа, 45% в случае пилообразного рельефа, обеспечивающего единственный ненулевой порядок дифракции, и 128% в случае двухпо-

рядкового пилообразного рельефа. Расчеты проводились для пластика с показателем преломления  $n_d = 1,491756$  и числом Аббе  $v_d = 57$ . (Показатели преломления и числа Аббе здесь и ниже приводятся на желтой  $d$ -линии гелия  $\lambda_d = 0,58756$  мкм).

Представленные результаты подтверждают настоятельную необходимость поиска эффективных путей подавления ЭСС рельефно-фазовых микроструктур и в первую очередь пилообразной структуры, обеспечивающей равные ДЭ в несимметричных порядках дифракции.

Наряду с ДЭ однослойной рельефно-фазовой микроструктуры формулы (2) и (5) позволяют вычислять эффективность и многослойных структур. Для этого необходимо лишь выразить приращение оптического пути на одном периоде микроструктуры через глубины рельефов и показатели преломления используемых оптических материалов. В случае двухслойных микроструктур, представленных на рис. 1, приращения оптического пути на одном периоде описываются выражениями

$$\Delta l = h(n_1 - n_2) \quad (6)$$

для структуры с одним внутренним рельефом (рис. 1а);

$$\Delta l = (n_1 - 1)h_1 - (n_2 - 1)h_2 \quad (7)$$

для структуры с внутренним и наружным рельефами (рис. 1б);

$$\Delta l = (n_1 - n')h_1 - (n_2 - n')h_2 \quad (8)$$

для структуры с двумя внутренними рельефами (рис. 1в).

В случае если два материала микроструктуры, изображенной на рис. 1в, разделены воздушным промежутком ( $n' = 1$ ), то формулы (7) и (8) совпадают, а следовательно, при равенстве одинаково обозначенных глубин будут совпадать и ДЭ. В то же время (как легко видеть, сопоставив рис. 1б и 1в) полная глубина рельефа при равных ДЭ у микроструктуры с внутренними рельефами больше, чем у микроструктуры с наружным рельефом. С ростом полной глубины рельефа усиливается зависимость ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру, а сама ДЭ может оказаться существенно меньшей, чем прогнозирует скалярное и бесконечно тонкое приближение. Поэтому практическое использование варианта с двумя внутренними рельефами может быть оправдано только ощутимыми технологическими преимуществами, открывающимися при решении конкретной задачи. Учитывая вышеизложенное, исследования зависимости достижимой степени ослабления ЭСС от глубин рельефов проводились для микроструктур, представленных на рис. 1а и 1б.

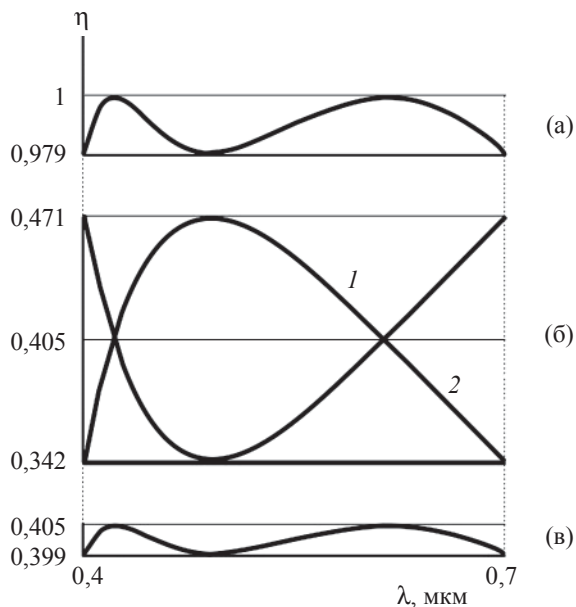
Оптимальные значения глубин рельефов  $h$ ,  $h_1$  и  $h_2$  определялись итерационно путем минимизации оценочной функции (1), причем под  $\eta_c$  в этом случае понималось значение, к которому должна стремиться ДЭ в выбранном порядке дифракции на всех длинах волн заданного диапазона. Очевидно, что при полном подавлении ЭСС оценочная функция  $\delta\eta = 0$ .

Исследования двухслойных одно- и двухрельефных пилообразных микроструктур показали, что оптимальные соотношения глубин рельефов, обеспечивающие подавление ЭСС одновременно в нулевом и  $-1$ -м порядках дифракции, совпадают с оптимальными соотношениями глубин рельефов соответствующих однопорядковых микроструктур, при условии компоновки сопоставляемых структур из одних и тех же пар оптических материалов. При этом сами глубины у двухпорядковых микроструктур в два раза меньше.

Таким образом, рекомендации относительно выбора “крон-флинтových” пар стекол для микроструктур с одним внутренним рельефом, приведенные в работе [7], и методика определения оптимальных глубин двухрельефных структур, изложенная в работе [8], полностью применимы для подавления ЭСС двухпорядковых пилообразных микроструктур. Кроме того, вышеупомянутые рекомендации и методика в полной мере применимы и к двухслойным бинарным структурам с одним или двумя рельефами, так как оптимальные глубины их рельефов совпадают с глубинами соответствующих пилообразных двухпорядковых микроструктур.

Что же касается степени подавления ЭСС и распределения ДЭ по длинам волн в нулевом и  $-1$ -м порядках дифракции двухслойных одно- и двухрельефных пилообразных микроструктур, то они существенно отличаются от характеристик соответствующих однопорядковой пилообразной и двухпорядковой бинарной структур. Продемонстрируем это на примере двухслойных структур с одним внутренним рельефом, составленных из двух марок стекла, и структур с внутренним и наружным рельефами, составленных из двух типов оптических пластмасс. У структур с одним внутренним рельефом для нижнего слоя (см. рис. 1а) использовался сверхтяжелый крон E65-40 из каталога OLD\_CORN ( $n_d = 1,865000$ ,  $v_d = 40$ ), а для верхнего слоя - флинт FD6 из каталога HOYA ( $n_d = 1,805184$ ,  $v_d = 25$ ). У структур с внутренним и наружным рельефами (см. рис. 1б) использовались пластмассы ПММА и ПК ( $n_d = 1,585470$ ,  $v_d = 30$ ) для нижнего и верхнего слоя соответственно.

На рис. 2 представлены кривые спектрального распределения ДЭ исследуемых пилообразных и



**Рис. 2.** Кривые спектрального распределения ДЭ пилообразных структур, обеспечивающих единственный ненулевой порядок дифракции (а), двухпорядковых пилообразных (б) и бинарных микроструктур (в). 1 и 2 распределения ДЭ в  $-1$ -м и нулевом порядках дифракции соответственно.

бинарных микроструктур. Кривая на каждом из графиков одновременно относится как к однорельефной структуре, выполненной из стекла двух марок, так и к двухрельефной структуре, выполненной из двух типов пластмасс, так как отличия соответствующих ДЭ в пределах спектрального диапазона от 0,4 до 0,7 мкм составляют менее 1%.

Кривая распределения ДЭ пилообразных структур, обеспечивающих единственный ненулевой порядок дифракции ( $m = -1$ ), представленная на рис. 2а, строилась для структуры с одним внутренним рельефом при его оптимальной глубине  $h = 10,05$  мкм, а для структуры с двумя рельефами – при оптимальных глубинах  $h_1 = 15,95$  мкм и  $h_2 = 12,37$  мкм. Кривые распределений ДЭ двухпорядковых пилообразных ( $m = -1$  и  $m = 0$ ) и бинарных структур ( $m = \pm 1$ ), представленные на рис. 2б и 2в, строились для структур с одним внутренним рельефом при его оптимальной глубине  $h = 5,25$  мкм, а для структур с двумя рельефами – при оптимальных глубинах  $h_1 = 7,98$  мкм и  $h_2 = 6,18$  мкм.

Из рис. 2 следует, что относительные изменения ДЭ в пределах вышеуказанного спектрального диапазона у двухслойных структур составляют 1,8% в случае двухпорядкового бинарного рельефа, 2,4% в случае пилообразного рельефа, обеспечивающего

единственный ненулевой порядок дифракции, и 32% в случае двухпорядкового пилообразного рельефа.

## Заключение

Сопоставляя результаты, приведенные в настоящей работе, нетрудно видеть, что степень подавления ЭСС соответствующих двухслойных рельефно-фазовых структур, выполненных из исследовавшихся пар оптического стекла и кроно- и флинтоподобных пластмасс, практически совпадает. При этом если ЭСС однопорядковых пилообразных и двухпорядковых бинарных микроструктур благодаря использованию второго слоя может быть снижена почти в 20 раз, то у двухпорядковых микроструктур с пилообразным рельефом достижимое снижение не более чем четырехкратное. В то же время отметим, что даже двукратное снижение ЭСС обеспечивает в ряде случаев существенное улучшение характеристик оптических систем, например, систем, включающих двухфокусные дифракционные линзы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.
2. Коронкевич В.П., Пальчикова И.Г., Полеицук А.Г. Бифокальный микроскоп с киноформными оптическими элементами // Автометрия. 1987. № 6. С. 15–22.
3. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Корольков В.П. и др. Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных интраокулярных линз // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 1. С. 50–58.
4. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафигов Р.А. Голограммный оптический элемент // Патент России № 1271240. 1996.
5. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
6. Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system having the same // Patent № US 20010038503A1. 2001.
7. Грейсук Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Выбор материалов для “ахроматизации” рельефно-фазовых дифракционных структур // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. №1. С. 43–46.
8. Грейсук Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. Подавление зависимости дифракционной эффективности отражательных двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур от длины волны // Сб. трудов. 5-й междунар. конф. “ГОЛОЭКСПО-2008” (HOLOEXPO-2008). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
9. Greisukh G. I., Bobrov S. T., Stepanov S. A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.