

3. Дифракционные микроструктуры: перспективы развития и ограничения

Г. И. Грейсух¹, В. А. Данилов², Е. Г. Ежов¹, А. И. Антонов¹, Б. А. Усиевич³

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

³ Институт общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

Показано, что подход к исследованию многослойных дифракционных микроструктур, основанный на совместном использовании Q -факторов, полученных в бесконечно тонком приближении в рамках скалярной теории дифракции, и метода строгого анализа связанных волн позволяет достоверно оценить предельные спектральные и угловые характеристики многослойных микроструктур различных типов. Опираясь на эти оценки анализируются пути и перспективы совершенствования микроструктур.

Ключевые слова: Дифракционный оптический элемент, Многослойная рельефно-фазовая дифракционная микроструктура, Ди-фракционная эффективность, Скалярная и строгая теории дифракции.

Цитирование: Грейсух, Г. И. Дифракционные микроструктуры: перспективы развития и ограничения / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, А. И. Антонов, Б. А. Усиевич // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 15–24.

Введение

Основным элементом в голографии и в дифракционной оптике является, как известно, периодическая микроструктура, изменяющая направление распространения электромагнитной волны в зависимости от длины волны. При этом другое неотъемлемое свойство микроструктуры — зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны и угла падения излучения на микроструктуру, может играть как конструктивную, так и деструктивную роль. Например, именно это свойство позволяет наблюдать восстановленное монохроматическое изображение при освещении голограммы Денисюка белым светом. В то же время, если оптический элемент с дифракционной микроструктурой (ДОЭ) предполагается использовать в спектральном приборе или изображающей оптической системе, и дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то зависимость ДЭ от длины волны и угла падения излучения несомненно деструктивна и должна быть минимизирована.

Первый шаг в решении этой задачи был сделан А. В. Лукиным в 1985 г. [1, 2]. Изобретение предполагало компоновку рельефно-фазовой дифракционной микроструктуры (РФДМ) из двух различных оптических материалов, как показано на рисунке 1.

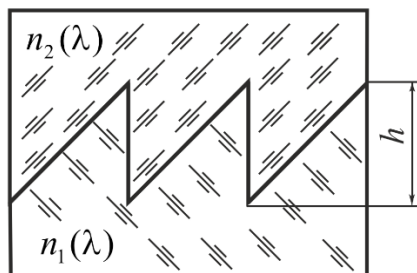
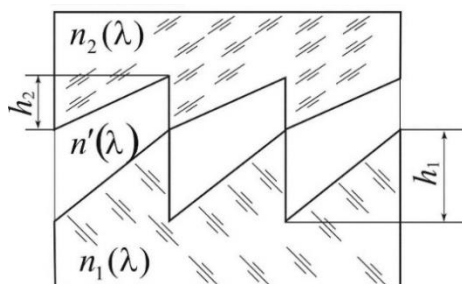
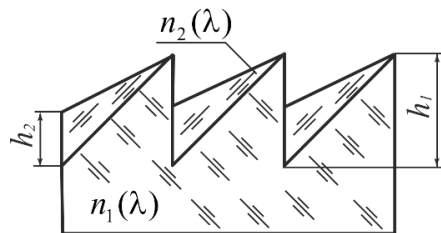


Рис. 1. Двухслойная пилообразная РФДМ



а) Двухслойная при $n' = 1$ и трехслойная при $n' \neq 1$ микроструктура с двумя внутренними рельефами



б) Двухслойная микроструктура с внутренним и наружным рельефами

Рис. 2. Двухрельефная пилообразная РФДМ

При этом у того оптического материала, у которого показатель преломления больше, дисперсия должна быть меньше, т. е. разность показателей преломления $n_2(\lambda) - n_1(\lambda)$ с увеличением длины волны должна увеличиваться (комбинация 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) [3]. Линзы из этих материалов могут легко тиражироваться прецизионным литьем или штамповкой. Причем практически без удорожания таким способом тиражироваться могут и линзы с дифракционным микрорельефом на сферической или даже асферической поверхности [4]. К сожалению, даже лучшие комбинации «оптическая пластмасса — GMOL» не позволяют снизить зависимость ДЭ от длины волны и угла падения излучения на ДОЭ до желаемого уровня [5]. Поэтому поиск новых приемлемых оптических материалов для таких микроструктур продолжается.

Следующий шаг в решении задачи ослабления зависимости ДЭ пилообразной РФДМ от длины волны и угла падения излучения предполагает переход к структурам, содержащим два рельефа, которые разделяют два или три слоя оптических материалов [6–12] (рисунки 2а и 2б). Два рельефа позволяют легко решить поставленную задачу используя только два слоя, выполненных из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс. Действительно в этом случае у того оптического материала, у которого показатель преломления больше, дисперсия также должна быть больше, т. е. разность показателей преломления

$n_2(\lambda) - n_1(\lambda)$ с увеличением длины волны должна уменьшаться (комбинация обычного флинтоподобного и кроноподобного материалов).

1. Инструментарий исследования и оценки качества РФДМ

Поиск оптимальных комбинаций оптических материалов как для однорельефных, так и для двухрельефных микроструктур при относительно небольших затратах компьютерного времени позволяют выполнить оценочные параметры, полученные в бесконечно тонком приближении в рамках скалярной теории дифракции. К таким параметрам, в частности, относятся предложенные в работах [13, 14] локальный и интегральный Q -факторы микроструктуры:

$$\begin{aligned} Q_{Loc} &= |Q_i|_{\max}, \\ Q_{Int} &= \sqrt{\frac{1}{i_{\max}} \sum_1^{i_{\max}} Q_i^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$Q_i = \frac{\Delta l(\lambda_i)}{\lambda_i} - 1. \quad (2)$$

В формуле (2) $\Delta l(\lambda_i)$ — приращение оптического пути на одном периоде РФДМ, вычисленное на i -й длине волны рабочего спектрального диапазона ($\lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}$).

В случае двухслойной однорельефной микроструктуры (рисунок 1) выражения (1), полученные в предположении нормального падения излучения на микроструктуру, имеют вид [13]

$$Q_i = \frac{\delta \Delta n(\lambda_i)}{\Delta n^{(Lin)}(\lambda_i)} - 1. \quad (3)$$

$$Q_{Int} = \sqrt{\frac{1}{i_{\max}} \sum_1^{i_{\max}} \left[\frac{\Delta n(\lambda_i) - \Delta n^{(Lin)}(\lambda_i)}{\Delta n^{(Lin)}(\lambda_i)} \right]^2}, \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \delta \Delta n(\lambda_i) &= \Delta n(\lambda_i) - \Delta n^{(Lin)}(\lambda_i), \\ \Delta n(\lambda_i) &= n_2(\lambda_i) - n_1(\lambda_i), \\ \Delta n^{(Lin)}(\lambda) &= \lambda_i \Delta n(\bar{\lambda}) / \bar{\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а $\bar{\lambda}$ — центральная длина волны рабочего спектрального диапазона. Глубина же рельефа вычисляется по формуле

$$h = \frac{\bar{\lambda}}{n_2 \bar{\lambda} - n_1 \bar{\lambda}}. \quad (6)$$

Очевидно, что перебор всех оптических материалов из соответствующих каталогов основных мировых производителей с целью минимизации одного из выбранных оценочных

параметров (Q_{Loc} или Q_{Int}) позволит получить оптимальную комбинацию оптических материалов при минимальных затратах компьютерного времени.

Процедура получения оптимальной комбинации материалов двухслойной двухрельефной микроструктуры несколько сложнее. Прежде всего необходимо для исходной тройки оптических материалов и начального значения глубины рельефа $h_1 \geq 10\bar{\lambda}$ найти соотношение между глубинами рельефов, обеспечивающее (на длине волны $\bar{\lambda}$ при нормальном падении излучения) оптическую разность хода $\Delta l(\bar{\lambda}) = \bar{\lambda}$ и, соответственно, ДЭ = 1.

$$k = \frac{h_2}{h_1} = \frac{n_1(\bar{\lambda}) - 1}{n_2(\bar{\lambda}) - 1} - \frac{\bar{\lambda}}{h_1 [n_2(\bar{\lambda}) - 1]}. \quad (7)$$

Оценочный параметр Q_i будет вычисляться по формуле (2) с использованием выражения

$$\Delta l(\lambda_i) = h_1 \left([n_1(\lambda_i) - 1] - k [n_2(\lambda_i) - 1] \right). \quad (8)$$

При фиксированных параметрах h_1 и k следует получить набор значений Q_i для ряда длин волн, удовлетворяющих условию $\lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}$. Данный набор позволит определить промежуточные значения локального Q_{Loc} и/или интегрального Q_{Int} оценочного параметра. Эти значения будут характеризовать максимальное падение ДЭ микроструктуры, скомпонованной из выбранной тройки оптических материалов, в пределах заданного спектрального диапазона при начальном значении глубины рельефа h_1 . Итерационный процесс по h_1 позволит найти оптимальные глубины рельефов, обеспечивающие минимально возможное падение ДЭ для микроструктуры, скомпонованной из выбранной тройки оптических материалов. Перебор всех оптических материалов из соответствующих каталогов основных мировых производителей позволит получить микроструктуру, у которой падение ДЭ в пределах заданного спектрального диапазона минимально.

Далее следует отметить, что Q -факторы позволяют лишь оперативно сопоставить комбинации оптических материалов для многослойной пилообразной микроструктуры и отобрать из них наиболее перспективные. А получить достоверную оценку зависимости ДЭ от угла падения излучения на микроструктуру можно лишь в рамках строгой теории дифракции путем решения системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями и, в частности, так называемым методом строгого анализа связанных волн (Rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [15].

Очевидно, что оценка оптимальной глубины рельефа микроструктуры и максимально допустимого угла падения излучения на нее зависит от выбора соответствующего критерия. Если предполагается использовать ДОЭ в спектральном приборе или изображающей оптической системе и, как уже отмечалось, дифракция излучения в побочные порядки нежелательна на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, то наиболее адекватным является критерий, предложенный в работе [10]. 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 ДОЭ. Этот критерий был успешно использован в целом ряде работ [5, 11, 12].

2. Перспективы развития и принципиальные ограничения

Достоверный прогноз перспектив, как известно, невозможен без анализа предшествующих достижений. Поэтому в таблице 1 представлены двухслойные одно- и двухрельефные пилообразные микроструктуры, скомпонованные из ряда пар оптических материалов, у которых достигнуто максимальное подавление спектральной и угловой зависимости ДЭ.

В столбце «Литературный источник» таблицы 1 указана работа, в которой впервые исследовалась микроструктура, скомпонованная из данной пары оптических материалов. Расчеты для этих работ также, как и для настоящей статьи, выполнялись в предположении, что излучение падает на микроструктуру из воздуха со стороны среды с показателем преломления $n_1(\lambda)$ (рисунки 1 и 2), а угол Ψ отсчитывается от нормали к подложке.

В столбце таблицы 1 «Максимально допустимый угол падения излучения» указано какому значению отношения пространственного периода микроструктуры к оптимальной величине эффективной глубины рельефа $P = \Lambda / h_{effect}^{(opt)}$ соответствует максимально допустимый угол. При этом у микроструктуры, изображенной на рисунке 1, $h_{effect} = h$, а у микроструктур, изображенных на рисунках 2а и 2б, $h_{effect} = h_1 + h_2$ и $h_{effect} = h_1$, соответственно.

В пределах спектрального диапазона и интервала углов падения излучения на микроструктуру, указанных в таблице 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 указанные в этой таблице, получены с использованием двух компьютерных программ, реализующих RCWA-метод: MC Grating Program и RCWA-PSUACE, представленных в работах [17, 18]. Все двухслойные двухрельефные микроструктуры части 2 этой таблицы имеют внутренний и наружный рельефы (рисунок 2б).

Представленная таблица как в части 1, так и в части 2 демонстрирует 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 однорельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов (№1.1 и №1.2), весьма близки, но значительно уступают характеристикам микроструктуры №1.3. Эта микроструктура, скомпонованная из наноконфо-

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

№	Оптические материалы двух слоев	Литературный источник	Оптимальные глубина h или глубины h_1/h_2 рельефов, мкм	Спектральный диапазон $\lambda_{\min}-\lambda_{\max}$, мкм	Локальный и интегральный Q-факторы		Максимально допустимый угол падения излучения ψ , °
					Q_{Loc}	Q_{Int}	
1. Однорельефные микроструктуры							
1.1	E48R/Toluene	[9]	15,09	0,4–0,7	0,1353	0,058	21,7 при $P = 10$; 28,3 при $P = 20$; 33,2 при $P = 30$
1.2	AL-6263/M-LAC8	[5]	7,319	0,4–0,7	0,1366	0,061	13,0 при $P = 10$; 18,0 при $P = 20$; 21,8 при $P = 30$
1.3	Nanocomposite: diamond in PMMA/ITO in PMMA	[16]	3,2	0,4–0,8	0,0452	0,016	36,3 при $P = 10$; 45,8 при $P = 20$; 50,0 при $P = 30$
1.4	Nanocomposite: diamond in PMMA/mathematical model	[13]	3,2	0,4–0,8	0	0	37,7 при $P = 10$; 48,5 при $P = 20$; 53,5 при $P = 30$
1.5	Nanocomposite: ZrO ₂ in PMMA/PC	[16]	18,9	0,4–0,8	0,1792	0,070	4,0 при $P = 10$; 6,3 при $P = 20$; 15,7 при $P = 30$
1.6	Nanocomposite: ZrO ₂ in PMMA/mathematical model	[13]	24,6	0,4–0,8	0	0	25,6 при $P = 10$; 41,7 при $P = 20$; 47,3 при $P = 30$
2. Двухрельефные микроструктуры							
2.1	PMMA/PC	[10]	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 $P = 30$
2.2	PMMA/mathematical model	[14]	15,1 / 11,79	0,4–0,7	0	0	3,6 при $P = 10$; 26,5 при $P = 20$; 27,0 при $P = 30$
2.3	E48R/PC	[14]	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 $P = 30$
2.4	E48R/mathematical model	[14]	16,3 / 13,76	0,4–0,7	0	0	7,7 при $P = 10$; 26,1 при $P = 20$; 28,2 при $P = 30$

зитных материалов и рассчитанная на расширенный спектральный диапазон, имеет существенно большие допустимые углы. Для того чтобы определить, являются ли эти углы предельными для двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры, в работе [13] было предложено заменить один из оптических материалов микроструктуры такой математической моделью, которая обеспечит $Q_{Loc} = Q_{Int} = 0$. Для анализа были выбраны микроструктуры № 1.3 и № 1.5, имеющие минимальные и максимальные значения Q-факторов и, соответственно, наибольшие и наименьшие допустимые углы падения излучения на микроструктуру.

У модельной микроструктуры № 1.4, как и у микроструктуры № 1.3, нижний слой, на который из воздуха падает излучение, выполнен из материала nanocomposite: diamond in PMMA. Его показатель преломления на центральной длине волны $\bar{\lambda} = 0,6$ мкм спектрального диапазона, ограниченного длинами волн $\lambda_{\min} = 0,4$ мкм и $\lambda_{\max} = 0,8$ мкм, и коэффициент дисперсии, вычисленный по формуле

$$v^{(\bar{\lambda})} = \frac{n_{\bar{\lambda}} - 1}{n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}}, \quad (9)$$

где $n_{\lambda_{\min}}, n_{\bar{\lambda}}, n_{\lambda_{\max}}$ — значения показателя преломления среды на минимальной λ_{\min} , центральной $\bar{\lambda}$ и максимальной λ_{\max} длинах волн выбранного спектрального диапазона, соответственно равны $n_{\bar{\lambda}} = 1,77097$, $v^{(\bar{\lambda})} = 23,533$. Верхний модельный материал обеспечивает $Q_{Loc} = Q_{Int} = 0$ и то же самое значение $\Delta n(\bar{\lambda})$, что и у микроструктуры № 1.3.

У модельной микроструктуры № 1.6, как и у микроструктуры № 1.5, нижний слой, на который из воздуха падает излучение, выполнен из материала nanocomposite: ZrO_2 in PMMA. Его показатель преломления на центральной длине волны и коэффициент дисперсии соответственно равны $n_{\bar{\lambda}} = 1,61748$, $v^{(\bar{\lambda})} = 18,824$. Верхний модельный материал обеспечивает $Q_{Loc} = Q_{Int} = 0$ и то же самое значение $\Delta n(\bar{\lambda})$, что и у микроструктуры № 1.5.

Расчет и оптимизация глубин рельефов микроструктур № 1.4 и 1.6 показали, что допустимые углы падения излучения из воздуха на микроструктуру № 1.4 больше соответствующих углов падения на микроструктуру № 1.6 (таблица 1). При этом нормированная разница углов, соответствующих одному и тому же значению P , уменьшается с ростом этого параметра микроструктуры. Действительно, если при $P = 10$ нормированная разница углов составляет примерно 47%, то при $P = 30$ всего лишь 13%. Эта тенденция выражена еще в большей степени для углов падения излучения на пилообразный рельеф внутри первого слоя этих микроструктур. Более того дополнительные исследования микроструктур с $Q = 0$, скомпонованных из двух модельных материалов, показали, что допустимые углы падения излучения практически не зависят от формы дисперсионной кривой $n_1(\lambda)$, а определяются лишь оптимальной глубиной рельефа h , т. е. разностью $\Delta n(\bar{\lambda}) = n_2(\bar{\lambda}) - n_1(\bar{\lambda})$ (формула (6)). Учтем вышеизложенное и примем во внимание, что материалы микроструктуры № 1.4 обеспечивают максимально возможную для известных оптических материалов (пригодных для ДОЭ) разность $\Delta n(\bar{\lambda})$ и соответственно минимальную h . Это позволит рассматривать полученные допустимые углы микроструктуры № 1.4 как предельные для двухслойной однорельфной пилообразной микроструктуры.

Здесь следует заметить, что в таблице 1 не нашли отражения двухслойные однорельфные РФДМ, для компоновки которых использовались наноккомпозитные материалы с наночастицами из двуокиси циркония и титана [19]. Также в эту таблицу не вошла РФДМ, скомпонованная из УФ-отверждаемых смол двух новых типов [20]. Нам не удалось связаться с авторами этих инновационных разработок и получить дисперсионные формулы их материалов. В результате мы не смогли сопоставить по единому критерию результаты этих разработок с результатами, представленными в таблице 1, и оценить насколько спектральные и угловые характеристики не вошедших в таблицу микроструктур близки к предельно возможным для микроструктур данного типа.

Угловые характеристики двухрельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов (№2.1 и 2.3), вполне сопоставимы, но значительно уступают характеристикам микроструктуры №1.3. Для того чтобы установить предельные характеристики двухслойных двухрельефных микроструктур и оценить насколько эти характеристики у микроструктур №2.1 и 2.3 отличаются от предельно возможных, верхний оптический материал этих микроструктур заменялся соответствующей математической моделью, обеспечивающей выполнение условия $Q_{Loc} = Q_{int} = 0$. При этом глубины рельефов h_1 нижних слоев микроструктур №2.2 и 2.4 принимались равными глубинам h_1 микроструктур №2.1 и 2.3, 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 №2.2 при $P = 30$ равен $17,5^\circ$, в то время как соответствующий угол микроструктуры №2.4 составляет $17,75^\circ$. Следовательно, представленные в таблице 1 максимально допустимые углы падения излучения на модельные микроструктуры №2.2 и 2.4 можно рассматриваться как предельные углы для двухслойных двухрельефных пилообразных микроструктур. Данные углы примерно в полтора раза превышают максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуры №2.1 и 2.3. Это существенно отличается от того, что продемонстрировано для однорельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных оптических материалов, допускающих прецизионное литье или штамповку.

Заключение

Изложенный в настоящем докладе подход к исследованию многослойных РФДМ, основанный на совместном использовании Q -факторов и RCWA-метода, позволил установить нижеследующее:

1. В видимом спектральном диапазоне (0,4–0,7 мкм) максимально допустимые углы падения излучения на микроструктуру, достигнутые у двухслойных однорельефных микроструктур, скомпонованных из традиционных и допускающих прецизионное литье или штамповку оптических материалов, не более чем на 15–20% превышают соответствующие углы падения на двухслойные двухрельефные микроструктуры, компонуемые из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс. В то же время предельные углы падения излучения на двухслойные однорельефные микроструктуры почти вдвое превышают соответствующие углы двухслойных двухрельефных микроструктур.

2. Технологичные и коммерчески доступные пластмассы позволяют компоновать двухслойные двухрельефные микроструктуры со спектральными и угловыми характеристиками, близкими к предельно возможным 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 у двухслойных однорельефных микроструктур спектральные и угловые характеристики, максимально приближенные к предельным, позволяет их компоновка из нанокompозитных оптических материалов.

Благодарность

Авторы настоящей статьи признательны авторам работы [16] 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] Патент 1271240 РФ. Голограммный оптический элемент / А. В. Лукин, К. С. Мустафин, Р. А. Рафиков. — Обубл. 1985.
- [2] Лукин, А. В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — №1. — С. 80–87.
- [3] HOYA GROUP Optics Division. Glass Molded Lenses / URL: www.hoyaopticalworld.com/english/products/moldlenses.html.
- [4] Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses / URL: www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200.
- [5] 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.
- [6] Ebstein, S. T. Achromatic diffractive optical elements // Proc. of SPIE. — 1995. — Vol. 2404. — P. 211–216.
- [7] Design concepts for broadband high-efficiency DOEs / В. Н. Kleemann, М. Seesselberg, J. Ruoff // URL: www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/176.
- [8] 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.
- [9] Грейсух, Г. И. Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойной микроструктурами / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов, Б. А. Усиевич // Оптика спектроскопия. — 2015. — Том 118. — №6. — С. 118–125.
- [10] 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.
- [11] Грейсух, Г. И. Минимизация суммарной глубины внутренних пилообразных рельефов двухслойной рельефно-фазовой дифракционной микроструктуры / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, А. И. Антонов, С. А. Степанов, Б. А. Усиевич // Оптика спектроскопия. — 2018. — Том 124. — №1. — С. 100–104.

- [12] **Грейсух, Г. И.** Спектральная и угловая зависимость эффективности трехслойных рельефно-фазовых дифракционных элементов ИК-диапазона / Г. И. Грейсух, В. А. Данилов, С. А. Степанов, А. И. Антонов, Б. А. Усиевич // Оптика спектроскопия. — 2018. — Том 125. — №1. — С. 57–61.
- [13] **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. — No. 7 (in press).
- [14] **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. — Том 50. — №7 (в печати).
- [15] **Moharam, M. G.** Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction / M. G. Moharam, T. K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. — 1981. — Vol. 71. — No 7. — P. 811–818.
- [16] **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.
- [17] **Lyndin, N. M.** Modal and C Methods Grating Design and Analysis Software / URL: www.mcgrating.com.
- [18] **Грейсух, Г. И.** Одно- и многослойные киноформные элементы для компактных объективов среднего ИК диапазона / Г. И. Грейсух; А. И. Антонов; Е. Г. Ежов / Оптический журнал. — 2019. — Том. 86. — № 6. — С. 3–6.
- [19] **Korenaga, T.** Design method for diffractive lens for imaging and improvement of diffraction efficiency by laminating novel nanocomposite film on diffractive lens / T. Korenaga, T. Ando, Y. Okada, S. Nishiwaki, M. Suzuki // Optical review. — 2014. — Vol. 21. — No 6. — P. 737–744.
- [20] **Nakamura, T.** Fundamental properties of broadband dual-contact diffractive optical elements / T. Nakamura, K. Suzuki, Y. Inokuchi, S. Nishimura // Optical Engineering. — 2019. — Vol. 58. — P. 085103.