

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА

Предельные спектральные и угловые характеристики пилообразных двухслойных двухрельефных дифракционных микроструктур

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

Исследованы пилообразные двухслойные микроструктуры с внутренним и наружным, а также с двумя внутренними рельефами, скомпонованные из технологичных и коммерчески доступных на сегодняшний день оптических пластмасс или из оптической пластмассы и нанокompозитного материала. С использованием соответствующих модельных микроструктур в рамках строгой теории дифракции оценены предельные спектральные и угловые характеристики пилообразных двухслойных двухрельефных дифракционных микроструктур обоих типов.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, двухслойная двухрельефная дифракционная микроструктура, дифракционная эффективность, скалярная и строгая теории дифракции.

1. Введение

Зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) дифракционных оптических элементов (ДОЭ) от длины волны и угла падения излучения на элемент, а также технологические сложности, сопровождающие подавление указанной зависимости, продолжают препятствовать широкому практическому использованию ДОЭ в изображающих оптических системах. В первую очередь имеются в виду объективы фото- и видеокамер мобильных устройств и устройств видеонаблюдения для массового производства. Именно в таких объективах, предназначенных для работы с полихроматическим излучением, применение ДОЭ представляется наиболее эффективным, т. к. позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже для очень ограниченного набора оптических материалов, из которых можно изготовить преломляющие поверхности прецизионной штамповкой [1–4].

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 [5–15], как это показано на рис.1–3.

При разработке оптических систем с ДОЭ необходимо учитывать как технологические ограничения при изготовлении микроструктур, так и потенциальные возможности этих микроструктур для подавления зависимо-

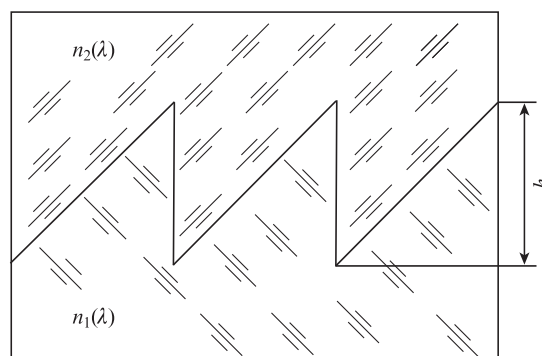


Рис.1. Двухслойная однорельефная пилообразная микроструктура.

сти ДЭ от длины волны и угла падения излучения на элемент. Данные проблемы для двухслойных однорельефных микроструктур всесторонне исследованы и описаны в работах [16, 17], в то время как в подобных исследованиях, относящихся к двухрельефным микроструктурам, сделаны лишь первые шаги (см., напр., [11, 17]). Результаты, представленные в настоящей статье, призваны устранить указанный пробел, причем особый упор делается на оценку предельных спектральных и угловых характеристик двухслойных микроструктур с двумя внутренними рельефами (рис.3 при $n' = 1$). Это, в частности, объясняется тем, что такая микроструктура является на сегодняшний день наиболее технологичной. Действительно, она легко реа-

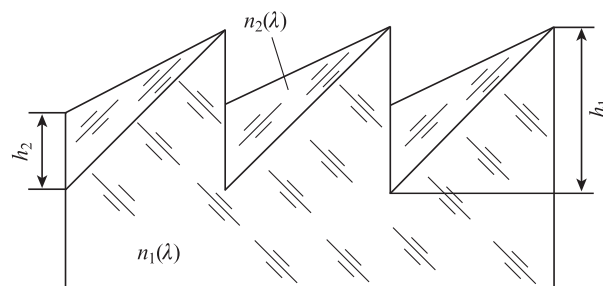


Рис.2. Двухслойная пилообразная микроструктура с внутренним и наружным рельефами.

Г.И.Грейсух, Е.Г.Ежов, О.А.Захаров. 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

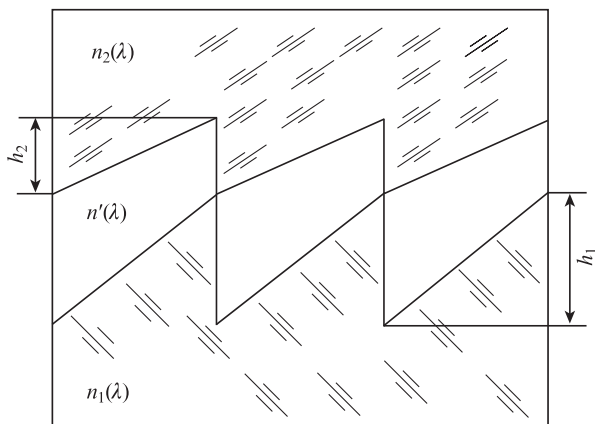


Рис.3. Трехслойная двухрельфная пилообразная микроструктура.

лизуется в виде разделенных воздушным промежутком двух соосных близкорасположенных однослойных киноформных элементов, промышленная технология изготовления и тиражирования которых хорошо отлажена (см., напр., [18]). Напомним, что в первом серийно выпускаемом телеобъективе с ДОЭ применялся элемент именно с такой конструкцией [19, 20].

2. Оценочные параметры сравнительного анализа микроструктур

Для сравнения спектральных и угловых характеристик пилообразных рельефно-фазовых дифракционных микроструктур различных типов в настоящей статье используются единые оценочные параметры, те же самые, что и в работах [16, 17]. Так, для оценки подавления зависимости ДЭ от длины волны при нормальном падении излучения на микроструктуру используются локальный и интегральный Q -факторы микроструктуры, вычисляемые в рамках скалярной теории дифракции (СТД). Локальный Q -фактор равен максимальному абсолютному значению параметра

$$Q_i = \frac{\Delta(\lambda_i)}{\lambda_i} - 1, \tag{1}$$

т. е. $Q_{loc} = |Q_i|_{max}$. Здесь $\Delta(\lambda_i)$ – приращение оптического пути на одном периоде микроструктуры.

В случае двухслойных микроструктур с двумя внутренними (рис.3 при $n' = 1$) или с внутренним и наружным рельефами (рис.2) приращение оптического пути описывается выражением [9]

$$\Delta(\lambda_i) = h_1[n_1(\lambda_i) - 1] - h_2[n_2(\lambda_i) - 1]. \tag{2}$$

Необходимо сразу же отметить, что если с точки зрения СТД микроструктуры, представленные на рис.2 и на рис.3 при $n' = 1$, абсолютно подобны, то в строгой теории дифракции они различаются по эффективной глубине рельефа h_{eff} . Микроструктуры на рис.2 и 3 имеют $h_{eff} = h_1$ и $h_{eff} = h_1 + h_2$ соответственно.

Абсолютное значение Q_i (1) определяет, насколько из-за нелинейности зависимости $\Delta(\lambda_i)$ в рабочем спектральном диапазоне ($\lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}$) уменьшается ДЭ, вычисляемая в рамках СТД на длине волны λ_i . Интегральный же Q -фактор микроструктуры учитывает негативное по-

следствие нелинейности $\Delta(\lambda_i)$ в пределах всего рабочего спектрального диапазона:

$$Q_{int} = \sqrt{\frac{1}{i_{max}} \sum_1^{i_{max}} Q_i^2}. \tag{3}$$

Далее следует отметить, что Q -факторы позволяют лишь оперативно сопоставить комбинации оптических материалов для многослойной пилообразной микроструктуры и отобрать из них наиболее перспективные с точки зрения подавления зависимости ДЭ от длины волны. Получить же достоверную оценку зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру можно только в рамках строгой теории дифракции путем решения системы уравнений Максвелла, в частности так называемым методом строгого анализа связанных волн (rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [21].

Очевидно, что оценка оптимальных глубин рельефов микроструктур и максимально допустимых углов падения излучения на них зависит от выбора соответствующего критерия. Если дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекватным является критерий, предложенный в работе [12]. Согласно ему глубины рельефов считаются оптимальными, если они обеспечивают максимально возможный диапазон углов падения излучения ψ в выбранном спектральном диапазоне, в пределах которого ДЭ (в точке, соответствующей ее минимуму) не опускается ниже минимально допустимого значения (уровня), равного 0.95 от максимального значения ДЭ при нормальном падении излучения на подложку микроструктуры ($\eta_{EM}^{(\psi)}_{min} / \eta_{EM}^{(\psi=0)}_{max} \geq 0.95$). Это значение гарантирует отсутствие не только гало, но и любого другого визуально наблюдаемого отрицательного влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого оптической системой с ДОЭ. Данный критерий был успешно использован в целом ряде работ (см., напр., [13–15]).

Необходимо учесть, что модуль отрицательного угла падения излучения на микроструктуру $|\psi_-|$ и положительный угол падения ψ_+ , при которых происходит снижение ДЭ, оцениваемой RCWA-методом, до одного и того же уровня, могут существенно различаться. Поэтому за оценочный, т. е. за максимально допустимый угол Ψ в настоящей статье, как и в работах [11–15], принят наименьший из углов $|\psi_-|$ и ψ_+ . Далее, как и при расчетах в рамках СТД, предполагается, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления $n_1(\lambda)$, а угол Ψ отсчитывается от нормали к подложке.

Если выбранная комбинация оптических материалов и глубины рельефов обеспечивают пилообразной микроструктуре 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 близка к единице. Основной вклад в уменьшение ДЭ на всех длинах волн рабочего спектрального диапазона в этом случае будут вносить френелевские потери. Максимально же допустимый угол падения излучения (т. е. оценочный угол Ψ , соответствующий условию $\eta_{EM}^{(\psi)}_{min} / \eta_{EM}^{(\psi=0)}_{max} \geq 0.95$) при оптимальных глубинах рельефов будет зависеть от типа микроструктуры, эффективной глубины рельефа и относительного пространственного периода $P = \Lambda/h_{eff}$.

3. Результаты сравнительного анализа двухслойных пилообразных микроструктур

Скомпонованные из ряда пар оптических материалов двухслойные двухрельефные пилообразные микроструктуры, которые предназначены для работы в видимом спектральном диапазоне ($0.4 \leq \lambda \leq 0.7$ мкм) и для которых достигнуто максимальное подавление спектральной и угловой зависимостей ДЭ, представлены в табл.1.

В последнем столбце табл.1 в каждой строке указана работа, в которой представлены результаты впервые проведенных исследований микроструктуры, скомпонованной из данной пары оптических материалов. Отметим, что оптимальные глубины рельефов и максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру могут не совпадать с приведенными в той статье, где такая микроструктура исследовалась впервые. Это объясняется тем, что все указанные выше параметры были пересчитаны в соответствии с целями настоящей статьи. Для технологичных и коммерчески доступных пластмасс PMMA, POLYCARB (PC), POLYSTYR (PS) и E48R использовались дисперсионные формулы из каталогов Misc и Zeon базы данных Glasscat компьютерной программы оптического проектирования Zemax [22]. Что касается

нанокompозитного материала ITO in PMMA, который применялся для компоновки микроструктуры 5, то зависимость его показателя преломления от длины волны описывается формулой Селлмейера

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов K_{1-3} и L_{1-3} , любезно предоставленные авторами статьи [23], таковы: $K_1 = 1.21406$, $K_2 = 0.48463$, $K_3 = 2.98136$, $L_1 = 0.00489$, $L_2 = 0.04373$, $L_3 = 5.19483$.

Глубины рельефов h_1 и h_2 , при которых в пределах видимого спектрального диапазона ($0.4 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0.7 \text{ мкм}$) значение параметра Q_{loc} минимально, были получены для микроструктур 1, 3 и 5 по методике, описанной в работе [17]. Затем уже RCWA-методом с использованием компьютерной программы MC grating program [24] при глубине рельефа h_1 и для двух значений относительного периода, $P = 10$ и 20 , находились оптимальные глубины рельефа h_2^{opt} и интервалы углов падения излучения на микроструктуру, в пределах которых выполняется неравенство $\eta_{\text{EM min}}^{(\psi)} / \eta_{\text{EM max}}^{(\psi=0)} \geq 0.95$. Завершался расчет для каждой микроструктуры тем, что при найденных для $P = 20$ глу-

Табл.1. Параметры и угловые характеристики ряда двухслойных двухрельефных микроструктур.

Номер микро-структуры	Тип микро-структуры	Оптические материалы двух слоев с показателями преломления n_1/n_2	Q_{loc}	Q_{int}	h_1 (мкм)	h_2^{opt} (мкм)	Ψ (град)	Литература
1	рис.2	PMMA/PC	0.1283	0.058	15.1	11.67	9.5 при $P = 10$	[9]
						11.70	15.0 при $P = 20$	
	рис.3	PMMA/PC	0.1283	0.058	15.1	11.68	16.8 при $P = 30$	[11]
						11.67	7.2 при $P = 10$	
2	рис.2	PMMA/mathematical model	0	0	15.1	11.67	7.5 при $P = 20$	[17]
						11.67	10.5 при $P = 30$	
	рис.3	PMMA/mathematical model	0	0	15.1	11.745	16 при $P = 10$	настоящая работа
						11.75	18 при $P = 20$	
3	рис.2	E48R/PS	0.1193	0.054	16.3	11.75	21.0 при $P = 30$	настоящая работа
						11.77	13.4 при $P = 10$	
	рис.3	E48R/PS	0.1193	0.054	16.3	13.665	18 при $P = 20$	настоящая работа
						13.69	20.5 при $P = 30$	
4	рис.2	E48R/mathematical model	0	0	16.3	13.69	10.7 при $P = 10$	настоящая работа
						13.65	15.5 при $P = 20$	
	рис.3	E48R/mathematical model	0	0	16.3	13.68	19.4 при $P = 30$	настоящая работа
						13.68	7.3 при $P = 10$	
5	рис.2	E48R/ITO in PMMA	0.0520	0.025	4.72	13.72	12.5 при $P = 20$	настоящая работа
						13.745	14.5 при $P = 30$	
	рис.3	E48R/ITO in PMMA	0.0520	0.025	4.72	13.77	15.4 при $P = 10$	настоящая работа
						13.77	22.5 при $P = 20$	
6	рис.2	E48R(ITO)/mathematical model	0	0	4.72	3.26	20.6 при $P = 30$	настоящая работа
						3.26	11.5 при $P = 10$	
	рис.3	E48R(ITO)/mathematical model	0	0	4.72	3.26	19 при $P = 20$	настоящая работа
						3.26	20.6 при $P = 30$	
5	рис.2	E48R/ITO in PMMA	0.0520	0.025	4.72	3.26	16.7 при $P = 10$	настоящая работа
						3.26	23.5 при $P = 20$	
	рис.3	E48R/ITO in PMMA	0.0520	0.025	4.72	3.26	25 при $P = 30$	настоящая работа
						3.26	14.5 при $P = 10$	
6	рис.2	E48R(ITO)/mathematical model	0	0	4.72	3.235	18.5 при $P = 10$	настоящая работа
						3.26	25.5 при $P = 20$	
	рис.3	E48R(ITO)/mathematical model	0	0	4.72	3.255	26 при $P = 30$	настоящая работа
						3.27	14.5 при $P = 10$	
						3.27	21.3 при $P = 20$	настоящая работа
						3.27	22.8 при $P = 30$	

бинах h_1 и h_2^{opt} соответствующие интервалы углов определялись при $P = 30$. Наименьшая по модулю граница каждого из полученных интервалов углов в качестве максимально допустимого угла Ψ заносилась в табл.1.

Для анализа потенциальных возможностей исследуемых микроструктур использовались предложенные в работах [16, 17] модельные микроструктуры 2, 4 и 6. При их компоновке оптические материалы с показателями преломления $n_1(\lambda)$ оставались теми же, что и у материнских микроструктур 1, 3 и 5, а материалы вторых слоев заменялись соответствующей математической моделью, обеспечивающей выполнение условия $Q_{\text{loc}} = Q_{\text{int}} = 0$. Показатели преломления модельных материалов вычислялись по формуле

$$n_2(\lambda_i) = \frac{h_1}{h_2} [n_1(\lambda_i) - 1] - \frac{\lambda_i}{h_2} + 1. \quad (5)$$

При этом глубины рельефов h_1 и h_2 принимались равными аналогичным глубинам материнских микроструктур, но на этапе расчета RCWA-методом глубина рельефа h_2 так же, как и у материнских микроструктур, оптимизировалась.

Результаты, представленные в табл.1, позволяют сделать следующие выводы:

1. Только две пары технических пластмасс дают возможность скомпоновать двухслойные двухрельефные пилообразные микроструктуры с глубиной рельефа $h_1 < 20$ мкм и с ослабленной до приемлемого уровня зависимостью ДЭ от длины волны в видимом спектральном диапазоне. Эти микроструктуры (1 и 3) характеризуются весьма близкими значениями глубин рельефов, при которых Q -факторы минимальны, самих Q -факторов и, как следствие, максимально допустимых углов падения излучения.

2. При использовании для компоновки двухслойных двухрельефных микроструктур в паре с коммерчески доступной оптической пластмассой нанокompозитного материала глубина рельефа h_1 , обеспечивающая минимизацию Q -факторов, снижается более чем в три раза, а численные значения самих Q -факторов уменьшаются более чем в два раза.

3. Максимально допустимый угол падения излучения Ψ увеличивается с ростом относительного пространственного периода P для всех микроструктур.

4. При компоновке микроструктур из одной и той же пары оптических материалов и при одинаковых значениях P угол Ψ всегда больше у микроструктур с внутренним и наружным рельефами, у которых $h_{\text{eff}} = h_1$ (рис.2), чем у микроструктур с двумя внутренними рельефами, у которых $h_{\text{eff}} = h_1 + h_2$ (рис.3). При этом в исследованном интервале значений параметра P ($10 \leq P \leq 30$) у микроструктур с глубокими рельефами ($h_1 > 15$ мкм) при компоновке по схеме на рис.2 угол Ψ в среднем больше, чем у микроструктур, скомпонованных по схеме на рис.3, в 1.5 раза, а у микроструктуры с $h_1 \approx 4.7$ мкм – в 1.2 раза.

5. Максимально допустимые углы падения излучения на модельные микроструктуры 2 и 4 могут рассматриваться как предельные углы для двухслойных двухрельефных микроструктур с глубокими рельефами ($h_1 > 15$ мкм). В таком случае сравнение микроструктур 1 и 3 с микроструктурами 2 и 4 показывает, что максимально допустимые углы для микроструктур, скомпонованных

из реальных материалов по схеме на рис.2, в зависимости от параметра P меньше предельных углов для микроструктур этого типа в 1.2 – 1.7 раза, а максимально допустимые углы для микроструктур, скомпонованных из реальных материалов по схеме на рис.3, в зависимости от параметра P меньше предельных углов в 1.42 – 2.4 раза.

6. У микроструктуры 5, скомпонованной по схеме на рис.2 с использованием нанокompозитного материала, максимально допустимый угол падения излучения при $P = 10$ превышает соответствующий угол микроструктур на основе коммерчески доступных пластмасс примерно в 1.6 раза, а при $P = 30$ – примерно в 1.4 раза. В случае же компоновки микроструктур с двумя внутренними рельефами (рис.3) максимально допустимый угол падения излучения при $P = 10$ превышает соответствующий угол микроструктур на основе коммерчески доступных пластмасс примерно в 2 раза, а при $P = 30$ – примерно в 1.8 раза. Более того, как показывает сравнение микроструктур 5 и 6, максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру, скомпонованную из реальных материалов, и на модельную микроструктуру практически совпадают.

7. Принимая во внимание изложенное выше и учитывая, что из известных оптических материалов (пригодных для создания ДОЭ) минимально возможную глубину рельефа h_1 обеспечивают оптические материалы микроструктуры 5, полученные максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуры 5 и 6 можно рассматривать как предельные для двухслойных двухрельефных пилообразных микроструктур.

4. Заключение

Таким образом, с использованием вычисляемых в рамках СТД локального и интегрального Q -факторов двухслойной двухрельефной пилообразной микроструктуры подобраны пары оптических пластмасс, обеспечивающих подавление в видимом спектральном диапазоне зависимости ДЭ от длины волны при наибольшей из глубин рельефов, не превышающей 16.3 мкм. Таких пар оказалось две: PMMA/PC и E48R/PS. Для скомпонованных из них микроструктур Q -факторы близки к нулю, а ДЭ при нормальном падении излучения близка к единице во всем видимом спектральном диапазоне. При этом микроструктуры с внутренним и наружным (рис.2) и с двумя внутренними (рис.3) рельефами абсолютно неразличимы, т.к. в скалярном приближении они рассчитываются по одним и тем же формулам.

При анализе в рамках строгой теории дифракции указанные две компоновки, различающиеся эффективной глубиной рельефов ($h_{\text{eff}} = h_1$ у микроструктур с внутренним и наружным рельефами и $h_{\text{eff}} = h_1 + h_2$ у микроструктур с двумя внутренними рельефами), дают разные значения ДЭ, особенно при наклонном падении излучения. Такой анализ, выполненный RCWA-методом, показал, что допустимые углы падения излучения на микроструктуру зависят как от эффективной глубины рельефа, так и от ее относительного пространственного периода $P = \Lambda/h_{\text{eff}}$. При этом в случае одинаковых значений P у микроструктур с внутренним и наружным рельефами угол Ψ больше, чем у микроструктур с двумя внутренними рельефами. Так, в исследованном интервале значений параметра P ($10 \leq P \leq 30$) у микроструктур с глубокими рельефами ($h_1 > 15$ мкм) при компоновке по схеме на рис.2

угол Ψ в среднем больше, чем у микроструктур, скомпонованных по схеме на рис.3, в 1.5 раза, а у микроструктур с $h_1 \approx 4.7$ мкм – в 1.2 раза.

Предельные значения углов падения излучения на двухслойные двухрельефные микроструктуры с глубокими рельефами ($h_1 > 15$ мкм), оцененные по соответствующим углам модельных микроструктур, в зависимости от схемы компоновки и параметра P в 1.2–2.4 раза больше максимально допустимых углов падения излучения на микроструктуры, скомпонованные из реальных материалов. При $10 \leq P \leq 30$ предельные углы лежат в диапазоне $15^\circ - 23^\circ$ для компоновки с внутренним и наружным рельефами и в диапазоне $11.5^\circ - 20.6^\circ$ для компоновки с двумя внутренними рельефами.

Использование для компоновки двухслойных двухрельефных микроструктур в паре с коммерчески доступной оптической пластмассой E48R одного из нанокompозитных материалов (ITO in PMMA), представленных в работах [23, 25], позволяет уменьшить наибольшую из двух глубин рельефа, при которой Q -факторы минимальны, более чем в три раза, а численные значения самих Q -факторов – более чем в два раза. Такое уменьшение сопровождается увеличением максимально допустимых углов падения излучения. При этом указанные углы данной микроструктуры, скомпонованной из реальных материалов, практически совпадают с соответствующими углами падения излучения на модельную микроструктуру. Если учесть, что из известных оптических материалов (пригодных для создания ДОО) минимально возможные глубины рельефов обеспечивают оптические материалы E48R и ITO in PMMA, то полученные максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру, скомпонованную из таких материалов, можно рассматривать как предельные на сегодняшний день углы для двухслойных двухрельефных пилообразных микроструктур. При $10 \leq P \leq 30$ эти углы лежат в диапазоне $16.7^\circ - 25^\circ$ для компоновки с внутренним и наружным рельефами и в диапазоне $14.5^\circ - 22.3^\circ$ для компоновки с двумя внутренними рельефами.

Сравнение предельных углов падения излучения на двухслойные двухрельефные пилообразные микроструктуры с предельными углами падения излучения на двухслойные однорельефные микроструктуры, приведенными в работах [16, 17], показало, что предельные углы для двухрельефных микроструктур, скомпонованных из технологических и коммерчески доступных сегодня оптиче-

ских пластмасс, незначительно уступают соответствующим углам для однорельефных микроструктур, для компоновки которых применяются пары оптических материалов, включающие пластмассу и специальное, допускающее прецизионную штамповку стекло. В то же время при использовании для компоновки двухслойных микроструктур нанокompозитных материалов предельные углы падения излучения на однорельефные микроструктуры превышают соответствующие углы падения на двухрельефные микроструктуры в два и более раз.

Авторы настоящей статьи признательны авторам работы [23] за предоставленную возможность использования дисперсионных формул созданных ими нанокompозитных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

1. Hua H. et al. *Appl. Opt.*, **42**, 97 (2003).
2. Greisukh G.I. et al. *Appl. Opt.*, **49**, 4379 (2010).
3. Greisukh G.I. et al. *Appl. Opt.*, **52**, 5843 (2013).
4. Антонов А.И. и др. *Автометрия*, **53**, 4 (2017) [*Optoelectron. Instrum. Data Proces.*, **53**, 4 (2017)].
5. Лукин А.В. Патент РФ № 1271240 (1985).
6. Лукин А.В. *Оптический журнал*, **74**, 80 (2007) [*J. Opt. Technol.*, **74**, 65 (2007)].
7. Ebstein S.T. *Proc. SPIE*, **2404**, 211 (1995).
8. http://www.jeos.org/index.php/jeos_gp/article/view/176.
9. Грейсук Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **106**, 694 (2009) [*Opt. Spectrosc.*, **106**, 621 (2009)].
10. Greisukh G.I. et al. *Opt. Commun.*, **338**, 54 (2015).
11. Грейсук Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **118**, 997 (2015) [*Opt. Spectrosc.*, **118**, 964 (2015)].
12. Грейсук Г.И. и др. *Оптический журнал*, **82**, 56 (2015) [*J. Opt. Technol.*, **82**, 308 (2015)].
13. Грейсук Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **124**, 100 (2018) [*Opt. Spectrosc.*, **124**, 98 (2018)].
14. Грейсук Г.И. и др. *Оптика и спектроскопия*, **125**, 57 (2018) [*Opt. Spectrosc.*, **125**, 232 (2018)].
15. Грейсук Г.И. и др. *Компьютерная оптика*, **42**, 38 (2018).
16. Greisukh G.I. et al. *J. Opt.*, **22**, 085604 (2020).
17. Грейсук Г.И. и др. *Квантовая электроника*, **50**, 623 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 623 (2020)].
18. <https://www.edmundoptics.com/f/plastic-hybrid-aspheric-lenses/13921/>.
19. <https://doi.org/10.1364/DOMO.2002.DMA2>.
20. <http://www.shopfoto.ru/p/canon-ef-400-mm-f4-do-is-usm>.
21. Moharam M.G. et al. *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 1385 (1982).
22. <http://www.radiantzemax.com>.
23. Werdehausen D. et al. *Optica*, **6**, 1031 (2019).
24. <http://www.mcgrating.com>.
25. Werdehausen D. et al. *J. Opt.*, **22**, 065607 (2020).