

# Предельные спектральные и угловые характеристики многослойных рельефно-фазовых дифракционных микроструктур

Г.И.Грейсух, Е.Г.Ежов, А.И.Антонов, В.А.Данилов, Б.А.Усиевич

*Методы оценки параметров рельефно-фазовых дифракционных микроструктур (локального и интегрального Q-факторов) распространены на случай многослойных двухрельфных пилообразных микроструктур, что обеспечивает возможность выбора наилучших комбинаций оптических материалов для многослойных микроструктур при весьма незначительных затратах компьютерного времени. Предложен подход к исследованию многослойных микроструктур, основанный на совместном использовании Q-факторов и метода строгого анализа связанных волн, который позволил оценить предельные спектральные и угловые характеристики многослойных микроструктур различных типов.*

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

## 1. Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) благодаря своим уникальным аберрационным свойствам представляют значительный интерес для изображающих оптических систем, предназначенных для работы с полихроматическим излучением. 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 для ограниченного набора оптических материалов, из которых можно изготовить преломляющие поверхности прецизионной штамповкой [1–5]. Однако зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны и угла падения излучения на ДОЭ, а также технологические сложности, сопровождающие подавление указанной зависимости, до настоящего времени являются серьезным препятствием для широкого практического использования ДОЭ в таких системах. Здесь, конечно, в первую очередь имеются в виду объективы фото- и видеокамер мобильных устройств и устройств видеонаблюдения для массового производства, линзы которых тиражируются сегодня путем прецизионной штамповки. Поэтому конкурентоспособная технология нанесения на сферическую или асферическую преломляющую поверхность пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры с подавленной спектральной и угловой энергетической зависимостью несомненно открыла бы путь к широкому внедрению

рефракционно-дифракционной оптики в массовое производство высококачественных фото- и видеокамер.

Известные эффективные решения для ослабления зависимости ДЭ пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры от длины волны и угла падения излучения на элемент предполагают переход от однослойных пилообразных микроструктур к структурам, содержащим несколько слоев и рельефов [6–14], как это показано на рис. 1 и 2.

В рамках скалярной теории дифракции (СТД) зависимость ДЭ многослойной пилообразной микроструктуры в первом рабочем порядке дифракции от длины волны  $\lambda$  и угла падения излучения на микроструктуру можно рассчитывать по формуле [15]

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

где  $\Delta l$  – приращение оптического пути на одном периоде микроструктуры.

В случае трехслойной микроструктуры с двумя внутренними рельефами (рис. 1) приращение оптического пути описывается выражением [11]

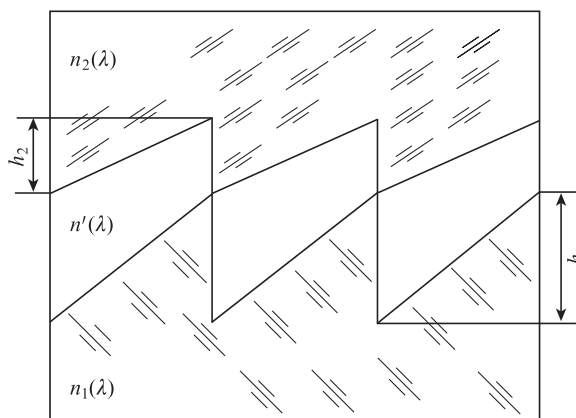


Рис. 1. Трехслойная двухрельфная пилообразная микроструктура.

Г.И.Грейсух, Е.Г.Ежов, А.И.Антонов. Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Россия, 440028 Пенза, ул. Германа Титова, 28; e-mail: grey@pguas.ru

В.А.Данилов. Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Россия, 117342 Москва, ул. Бултерова, 15

Б.А.Усиевич. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г., после доработки – 19 марта 2020 г.

$$\Delta l = h_1 \left[ \sqrt{n_1^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} \right] - h_2 \left[ \sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} \right]. \tag{2}$$

Здесь и далее предполагается, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления  $n_1(\lambda)$ , а угол падения  $\theta$  отсчитывается от нормали к подложке.

Для двухслойных микроструктур с двумя внутренними (рис.1 при  $n' = 1$ ), а также с внутренним и наружным рельефами (рис.2,*a*) приращение оптического пути можно вычислить по формуле [11]

$$\Delta l = h_1 \left[ \sqrt{n_1^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right] - h_2 \left[ \sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right]. \tag{3}$$

Здесь сразу же отметим, что если с точки зрения СТД микроструктуры, представленные на рис.1 при  $n' = 1$  и на рис.2,*a*, абсолютно подобны, то в строгой теории дифракции они различаются по эффективной глубине рельефа  $h_{\text{eff}}$ . Микроструктуры на рис.1 и рис.2,*a* имеют  $h_{\text{eff}} = h_1 + h_2$  и  $h_{\text{eff}} = h_1$  соответственно.

Что касается приращения оптического пути для двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры (рис.2,*б*), то оно описывается выражением [11]

$$\Delta l = h \left[ \sqrt{n_2^2(\lambda) - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_1^2(\lambda) - \sin^2 \theta} \right]. \tag{4}$$

Из выражения (1) видно, что стопроцентная ДЭ ( $\eta_s = 1$ ) достигается при условии  $\Delta l(\lambda) = \lambda$ . Даже приближенное выполнение этого условия в сколько-нибудь широком спектральном диапазоне возможно только при определенном соотношении между показателями преломления и коэффициентами дисперсии материалов слоев. Из выражений (3) и (4) следует принципиальное различие в тре-

бованиях к парам оптических материалов для однорельефных и двухрельефных микроструктур.

В случае двухрельефных микроструктур для того оптического материала, показатель преломления которого больше, дисперсия также должна быть больше, т.е. разность показателей преломления  $n_2(\lambda) - n_1(\lambda)$  с увеличением длины волны должна уменьшаться (что может быть достигнуто комбинацией обычного флинтоподобного и кроноподобного материалов). В случае же однорельефных микроструктур для того оптического материала, показатель преломления которого больше, дисперсия должна быть меньше, т.е. разность  $n_2(\lambda) - n_1(\lambda)$  с увеличением длины волны должна увеличиваться (что может быть достигнуто комбинацией тяжелого кроноподобного и легкого флинтоподобного материалов). К сожалению, сегодня среди технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс отсутствуют пары с требуемым соотношением оптических констант. Ситуация несколько изменилась благодаря тяжелым кронам, имеющимся среди недавно разработанных специальных марок стекла (glass for molded optics lenses, GMOL) [16]. Линзы из этих материалов могут легко тиражироваться прецизионным литьем или штамповкой. Практически без удорожания таким способом могут тиражироваться и линзы с дифракционным микрорельефом на сферической или даже асферической поверхности (см., напр., [17]). Однако даже лучшие комбинации «оптическая пластмасса – GMOL» не позволяют в достаточной степени ослабить зависимость ДЭ от длины волны и угла падения излучения на ДОО. Поэтому поиск новых приемлемых оптических материалов как для однорельефных, так и для двухрельефных микроструктур продолжается. Цель же настоящей статьи заключается в том, чтобы, развив необходимый инструментарий, способствовать поиску таких материалов, сопоставить характеристики пилообразных микроструктур, скомпонованных из уже найденных комбинаций оптических материалов, и оценить, насколько эти характеристики близки к предельно возможным.

## 2. Локальный и интегральный Q-факторы многослойных рельефно-фазовых дифракционных микроструктур

Предварительно оценить в рамках СТД, насколько характеристики многослойной пилообразной микроструктуры близки к предельно возможным, позволяет, в частности, расчет отклонения приращения оптического пути на одном периоде микроструктуры  $\delta \Delta l(\lambda_i)$  от прямой  $\Delta l_{\text{lin}}(\lambda_i)$ , в каждой точке которой  $\eta_s = 1$ :

$$\Delta l_{\text{lin}}(\lambda_i) = \lambda_i. \tag{5}$$

Будем полагать, что приращение оптического пути на одном периоде микроструктуры

$$\Delta l(\lambda_i) = \Delta l_{\text{lin}}(\lambda_i) + \delta \Delta l(\lambda_i) = \lambda_i + \delta \lambda_i, \tag{6}$$

откуда с учетом условия (5) получаем

$$\frac{\delta \Delta l(\lambda_i)}{\lambda_i} = \frac{\delta(\lambda_i)}{\lambda_i} = Q_i, \tag{7}$$

или, в соответствии с выражением (6),

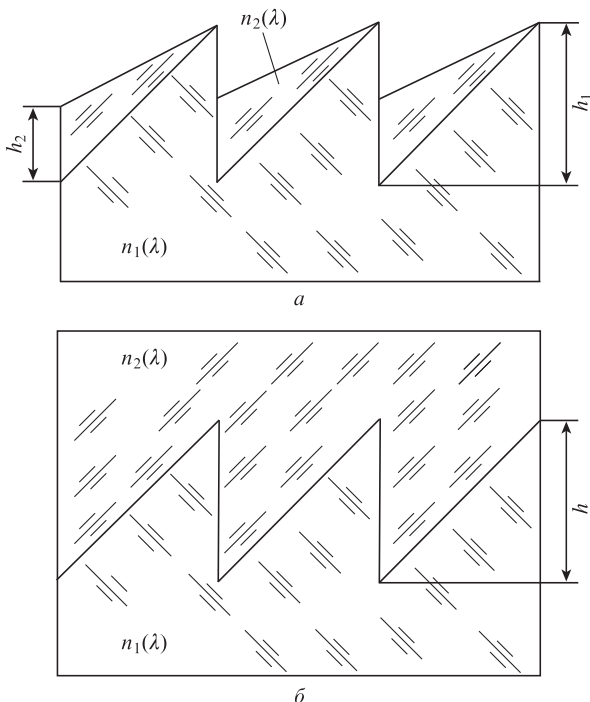


Рис.2. Двухслойная пилообразная микроструктура с внутренним и наружным рельефами (а) и однорельефная микроструктура (б).

$$Q_i = \frac{\Delta I(\lambda_i)}{\lambda_i} - 1. \quad (8)$$

Абсолютное значение  $Q_i$  определяет, насколько уменьшится  $\eta_s$  для длины волны  $\lambda_i$ . Учесть же негативное последствие нелинейности зависимости  $\Delta I(\lambda)$  в пределах всего рабочего спектрального диапазона ( $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ ) можно с помощью среднеквадратичного значения  $Q_i$ , и этот параметр предлагается называть интегральным  $Q$ -фактором микроструктуры:

$$Q_{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{i_{\max}} \sum_1^{i_{\max}} Q_i^2}. \quad (9)$$

Целесообразность использования того или иного оценочного параметра зависит от решаемой задачи. Если предполагается ввести ДОО в спектральный прибор или в изображающую оптическую систему и если дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекватным является локальный  $Q$ -фактор, равный максимальному абсолютному значению параметра  $Q_i$ , т. е.  $Q_{\text{loc}} = |Q_i|_{\max}$ . В случае же применения ДОО, например в качестве концентратора солнечной энергии, наиболее адекватным является оценочный параметр  $Q_{\text{int}}$ .

Конкретный вид выражений (8) и (9) и процедура их использования для рационального выбора комбинаций оптических материалов, а также для оценки того, насколько характеристики скомпонованной из них микроструктуры близки к предельно возможным, зависят от типа микроструктуры. В простейшем случае двухслойной однорельефной микроструктуры выражения (8) и (9) при  $\theta = 0$  имеют вид [18]

$$Q_i = \frac{\delta \Delta n(\lambda_i)}{\Delta n_{\text{lin}}(\lambda_i)}, \quad (10)$$

$$Q_{\text{int}} = \sqrt{\frac{1}{i_{\max}} \sum_1^{i_{\max}} \{[\Delta n(\lambda_i) - \Delta n_{\text{lin}}(\lambda_i)] / \Delta n_{\text{lin}}(\lambda_i)\}^2}, \quad (11)$$

где

$$\delta \Delta n(\lambda_i) = \Delta n(\lambda_i) - \Delta n_{\text{lin}}(\lambda_i);$$

$$\Delta n(\lambda_i) = n_2(\lambda_i) - n_1(\lambda_i); \quad (12)$$

$$\Delta n_{\text{lin}}(\lambda_i) = \lambda_i \Delta n(\bar{\lambda}) / \bar{\lambda};$$

$\bar{\lambda}$  – центральная длина волны рабочего спектрального диапазона. Глубина рельефа в соответствии с (4) вычисляется по формуле

$$h = \bar{\lambda} / [n_2(\bar{\lambda}) - n_1(\bar{\lambda})]. \quad (13)$$

Очевидно, что перебор всех оптических материалов из соответствующих каталогов основных мировых производителей с целью минимизации одного из выбранных оценочных параметров ( $Q_{\text{loc}}$  или  $Q_{\text{int}}$ ) позволит получить оптимальную комбинацию оптических материалов при весьма незначительных затратах компьютерного времени.

Процедура определения оптимальной комбинации материалов трехслойной двухрельефной микроструктуры несколько сложнее. Прежде всего необходимо для исходной

тройки оптических материалов и начальной глубины рельефа  $h_1 \geq 10\bar{\lambda}$  найти соотношение глубин рельефов, обеспечивающее на длине волны  $\bar{\lambda}$  при нормальном падении излучения ( $\theta = 0$ ) оптическую разность хода  $\Delta I(\bar{\lambda}) = \bar{\lambda}$  и, следовательно,  $\eta_s = 1$ . Из формулы (2) получаем

$$k = \frac{h_2}{h_1} = \frac{n_1(\bar{\lambda}) - n'(\bar{\lambda})}{n_2(\bar{\lambda}) - n'(\bar{\lambda})} - \frac{\bar{\lambda}}{h_1 [n_2(\bar{\lambda}) - n'(\bar{\lambda})]}. \quad (14)$$

Оценочный параметр  $Q_i$  будет вычисляться по формуле (8) с использованием выражения

$$\Delta I(\lambda_i) = h_1 \{ [n_1(\lambda_i) - n'(\lambda_i)] - k [n_2(\lambda_i) - n'(\lambda_i)] \}. \quad (15)$$

При фиксированных параметрах  $h_1$  и  $k$  необходимо получить набор значений  $Q_i$  для ряда длин волн, удовлетворяющих условию  $\lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}$ . Данный набор даст возможность определить промежуточные значения локального ( $Q_{\text{loc}}$ ) и/или интегрального ( $Q_{\text{int}}$ ) оценочного параметров. Эти значения будут характеризовать максимальное снижение ДЭ микроструктуры, скомпонованной из выбранной тройки оптических материалов, в пределах заданного спектрального диапазона при начальной глубине рельефа  $h_1$ . Итерационный процесс по  $h_1$  позволит найти оптимальные глубины рельефов, обеспечивающие минимально возможное снижение ДЭ микроструктуры, скомпонованной из выбранной тройки оптических материалов. Перебор всех оптических материалов из соответствующих каталогов основных мировых производителей даст возможность получить микроструктуру, для которой снижение ДЭ в пределах заданного спектрального диапазона минимально. Переход к двухслойной ( $n' = 1$ ) двухрельефной микроструктуре лишь упростит перебор оптических материалов.

Далее следует отметить, что  $Q$ -факторы позволяют лишь оперативно сопоставить комбинации оптических материалов для многослойной пилообразной микроструктуры и отобрать из них наиболее перспективные. Получить же достоверную оценку зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру можно только в рамках строгой теории дифракции путем решения системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями, в частности так называемым строгим методом анализа связанных волн (rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [19]. При этом следует учесть, что модуль отрицательного угла падения излучения на микроструктуру  $|\psi_-|$  и положительный угол падения  $\psi_+$ , при которых происходит снижение ДЭ, оцениваемой RCWA-методом, до одного и того же значения, могут существенно различаться. Поэтому за оценочный, т. е. за максимально допустимый угол  $\Psi$ , в настоящей статье, как и в работах [11–14], принят наименьший из углов  $|\psi_-|$  и  $\psi_+$ . Как и при расчетах в рамках СТД, далее предполагается, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления  $n_1(\lambda)$ , а угол  $\Psi$  отсчитывается от нормали к подложке.

Очевидно, что оценка оптимальной глубины рельефа микроструктуры и максимально допустимого угла падения излучения на нее зависит от выбора соответствующего критерия. Если предполагается использовать ДОО в спектральном приборе или в изображающей оптической системе и если, как уже отмечалось, дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекват-

ным является критерий, предложенный в работе [15]. Согласно ему глубины рельефов считаются оптимальными, если они обеспечивают максимально возможный диапазон углов падения излучения в выбранном спектральном диапазоне, в пределах которого ДЭ (в точке ее минимума) не опускается ниже минимально допустимого значения, равного 0.95 от максимального значения ДЭ при нормальном падении излучения на подложку микроструктуры ( $\eta_{EM\min}^{(\psi)} / \eta_{EM\max}^{(\psi=0)} \geq 0.95$ ). Это значение гарантирует отсутствие не только гало, но и любого другого визуально наблюдаемого отрицательного влияния боковых дифракционных порядков на качество изображения, формируемого оптической системой с ДОЭ. Этот критерий был успешно использован в целом ряде работ (см., напр., [13, 14, 20]).

Если выбранные комбинации оптических материалов и глубины рельефов обеспечивают для пилообразной микроструктуры равенство нулю обоих  $Q$ -факторов ( $Q_{loc} = Q_{int} = 0$ ), то ее ДЭ, рассчитанная RCWA-методом при нормальном падении излучения,  $\eta_{EM}^{(\psi=0)}$  будет отличаться от единицы для всех длин волн рабочего спектрального диапазона лишь на величину френелевских потерь. Максимально допустимый угол падения излучения (т.е. оценочный угол  $\Psi$ , соответствующий  $\eta_{EM\min}^{(\psi)} / \eta_{EM\max}^{(\psi=0)} \geq 0.95$ ) при оптимальных глубинах рельефов будет зависеть только от типа микроструктуры и отношения  $P = \Lambda / h_{eff}^{opt}$  ее пространственного периода к оптимальной эффективной глубине рельефа. В результате семейство зависимостей ДЭ

от угла падения излучения  $\eta_{EM}(\psi)$ , полученных при  $Q_{loc} = Q_{int} = 0$  для ряда значений  $P$ , можно рассматривать как предельную характеристику микроструктуры данного типа.

### 3. Сравнительный анализ двухслойных пилообразных микроструктур

Двухслойные одно- и двухрельефные пилообразные микроструктуры, скомпонованные из ряда пар оптических материалов, для которых достигнуто максимальное ослабление спектральной и угловой зависимости ДЭ, представлены в табл.1.

В пределах спектрального диапазона и интервала углов падения излучения на микроструктуру, приведенных в табл.1, нормированная ДЭ ( $\eta_{EM\min}^{(\psi)} / \eta_{EM\max}^{(\psi=0)}$ ), оцененная RCWA-методом, не опускается ниже 0.95. Оптимальная глубина рельефа и максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру, получены с использованием двух компьютерных программ, реализующих RCWA-метод: MC grating program и RCWA-PSUACE [22, 23]. В последнем столбце табл.1 в каждой строке указана работа, в которой впервые исследовалась микроструктура, скомпонованная из данной пары оптических материалов. Все двухслойные двухрельефные микроструктуры имеют внутренний и наружный рельефы (см. рис.2,а).

Результаты расчетов, приведенные в работах [11, 12, 20], а также в настоящей статье, получены с помощью дисперсионных формул технологичных и коммерчески доступ-

Табл.1. Параметры и угловые характеристики ряда одно- и двухрельефных микроструктур.

Тип микро-структуры	Номер микро-структуры	Оптические материалы двух слоев с показателями преломления $n_1/n_2$	Оптимальные глубина $h^{opt}$ или глубина $h_1^{opt}(h_2^{opt})$ рельефов (мкм)	$\lambda_{min} - \lambda_{max}$ (мкм)	$Q_{loc}$	$Q_{int}$	$\Psi$ (град)	Литература
Однорельефная	1	E48R/Toluene	15.09	0.4–0.7	0.1353	0.058	21.7 при $P = 10$ 28.3 при $P = 20$ 33.2 при $P = 30$	[11]
	2	AL-6263/M-LAC8	7.319	0.4–0.7	0.1366	0.061	13.0 при $P = 10$ 18.0 при $P = 20$ 21.8 при $P = 30$	[20]
	3	Nanocomposite: diamond in PMMA/ITO in PMMA	3.2	0.4–0.8	0.0452	0.016	36.3 при $P = 10$ 45.8 при $P = 20$ 50.0 при $P = 30$	[21]
	4	Nanocomposite: diamond in PMMA/mathematical model	3.2	0.4–0.8	0	0	37.7 при $P = 10$ 48.5 при $P = 20$ 53.5 при $P = 30$	[18]
	5	Nanocomposite: ZrO <sub>2</sub> in PMMA/PC	18.9	0.4–0.8	0.1792	0.070	4.0 при $P = 10$ 6.3 при $P = 20$ 15.7 при $P = 30$	[21]
	6	Nanocomposite: ZrO <sub>2</sub> in PMMA/mathematical model	24.6	0.4–0.8	0	0	25.6 при $P = 10$ 41.7 при $P = 20$ 47.3 при $P = 30$	[18]
Двухрельефная	7	PMMA/PC	15.1(11.7)	0.4–0.7	0.1283	0.058	3.2 при $P = 10$ 15.0 при $P = 20$ 16.8 при $P = 30$	[12]
	8	PMMA/mathematical model	15.1(11.79)	0.4–0.7	0	0	3.6 при $P = 10$ 26.5 при $P = 20$ 27.0 при $P = 30$	настоящая работа
	9	E48R/PS	16.3(13.69)	0.4–0.7	0.1193	0.054	4.3 при $P = 10$ 15.5 при $P = 20$ 19.4 при $P = 30$	настоящая работа
	10	E48R/mathematical model	16.3(13.76)	0.4–0.7	0	0	7.7 при $P = 10$ 26.1 при $P = 20$ 28.2 при $P = 30$	настоящая работа

ных пластмасс PMMA, POLYCARB (PC), POLYSTYR (PS), E48R и AL-6263 (OKP4HT) из каталогов Misc и Zeon, включенных в базу данных Glasscat компьютерной программы оптического проектирования Zemax [24], а также из раздела Optical plastic for molded lenses каталога фирмы Fiber Optic Center [25]. Кроме того, при расчетах использовались дисперсионные формулы оптической жидкости Toluene и GMOL M-LAC8, представленные в работах [26] и [27] соответственно.

Одно- и двухрельфные микроструктуры, указанные в табл.1 демонстрируют определенную корреляцию  $Q$ -факторов и максимально допустимых углов падения излучения. Хотя о точном соответствии параметров, полученных в рамках СТД, и углов, рассчитанных RCWA-методом, говорить не приходится.

Угловые характеристики однорельфных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов (микроструктуры 1 и 2), весьма близки, но значительно уступают характеристикам микроструктуры 3. Эта микроструктура, скомпонованная из нанокompозитных материалов и рассчитанная на расширенный спектральный диапазон, имеет существенно бóльшие допустимые углы. Для того чтобы определить, являются ли эти углы предельными для двухслойной однорельфной пилообразной микроструктуры, в работе [18] было предложено заменить один из оптических материалов микроструктуры такой математической моделью, которая обеспечит выполнение равенства  $Q_{loc} = Q_{int} = 0$ . Для анализа были выбраны микроструктуры 3 и 5, имеющие минимальные и максимальные значения  $Q$ -факторов и, следовательно, наибольшие и наименьшие допустимые углы падения излучения на микроструктуру.

У модельной микроструктуры 4, как и у микроструктуры 3, нижний слой, на который из воздуха падает излучение, выполнен из материала nanocomposite: diamond in PMMA. Его коэффициент дисперсии вычисляется по формуле

$$v_{\bar{\lambda}} = (n_{\bar{\lambda}} - 1)/(n_{\lambda_{min}} - n_{\lambda_{max}}), \tag{16}$$

где  $n_{\lambda_{min}}$ ,  $n_{\bar{\lambda}}$  и  $n_{\lambda_{max}}$  – показатели преломления среды на минимальной ( $\lambda_{min} = 0.4$  мкм), центральной ( $\bar{\lambda} = 0.6$  мкм) и максимальной ( $\lambda_{max} = 0.8$  мкм) длинах волн выбранного спектрального диапазона. При этом величины  $n_{\bar{\lambda}} = 1.77097$  и  $v_{\bar{\lambda}} = 23.533$ . Верхний модельный материал обеспечивает выполнение равенства  $Q_{loc} = Q_{int} = 0$  и то же самое значение  $\Delta n(\bar{\lambda})$ , что и у микроструктуры 3.

У модельной микроструктуры 6, как и у микроструктуры 5, нижний слой, на который из воздуха падает излучение, выполнен из материала nanocomposite:  $ZrO_2$  in PMMA. Его показатель преломления на центральной длине волны  $n_{\bar{\lambda}} = 1.61748$ , а коэффициент дисперсии  $v_{\bar{\lambda}} = 18.824$ . Верхний модельный материал обеспечивает выполнение равенства  $Q_{loc} = Q_{int} = 0$  и то же самое значение  $\Delta n(\bar{\lambda})$ , что и у микроструктуры 5.

Показатели преломления верхних модельных материалов микроструктур 4 и 6 вычислялись по формуле

$$n_2(\lambda_i) = \frac{\lambda_i}{\bar{\lambda}} \Delta n(\bar{\lambda}) + n_1(\lambda_i). \tag{17}$$

Расчет и оптимизация глубин рельефов микроструктур 4 и 6 показали, что допустимые углы падения излучения

на микроструктуру 4 больше соответствующих углов падения на микроструктуру 6 (см. табл.1). При этом нормированная разность углов  $\Delta\psi/\psi$ , отвечающих одному и тому же значению  $P$ , уменьшается с ростом данного параметра. Действительно, если при  $P = 10$  величина  $\Delta\psi/\psi \approx 47\%$ , то при  $P = 30$  она составляет всего лишь 13%. Все это подтверждает сделанный в [18] вывод о том, что допустимые углы падения излучения на однорельфную микроструктуру целиком определяются глубиной рельефа  $h$ , т.е. разностью  $\Delta n(\bar{\lambda}) = n_2(\bar{\lambda}) - n_1(\bar{\lambda})$  (см. формулу (13)). Материалы микроструктуры 4 обеспечивают максимально возможную для известных оптических материалов (пригодных для изготовления ДОЭ) разность  $\Delta n(\bar{\lambda})$  и, следовательно, минимальную глубину  $h^{opt}$ . Это позволяет рассматривать полученные максимально допустимые углы падения на микроструктуру 4 как предельные для двухслойных однорельфных пилообразных микроструктур. Здесь сразу же напомним, что оценка оптимальной глубины рельефа микроструктуры и максимально допустимых углов падения излучения на нее зависит от выбора соответствующего критерия. И все приведенные выше оценки получены для критерия  $\eta_{EMmin}^{(\psi)}/\eta_{EMmax}^{(\psi=0)} \geq 0.95$ . Наконец, возвращаясь к микроструктуре 3, есть все основания констатировать, что ее угловые характеристики очень близки к предельно возможным.

Что касается нанокompозитных материалов, которые использовались для компоновки микроструктур 3 и 5, то зависимости их показателей преломления от длины волны описываются формулой

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}. \tag{18}$$

Значения коэффициентов  $K_{1-3}$  и  $L_{1-3}$ , любезно предоставленные авторами статьи [21], сведены в табл.2.

Табл.2. Коэффициенты дисперсионной формулы (18) нанокompозитных оптических материалов.

Материал	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
Diamond in PMMA	1.68193	0.39121	-1.45947	0.00805	0.02188	-906.42838
ITO in PMMA	1.21406	0.48463	2.98136	0.00489	0.04373	5.19483
ZrO <sub>2</sub> in PMMA	1.17846	0.37802	0.00570	0.01431	0.00967	-3.36306

Подробное описание подходов к дизайну оптических нанокompозитов представлено в работе [28]. В ней было показано, в частности, что при правильном выборе размеров наночастиц такой неприемлемый для оптических элементов эффект, как некогерентное рассеяние, будет исключен.

Здесь следует отметить, что в табл.1 не нашли отражения двухслойные однорельфные микроструктуры, для компоновки которых использовались нанокompозитные материалы с наночастицами из двуокиси циркония и титана [29]. Также в табл.1 не вошла микроструктура, скомпонованная из УФ-отверждаемых смол двух новых типов [30]. Это связано с тем, что дисперсионные формулы перечисленных материалов не опубликованы и недоступны. В результате невозможно, используя единые оценочные параметры, сопоставить результаты указанных разработок

с результатами, представленными в табл.1, и оценить, насколько спектральные и угловые характеристики не вошедших в нее микроструктур близки к предельно возможным для микроструктур данного типа.

Угловые характеристики двухрельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов (7 и 9), вполне сопоставимы, но значительно уступают характеристикам микроструктуры 3. Для того чтобы оценить, насколько угловые характеристики микроструктур 7 и 9 отличаются от предельно возможных характеристик двухслойных двухрельефных микроструктур, так же как и при анализе однорельефных микроструктур, используем модельные микроструктуры 8 и 10. При их компоновке оптические материалы нижних слоев оставались теми же, что и у микроструктур 7 и 9, а материалы верхних слоев заменялись соответствующей математической моделью, обеспечивающей выполнение условия  $Q_{loc} = Q_{int} = 0$ . Показатели преломления модельных материалов вычислялись по формуле

$$n_2(\lambda_i) = \frac{h_1}{h_2} [n_1(\lambda_i) - 1] - \frac{\lambda_i}{h_2} + 1. \quad (19)$$

При этом глубины рельефов  $h_1$  нижних слоев микроструктур 8 и 10 принимались равными глубинам  $h_1$  микроструктур 7 и 9 соответственно, а глубины верхних слоев  $h_2$  оптимизировались.

В результате было установлено, что максимально допустимые углы падения излучения на модельные микроструктуры достаточно близки, а допустимые углы падения излучения внутри нижнего слоя этих микроструктур, особенно при больших пространственных периодах, практически совпадают. Действительно, максимально допустимый угол падения излучения внутри нижнего слоя микроструктуры 8 при  $P = 30$  равен  $17.5^\circ$ , тогда как соответствующий угол микроструктуры 10 составляет  $17.75^\circ$ . Следовательно, представленные в табл.1 максимально допустимые углы падения излучения на модельные микроструктуры 8 и 10 можно рассматривать как предельные углы для двухслойных двухрельефных пилообразных микроструктур. Данные углы примерно в полтора раза превышают максимально допустимые для микроструктур 7 и 9. Это существенно отличается от результатов расчетов для однорельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов, допускающих прецизионное литье или штамповку.

#### 4. Заключение

Процедуры вычисления локального и интегрального  $Q$ -факторов, распространенные в настоящей работе на многослойные двухрельефные пилообразные дифракционные микроструктуры, обеспечивают возможность выбора наилучших комбинаций оптических материалов для микроструктур любого типа при весьма незначительных затратах компьютерного времени.

Предложенный авторами подход к исследованию многослойных рельефно-фазовых дифракционных микроструктур, основанный на совместном использовании  $Q$ -факторов и RCWA-метода, позволил установить следующее:

1. В видимом спектральном диапазоне (0.4–0.7 мкм) максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру, достигнутые для двухслойных однорельеф-

ных микроструктур, скомпонованных из традиционных и допускающих прецизионное литье или штамповку оптических материалов, не более чем на 15%–20% превышают соответствующие углы для двухслойных двухрельефных микроструктур, скомпонованных из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс. В то же время предельные углы падения излучения на двухслойные однорельефные микроструктуры почти в два раза превышают соответствующие углы для двухслойных двухрельефных микроструктур.

2. Технологичные и коммерчески доступные пластмассы позволяют компоновать двухслойные двухрельефные микроструктуры со спектральными и угловыми характеристиками, близкими к предельно возможному для этого типа микроструктур.

3. Из практически значимых комбинаций материалов для двухслойных однорельефных микроструктур лучшими являются пары «оптическая пластмасса – GMOL», однако максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуры, скомпонованные из них, существенно меньше предельных углов для этого типа микроструктур.

4. Получить для двухслойных однорельефных микроструктур спектральные и угловые характеристики, максимально приближенные к предельным, позволяет их компоновка из нанокompозитных оптических материалов.

Авторы настоящей статьи признательны авторам работы [21] за предоставленную возможность использования дисперсионных формул созданных ими нанокompозитных материалов.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

1. Flores A., Wang M.R., Yang J.J. *Appl. Opt.*, **43**, 5618 (2004).
2. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., et al. *Appl. Opt.*, **49**, 4379 (2010).
3. Jia H., Wang D. *J. Soc. Inf. Disp.*, **19**, 265 (2011).
4. Грейсх Г.И. и др. *Компьютерная оптика*, **35**, 473 (2011).
5. Greisukh G.I. et al. *Appl. Opt.*, **51**, 4597 (2012).
6. Лукин А., Мустафин К., Рафиков Р. Патент РФ № 1271240 (1985).
7. Лукин А.В. *Оптический журн.*, **74**, 80 (2007).
8. Ebstein S.T. *Proc. SPIE*, **2404**, 211 (1995).
9. [http://www.jeos.org/index.php/jeos\\_rp/article/view/176](http://www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/176).
10. Greisukh G.I. et al. *Opt. Commun.*, **338**, 54 (2015).
11. Грейсх Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **118**, 997 (2015).
12. Грейсх Г.И. и др. *Оптический журн.*, **82**, 56 (2015).
13. Грейсх Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **124**, 100 (2018).
14. Грейсх Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **125**, 57 (2018).
15. Buralli D.A. et al. *Appl. Opt.*, **28**, 976 (1989).
16. <http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/moldlenses.html>.
17. <http://www.edmundoptics.com>.
18. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/ab90ce/pdf>.
19. Moharam M.G. et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 1385 (1982).
20. Грейсх Г.И. и др. *Компьютерная оптика*, **42**, 38 (2018).
21. Werdehausen D. et al. *Optica*, **6**, 1031 (2019).
22. Lyndin N.M. *Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software*; <http://www.mcgrating.com>.
23. Грейсх Г.И. и др. *Оптический журн.*, **86**, 3 (2019).
24. <https://www.radiantvisionsystems.com/>.
25. <http://focenter.com/wp-content/uploads/2015/05/AngstromLink-AL-6261-6263-6264-6265.pdf>.
26. Marvin J., Weber M.J. *Handbook of Optical Materials* (Boca Raton: CRC Press, 2003).
27. <http://www.hoya-opticalworld.com/english/datadownload/index.html>.
28. Werdehausen D. et al. *Opt. Mater. Express*, **8**, 3456 (2018).
29. Korenaga T., Ando T., Okada Y., et al. *Opt. Rev.*, **21**, 737 (2014).
30. Nakamura T., Suzuki K., Inokuchi Y., Nishimura S. *Opt. Eng.*, **58**, 085103 (2019).