

Высокоэффективные технологичные дифракционные микроструктуры видимого диапазона

Г. И. Грейсх¹, В. А. Данилов², Е. Г. Ежов¹, С. В. Казин¹, Б. А. Усиевич³

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

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

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

В рамках строгой теории дифракции в видимом спектральном диапазоне сопоставлены интервалы максимально допустимых углов падения излучения на двухслойные пилообразные рельефно-фазовые микроструктуры. Для слоев этих микроструктур использовались оптические материалы, выбираемые из базы данных, включающей 48 пластиков и 165 специальных стекол, позволяющих тиражировать оптические элементы с микроструктурами на их поверхностях прецизионным литьем или штамповкой. Показано, что в зависимости от типа микроструктуры и используемых оптических материалов при отношении пространственного периода микроструктуры к эффективной глубине рельефа больше 20 достижимые углы, в пределах которых дифракционная эффективность выше 0,95, лежат в широком интервале от 7,5° до 50°.

Ключевые слова: двухслойная рельефно-фазовая дифракционная микроструктура, дифракционная эффективность, строгая теории дифракции.

Цитирование: Грейсх, Г. И. Высокоэффективные технологичные дифракционные микроструктуры видимого диапазона / Г. И. Грейсх, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, С. В. Казин, Б. А. Усиевич // НОЛОЕХРО 2021 : XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — С. 16–21.

Введение

Основным элементом в голографии и в дифракционной оптике является, как известно, дифракционная микроструктура, изменяющая направление распространения электромагнитной волны в зависимости от ее длины. При этом непрерывно развивающиеся технологии и расширяющийся ассортимент материальных носителей микроструктуры обуславливают актуальность периодической переоценки характеристик и потенциальных возможностей дифракционных микроструктур различных типов.

Одной из основных и практически значимых характеристик дифракционных микроструктур является дифракционная эффективность (ДЭ), и ее зависимость от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру в ряде случаев является наиболее важным фактором. Например, в случае микроструктуры оптического элемента, используемого в спектральном приборе или изображающей оптической системе, падение ДЭ и, как следствие, дифракция значительной части излучения в побочные порядки недопустимо как на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, так и в заданном интервале углов падения излучения.

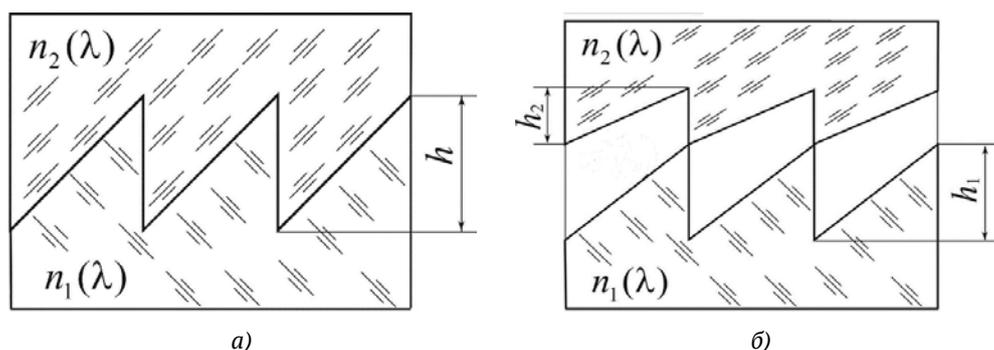


Рис. 1. Двухслойные однорельефные (а) и двухрельефные (б) микроструктуры, выполненные из оптических материалов с показателями преломления $n_1(\lambda)$ и $n_2(\lambda)$

Существенное расширение в последнее время ассортимента оптических пластмасс и специальных стекол (glass for molded optics lenses, GMOL), позволяющих тиражировать оптические элементы с микроструктурами на их поверхностях прецизионным литьем или штамповкой, обусловило целесообразность очередного пересмотра возможностей создания технологичных дифракционных микроструктур с высокой и практически неизменной эффективностью в заданных спектральном диапазоне и интервале углов падения полихроматического излучения на микроструктуру.

Результаты исследования

В первую очередь представим результаты исследования пилообразной двухслойной однорельефной микроструктуры показанной на рис. 1а. Пары оптических материалов для такой микроструктуры выбирались из базы данных, в которую были включены 47 оптических пластмасс, представленных в соответствующих каталогах компьютерных программ оптического проектирования Zemax13 (каталоги ANGSTROMLINK, ZEON и MISC) [1] и Opticstudio (каталог APEL) [2], а также пластики, выпускаемых фирмой MITSUBISHI GAS CHEMICAL под торговой маркой Lupizeta [3].

Кроме того, в эту базу данных была включена под условной маркой СМТ оптическая пластмасса, информация о которой на короткое время появлялась в сети Интернет. Зависимость ее показателя преломления от длины волны описывается формулой Шотта с коэффициентами: $a_0 = 2,24623862$; $a_1 = -1,1926326 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = 1,52213581 \cdot 10^{-2}$; $a_3 = 7,35999623 \cdot 10^{-4}$; $a_4 = -8,76859705 \cdot 10^{-6}$; $a_5 = 4,33078169 \cdot 10^{-7}$.

Оценка зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру выполнялась в рамках строгой теории дифракции путем решения системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями и, в частности, *Rigorous coupled-wave analysis (RCWA)* [4]. При этом было учтено, что модуль отрицательного угла падения излучения на микроструктуру $|\Psi_N|$ и положительный угол падения Ψ_P , приводящие к снижению ДЭ, оцениваемой RCWA-методом, до одного и того же уровня, могут существенно различаться. Поэтому за оценочный, т. е. максимально допустимый угол Ψ , как и в работах [5, 6], в настоящей статье принят наименьший из углов $|\Psi_N|$ и Ψ_P .

При расчетах предполагалось, что излучение видимого спектрального диапазона ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления $n_1(\lambda)$, а угол Ψ 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 оптический элемент с дифракционной микроструктурой в спектральном приборе или изображающей оптической системе, и дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекватным является критерий, предложенный в работе [6]. 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 не только отсутствие гало, но и любое другое визуально наблюдаемое отрицательное влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого оптической системой с дифракционным элементом. Этот критерий был успешно использован в целом ряде работ [7–9]. Здесь заметим, что максимально допустимый угол падения излучения (т. е. оценочный угол Ψ , приводящий к $\eta_{EM,min}^{(\Psi)} / \eta_{EM,max}^{(\Psi=0)} \geq 0,95$) будет зависеть не только от материалов микроструктуры, но и от отношения ее пространственного периода к оптимальной глубине рельефа $P = \Lambda / h_{Opt}$.

Оптимальная глубина рельефа и максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру были получены с использованием двух компьютерных программ, реализующих *RCWA-метод*: MC grating program и RCWA-PSUACE, представленных в работах [10, 11].

Результаты исследования представлены микроструктурами №2–4 в табл. 1. Для сравнения в этой таблице позицию №1 занимает лучшая из микроструктур, скомпонованных из коммерчески доступных материалов, разработанная и опубликованная нами ранее [12]. Один из ее слоев выполнен из пластика, а другой из GMOL [13, 14]. Также для сравнения в табл. 1 включена микроструктура №5 скомпонованная из нанокompозитных пластмасс [7, 8], разработанных авторами работы [15].

Данные табл. 1 показывают, что только оптическая пластмасса под условной маркой СМТ позволила получить максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру сопоставимые с соответствующими углами микроструктуры №1. Действительно изъятие этого пластика из базы данных привело к резкому ухудшению характеристик компонованных микроструктур. К сожалению, оптическая пластмасса с дисперсионной формулой, аналогичной формуле пластмассы СМТ, не включена ни в один коммерческий каталог и более не встречается в сети Интернет.

Учитывая, что ассортимент стекол, позволяющих тиражировать дифракционные элементы прецизионным литьем или штамповкой, в последнее время также существенно

Табл. 1. Лучшие из двухслойных однорельефных микроструктур

№	Оптические материалы двух слоев	Показатели преломления оптических материалов двух слоев	Числа Аббе оптических материалов двух слоев	Оптимальная глубина рельефа h_{opt} , мкм	Максимально допустимый угол падения излучения ψ , °
1	AL-6263 / M-LAC8	1,631926 / 1,713001	23,3281 / 53,9383	7,390 7,340 7,290	14,5 на $P = 10$; 18,5 на $P = 20$; 21,5 на $P = 30$
2	CMT / K26R	1,514003 / 1,535011	38,8168 / 55,6341	28,130 27,740 27,440	12,0 на $P = 10$; 19,0 на $P = 20$; 23,0 на $P = 30$
3	CMT / F52R	1,514003 / 1,534611	38,8168 / 56,0721	28,755 28,340 27,950	13,0 на $P = 10$; 20,0 на $P = 20$; 24,5 на $P = 30$
4	EP7000 / D-LAF82L	1,651006 / 1,734852	21,4946 / 48,7823	7,145 7,085 7,045	15,5 на $P = 10$; 20,0 на $P = 20$; 22,5 на $P = 30$?
5	Nanocomposite: ITO in PMMA / diamond in PMMA	1,604429 / 1,771782	10,0150 / 58,8174	3,200	36,3 на $P = 10$; 45,8 на $P = 20$; 50,0 на $P = 30$

расширился, мы заменили исключенный из базы данных пластик CMT стеклами типа GMOL. При компоновке микроструктур для одного слоя выбирался один из 47 пластиков, а для другого слоя выбиралось одно из 165 стекол. Лучшая из всех полученных таким образом комбинаций представлена в табл. 1 под номером 4. Нетрудно видеть, что эта гибридная микроструктура по предельно допустимым углам падения излучения сопоставима с чисто пластмассовыми микроструктурами, включающими CMT.

В то же время все описанные выше микроструктуры по допустимым углам падения излучения на микроструктуру как минимум в два раза уступают нанокompозитной микроструктуре №6, у которой приведенные в табл. 1 значения допустимых углов сохраняются и при расширении спектрального диапазона за счет смещения его длинноволновой границы до 0,8 мкм.

Следует подчеркнуть, что представленные выше результаты еще раз подтверждают известное требование к парам материалов двухслойных однорельефных микроструктур: материал с большим показателем преломления должен иметь и большее число Аббе [16–18].

Что касается двухслойных двухрельефных микроструктур (см. рис. 2б), то они предъявляют противоположные требования к дисперсионным характеристикам их материалов, т. е. материал с большим показателем преломления должен иметь меньшее число Аббе [6]. В результате уже самые распространенные оптические пластмассы PMMA и POLYCARB позволяют скомпоновать микроструктуру с весьма высокими характеристиками (№1 в табл. 2). Здесь сразу же заметим, что в этой таблице параметр $P = \Lambda / (h_1 + h_2)$.

В результате расширенного поиска в базе данных, включающей 48 оптических пластмасс, был получена целая группа двухрельефных микроструктур с допустимыми углами падения

Табл. 2. Лучшие из двухслойных двухрельефных микроструктур

№	Оптические материалы двух слоев	Показатели преломления оптических материалов двух слоев	Числа Аббе оптических материалов двух слоев	Оптимальные глубины рельефов, мкм		Максимально допустимый угол падения излучения ψ , °
				h_1	h_2	
1	PMMA / POLYCARB	1,491756 / 1,585470	57,4408 / 29,9092	15,10	11,68 11,67 11,67	7,2 при $P = 10$; 7,5 при $P = 20$; 10,5 при $P = 30$
2	E48R / POLY-SYR	1,531170 / 1,590481	56,0438 / 30,8669	16,30	13,65 13,68 13,68	7,3 при $P = 10$; 12,5 при $P = 20$; 14,5 при $P = 30$
4	E48R / EP7000	1,531170 / 1,651006	56,0438 / 21,4946	8,792	6,27 6,28 6,28	7,5 при $P = 10$; 12,5 при $P = 20$; 13,8 при $P = 30$
5	E48R / ITO in PMMA	1,531170 / 1,604429	56,0438 / 10,0150	4,72	3,26 3,26 3,26	14,5 при $P = 10$; 18,5 при $P = 20$; 22,3 при $P = 30$

излучения близкими к соответствующим углам ранее исследованных микроструктур № 1 и № 2 [9]. Лучшая микроструктура из этой группы, характеризующаяся наибольшими максимально допустимыми углами падения излучения, представлена в табл. 2 под № 4. Однако допустимые углы падения излучения на эти микроструктуры уступают соответствующим углам микроструктуры № 5, для компоновки которой использован нанокompозитный материал примерно в 1,5 раза.

Заключение

Опираясь на изложенные в настоящем докладе результаты исследования можно сделать следующие выводы.

Расширение ассортимента коммерчески доступных оптических пластмасс не открыло возможности компоновки двухслойных однорельефных микроструктур, рассчитанных на полихроматическое излучение видимого диапазона. Но ситуация изменится принципиально при появлении на рынке пластмассы с дисперсионной формулой, аналогичной формуле пластика под условной маркой СМТ. Тогда элементная база массовой оптики мобильных устройств и устройств видеонаблюдения пополнится дифракционными оптическими элементами с тремя типами микроструктуры: чисто пластмассовыми однорельефной и двухрельефной, а также с гибридной однорельефной микроструктурой. Наконец, освоение промышленного производства нанокompозитных оптических пластмасс откроет возможность эффективного использования дифракционных элементов и в широкоугольной оптике.

Благодарность

Авторы настоящей статьи признательны авторам работы [15] за представленную возможность использования дисперсионных формул, разработанных ими нанокompозитных материалов.

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

Список источников

- [1] Optical design program / URL: www.zemax.com.
- [2] Optical design program / URL: www.zemax.com/products/opticstudio.
- [3] MITSUBISHI GAS CHEMICAL, www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta_ep.html.
- [4] **Moharam, M. G.** [Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction](#) / M. G. Moharam, T. K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. — 1981. — Vol. 71. — № 7. — P. 811–818.
- [5] **Greisukh, G. I.** [Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth](#) / G. I. Greisukh, V. A. Danilov, E. G. Ezhov, I. A. Levin, S. A. Stepanov, B. A. Usievich // Optics Communication. — 2015. — Vol. 338. — P. 54–57.
- [6] **Грейсух, Г. И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов, Б. А. Усиевич // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 5. — С. 56–61.
- [7] **Greisukh, G. I.** [Potential opportunities of sawtooth diffraction microstructure with two layers and single relief](#) / G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, A. I. Antonov, V. A. Danilov, B. A. Usievich // Journal of Optics — 2020. — Vol. 22. — № 8. — P. 085604.
- [8] **Грейсух, Г. И.** 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 // Квантовая электроника. — 2020. — Том 50. — № 7. — С. 623–628.
- [9] **Грейсух, Г. И.** 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 // Квантовая электроника. — 2021. — Том 51. — № 2. — С. 184–188.
- [10] **Lyndin, N. M.** Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software / URL: www.mcgrating.com.
- [11] **Грейсух, Г. И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой / Г. И. Грейсух, А. И. Антонов, Е. Г. Ежов // Оптический журнал. — 2019. — Том 86. — № 6. — С. 3–6.
- [12] **Грейсух, Г. И.** Спектральная и угловая зависимость эффективности двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, А. И. Антонов, С. А. Степанов, Б. А. Усиевич // Компьютерная оптика. — 2018. — Том 42. — № 1. — С. 38–43.
- [13] HOYA GROUP Optics Division. Glass Molded Lenses / URL: www.hoyaopticalworld.com/english/products/moldlenses.html.
- [14] Refractive index database / URL: refractiveindex.info/?shelf=glass&book=CDGM-LAF&page=D-LAF82L
- [15] **Werdehausen, D.** [Dispersion-engineered nanocomposites enable achromatic diffractive optical elements](#) / D. Werdehausen, S. Burger, I. Staude, T. Pertsch, M. Decker // Optica. — 2019. — Vol. 6. — No 8. — P. 1031–1038.
- [16] **Патент № 271240 РФ.** Голограммный оптический элемент / А. В. Лукин, К. С. Мустафин, Р. А. Рафиков // (1985).
- [17] **Лукин, А. В.** Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — № 1. — С. 80–87.
- [18] **Грейсух, Г. И.** Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур / Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов // Компьютерная оптика. — 2008. — Том 32. — № 1. — С. 43–46.