

УЧЕТ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2016 г. Г. И. Грейсух, доктор техн. наук; Е. Г. Ежов, доктор физ.-мат. наук;
С. А. Степанов, доктор физ.-мат. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

E-mail: grey@pguas.ru, subscribing_2002@mail.ru

Известные методики компоновки, расчета и оптимизации изображающих оптических систем, включающих дифракционную линзу, предложено дополнить требованиями, реализация которых позволяет достичь высокой дифракционной эффективности этой линзы в достаточно широком спектральном диапазоне и интервале углов падения излучения на микроструктуру линзы, что является необходимым условием практического отсутствия паразитных изображений, формируемых побочными дифракционными порядками. На примере рефракционно-дифракционного объектива, работающего в расширенном спектральном диапазоне, включающем видимое и ближнее инфракрасное излучения, продемонстрирована эффективность предложенной усовершенствованной методики.

Ключевые слова: рефракционно-дифракционные оптические системы, дифракционная эффективность, дифракционная линза, рельефно-фазовая микроструктура.

Коды OCIS: 050.1970, 160.4670, 160.4890

Поступила в редакцию 03.06.2015

Введение

Последние результаты исследований спектральной и угловой зависимостей дифракционной эффективности (ДЭ) рельефно-фазовых микроструктур (МС) [1–3] обуславливают необходимость корректировки известных методик компоновки, расчета и оптимизации изображающих рефракционно-дифракционных оптических систем (ОС), т.е. систем, включающих наряду с рефракционными линзами (РЛ), как правило, одну дифракционную линзу (ДЛ). Здесь сразу же отметим, что речь идет о проектировании компактных высокопрозрачных объективов для гаджетов и массовых видеокамер наблюдения, элементы оптических схем которых целесообразно изготавливать из пластмасс или стекла специальных марок (*glass for molded optics lenses* (GMOL)) [4], позволяющих легко тиражировать их путем прецизионных литья или штамповки. Практически без удорожания таким образом могут тиражироваться линзы с асферическими преломляющими поверхностями и с дифракционным микрорельефом на сферической или даже асферической поверхности (см., например [5]). Методики проекти-

рования таких объективов предполагают, как правило, трансформацию исходной традиционной-линзовой схемы. Это в равной степени относится к методикам проектирования как монофокальных [6–8], так и вариообъективов [9–11].

Выбор типа микроструктуры ДЛ

Выбор типа МС ДЛ определяется, прежде всего, заданным спектральным диапазоном. Если это видимый диапазон, ограниченный длинами волн вблизи синей F- и красной C- линий водорода ($\lambda_F = 0,48613$, $\lambda_C = 0,65626$ мкм), то можно ограничиться однослойной однорельефной МС с согласованной с требуемой фазовой задержкой формой пилообразного рельефа [12]. Если глубина рельефа будет выбрана так, чтобы в пределах используемого спектрального диапазона кривая ДЭ не опускалась ниже 0,85 на одном из его краев и была не ниже 0,9 на другом, то, как показано в работе [13], негативное влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения и, прежде всего, гало будут гарантировано отсутствовать. Естественно, приведенное выше условие должно выполняться во всем интервале углов падения излучения на МС ДЛ.

Расчет глубины рельефа и оценка ДЭ однослойной однорельефной МС могут быть выполнены без потери достоверности в рамках скалярной теории дифракции (СТД). Действительно, оптимальная глубина рельефа h однослойной однорельефной МС приблизительно 1 мкм. Следовательно, при легко достижимом относительном минимальном периоде в МС ДЛ $\Lambda_{\min}/h > 20-40$ совпадение оптимальных глубин рельефа и оценок ДЭ, получаемых в рамках СТД и строгой теорией дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла методом связанных волн (*rigorous coupled-wave analysis* (RCWA)), практически гарантировано [1, 3]. Сразу же заметим, что условие $\Lambda_{\min}/h > 20-40$ легко достижимо как с точки зрения технологии изготовления МС, так и с точки зрения обеспечения с помощью ДЛ требуемой коррекции аберраций.

В качестве примера на рис. 1 приведены спектральные зависимости ДЭ, полученные в рамках СТД, для ряда углов падения излучения на МС, выполненную в поликарбонате (*polycarbonate* (PC)) (табл. 1). В этой таблице приведены параметры пилообразных однослойных однорельефных МС, выполненных в нескольких оптических пластмассах и GMOL. При указанных параметрах выполняются условия, гарантирующие отсутствие гало.

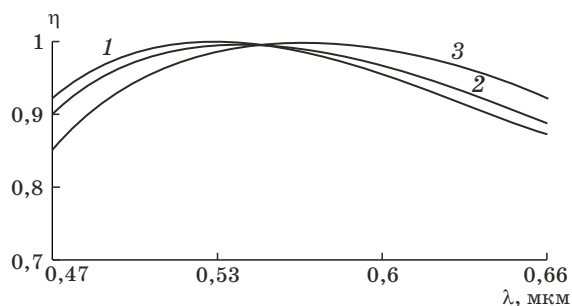


Рис. 1. Спектральные зависимости ДЭ (η) при углах падения излучения 0 (1), 15 (2) и 25° (3) на МС, выполненную в РС.

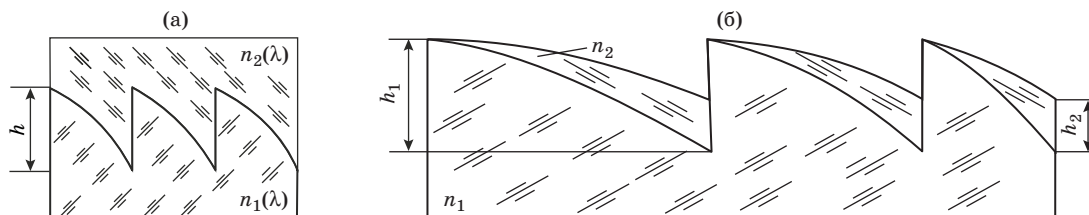


Рис. 2. Фрагменты двуслойных МС ДЛ с одним (а) и двумя (б) пилообразными рельефами, согласованными с требуемой фазовой задержкой.

Таблица 1. Параметры пилообразных однослойных однорельефных МС, обеспечивающие отсутствие гало в спектральном диапазоне $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} = \lambda_C$

Оптический материал	h , мкм	λ_{\min} , мкм	θ , град
AL-6263-(ОКР4НТ)	0,836	0,477	25,7
M-PCD51	0,886	0,463	25,4
РС	0,901	0,472	25,0
M-PCD500	0,948	0,468	25,0
M-PCD1	1,054	0,462	24,5
PMMA	1,067	0,465	24,4

Таким образом, при использовании в ограниченном видимом спектральном диапазоне ДЛ с однослойной однорельефной МС можно рассчитывать на ДЭ, обеспечивающие отсутствие негативного влияния на качество формируемого изображения побочных дифракционных порядков при углах падения излучения на МС до $\theta_{\max} \approx 25^\circ$.

При более высоких требованиях к качеству изображения и, тем более, в более широком спектральном диапазоне, например, расширенном видимом ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм) или диапазоне, включающем видимое и ближнее инфракрасное излучения ($0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), переход, как минимум, к двуслойной МС неизбежен (рис. 2).

Результаты исследования двуслойной двухрельефной МС, компонуемой из двух коммерчески доступных оптических пластмасс – полиметилметакрилата (*polymethylmethacrylate* (PMMA)) и РС, представленные в работе [2], показали, что при $0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм ДЭ в первом рабочем порядке дифракции на всех длинах волн не упадет ниже 0,95 от максимального значения (достигаемого при нормальном падении излучения на МС), если минимальный относительный период $\Lambda_{\min}/h > 20$ и углы падения излучения $\theta \leq 15^\circ$. Практически такие же возможности обеспечивает двуслойная одноре-

льефная МС, komponуемая из пластмассы E48R и оптической жидкости *Toluene*, исследованная в работе [3].

Однако наиболее технологичной сегодня представляется двуслойная однорельефная МС, komponуемая из GМОL и пластмассы. В этом случае оптимальная глубина рельефа так же, как и у МС с жидкостью, $h \approx 14$ мкм и, следовательно, отношению минимальному периоду $\Lambda_{\min}/h > 20$ соответствует $\Lambda_{\min} > 280$ мкм. Требования ограничения интервала углов падения излучения на МС сверху и минимального периода МС снизу должны быть включены в методику компоновки, расчета и оптимизации рефракционно-дифракционной ОС.

Ограничение углов падения главных лучей на МС ДЛ и ее пространственной частоты

С точки зрения достижения максимальной ДЭ наилучшим вариантом является нормальное падение всех главных лучей на МС ДЛ. Для этого в параксиальном приближении должны быть одновременно выполнены два условия: во-первых, поверхность, несущая МС ДЛ, должна быть концентрична выходному зрачку той части ОС, которая предшествует ДЛ, (это условие обеспечит нормальное падение главных лучей, соответствующих всем полевым углам), и во-вторых, задний фокус той части ОС, которая предшествует ДЛ, должен лежать в центре указанного выходного зрачка (это условие обеспечит нормальное падение всех лучей осевого пучка).

Совместное выполнение этих двух условий требует расположения апертурной диафрагмы в бесконечности, т.е. совмещение ее с предметной плоскостью, что невозможно. В то же время ограничение углов падения реальных лучей на ДЛ и даже их минимизация могут достигаться благодаря приближенному выполнению отмеченных выше условий, а также путем асферизации поверхностей РЛ и ДЛ рассчитываемого объектива. Практически, решение задачи ограничения углов падения включает, во-первых, поиск в исходной схеме той РЛ, на преломляющую поверхность которой главные лучи падают с наименьшими углами, а во-вторых, размещение на этой поверхности ДЛ и уже затем формирование дифракционно-рефракционного корректора [6] и применение методики коррекции хроматизма и трансформации исходной схемы [7–9, 11].

Контроль и дополнительное ограничение углов падения следует осуществлять на этапе оптимизации вводом соответствующих операторов в оценочную функцию. К сожалению, ограничение углов падения реальных лучей на ДЛ может сужать возможности коррекции aberrаций. Это обуславливает необходимость поиска компромисса между допустимым расширением диапазона углов, приводящим к снижению ДЭ, и уровнем остаточных aberrаций. Такой компромисс и является итогом успешной оптимизации.

Переходя к ограничению пространственной частоты МС ДЛ, напомним, что фокусирующие и aberrационные свойства дифракционных оптических элементов, как правило, описываются в рамках модели бесконечно тонкого фазового транспаранта, вносящего фазовую задержку в падающий на него волновой фронт. Одним из вариантов представления фазовой задержки в случае дифракционного элемента с кольцевой МС, т.е. ДЛ, является используемый в программе оптического проектирования ZEMAX степенной ряд [14]

$$\varphi(\rho) = m \sum_{p=1} A_p \rho^{2p}, \quad (1)$$

где ρ – расстояние, отсчитываемое от оптической оси.

При описании бесконечно тонкой МС ДЛ уравнением (1) ее оптическая сила определяется коэффициентом A_1 и номером дифракционного порядка m

$$\phi = -A_1 \lambda m / \pi. \quad (2)$$

Коэффициенты A_p при $p = 2, 3, \dots$ определяют вклад ДЛ в сферическую aberrацию третьего, пятого и последующих порядков.

В качестве поверхности вращения, несущей бесконечно тонкую МС ДЛ, будем рассматривать “четную” асферическую поверхность, описываемую в ZEMAX уравнением

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{l=2} \alpha_l \rho^{2l}, \quad (3)$$

где z – координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии ρ в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности, $c = 1/r$ – кривизна поверхности в ее вершине, k – коническая постоянная, α_l – коэффициенты, отвечающие за асферизацию поверхности.

Известно (см., например [15, 16]), что пространственная частота бесконечно тонкой МС

ДЛ, размещенной на плоскости, связана с вносимой ею фазовой задержкой соотношением

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{2\pi m} \left| \frac{d\varphi(\rho)}{d\rho} \right|. \quad (4)$$

Используя формулу дифракционной решетки и учитывая принятые в оптике правила знаков, нетрудно получить формулу дифракции меридионального луча на бесконечно тонкой МС, размещенной на криволинейной поверхности

$$\sin\theta' = \sin\theta - m\lambda\Omega(\rho)\cos\beta, \quad (5)$$

где θ' – угол между дифрагированным лучом и нормалью к криволинейной поверхности, β – угол между нормалью к поверхности и осью OZ .

Из формулы (5) следует, что радиусы границ кольцевых зон бесконечно тонкой МС ДЛ при одних и тех же коэффициентах A_p в выражении фазовой задержки $\varphi(\rho)$ остаются неизменными при любой кривизне поддерживающей МС поверхности. В то же время локальный период МС изменяется в зависимости от угла наклона нормали

$$\Lambda = 1/\Omega(\rho)\cos\beta. \quad (6)$$

Наглядной моделью, визуализирующей изложенное выше, является картина пересечения коаксиальных цилиндров с криволинейной поверхностью вращения, представленная на рис. 3.

Локальный период бесконечно тонкой МС, размещенной на любой сферической или асферической поверхности, может быть только больше чем в случае, когда МС с той же самой фазовой задержкой $\varphi(\rho)$ размещается на плоскости. Поэтому в качестве основного инструмента ограничения максимального значения пространственной частоты МС ДЛ следует рассматривать коэффициенты функции фазовой задержки и, прежде всего, коэффициент A_1 . Он пропорционален оптической силе ДЛ, которая находится из условия коррекции хроматизма,

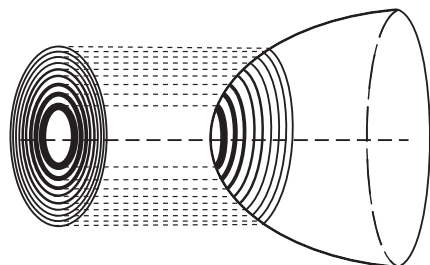


Рис. 3. Размещение МС, описываемой рядом (1), на криволинейной поверхности вращения.

и при заданном спектральном диапазоне зависит от выбора оптических материалов РЛ ОС. Таким образом, стремление ограничить максимальное значение пространственной частоты МС ДЛ накладывает дополнительное условие на выбор оптических материалов РЛ.

На этапе же оптимизации достаточно ограничить при неизменном коэффициенте A_1 коэффициенты A_p ряда (1) при $p = 2, 3, \dots$. Это позволит, не нарушая достигнутой на предыдущих этапах расчета коррекции продольного хроматизма, ограничить максимальное значение пространственной частоты, а следовательно, и минимальную ширину самой узкой кольцевой зоны в МС ДЛ. Что касается коррекции монохроматических и хроматических аберраций третьего и более высоких порядков, то она может достигаться за счет совместного воздействия на эти аберрации коэффициентов A_p и коэффициентов, отвечающих за асферизацию поверхности, т.е. k и α_l .

Эффективность совершенствования методики

В работе [7] описан компактный восьмилинзовый рефракционно-дифракционный апохромат, оптическая схема которого включает ДЛ, размещенную на задней асферической поверхности первой склеенной пары РЛ (рис. 4). Все линзы этого объектива выполнены из технологичных и коммерчески-доступных оптических пластмасс только двух марок – РММА и РС, при этом МС ДЛ выполнена в РММА (табл. 2). Фокусное расстояние объектива 3,7 мм, габарит (расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения) $L = 10,5$ мм, все преломляющие поверхности линз объектива – асферические. Степень коррекции аберраций этого объектива такова, что в спектральном диапазоне $0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм

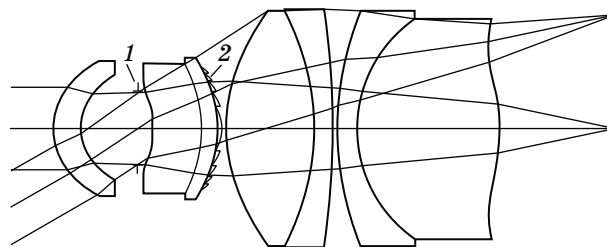


Рис. 4. Исходный восьмилинзовый рефракционно-дифракционный апохромат (1 – апертурная диафрагма, 2 – ДЛ).

Таблица 2. Конструктивные параметры исходного объектива (представлены в формате Zemax)

Поверхность	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал
Предметная плоскость (ПП)	∞	∞	–
1	1,338	0,517	РС
2	1,082	1,076	–
Апертурная диафрагма (АД)	∞	0,274	–
4	-1,522	0,913	РС
5	-2,454	0,300	PMMA
6*	-1,830	0,150	–
7	3,471	1,657	PMMA
8	-4,706	0,350	РС
9	-15,352	0,100	–
10	14,681	0,350	РС
11	2,501	2,679	PMMA
12	-3,108	2,175	–
Плоскость изображения (ПИ)	∞	0,000	–

Примечание. * Рабочий дифракционный порядок и первый коэффициент полинома фазовой задержки ДЛ: $m = 1$, $A_1 = -11,891 \text{ мм}^2$.

и в пределах углового поля $2\omega \leq 30^\circ$ полихроматическая дифракционная частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) не опускается ниже 0,5 при пространственных частотах до 100 лин/мм. При этом дисторсия менее $\pm 1\%$. В то же время минимальный период МС ДЛ этого объектива $\Lambda_{\min} < 70$ мкм, а максимальный угол падения лучей на МС относительно нормали превышает 32° . При таких параметрах, как показано в работе [2], компоновка МС из двух слоев (PMMA/РС) не позволит достичь требуемой ДЭ.

В соответствии с изложенными в настоящей статье рекомендациями, МС ДЛ рассматриваемого объектива была перенесена на заднюю асферическую поверхность второй склеенной пары РЛ, т.е. на заднюю поверхность РЛ, выполненной из РС. Контроль за углами падения “реальных” лучей на МС ДЛ и за ее пространственной частотой на этапах расчета и оптимизации позволил получить схему и конструктивные параметры объектива, по своим аберрационным характеристикам не уступающего исходному. При этом минимальный период МС ДЛ $\Lambda_{\min} = 200$ мкм, а максимальный угол падения лучей $\theta_{\max} \leq 15^\circ$.

Как показал анализ, проведенный в рамках СТД, в рассматриваемом спектральном диапазоне наилучшей из коммерчески доступных сегодня оптических пластмасс для компоновки двуслойной и двухрельефной МС на поверхности РЛ, выполненной из РС, является циклический олефиновый сополимер (*cyclic olefin copolymer* (COC)). У МС, выполненной из этих двух материалов (РС/COC), при оптимальных глубинах ($h_1 = 17,96$ мкм и $h_2 = 15,27$ мкм) ДЭ составит 0,9. Легко видеть, что в этом случае относительный минимальный период МС $\Lambda_{\min}/h \approx 10$. В результате следует ожидать, что прогноз RCWA окажется ниже скалярного и при этом ДЭ в любом случае окажется меньше 0,9.

С целью повышения ДЭ и упрощения технологии изготовления МС исследовалась возможность использования в рассматриваемом спектральном диапазоне двуслойной, но однорельефной МС. Как показал анализ, проведенный в рамках СТД и RCWA, в диапазоне $0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм наилучшей из коммерчески доступных сегодня пар материалов GMOL/пластмасса является пара M-LAC14/AL-6263-(ОКР4НТ). Она при глубине МС 10,25 мкм и максимальном угле падения лучей 15° обеспечивает ДЭ, равную 0,91. В результате замены РС пятой РЛ на M-LAC14 и последующей оптимизации был получен объектив, оптическая схема которого представлена на рис. 5, а конструктивные параметры сведены в табл. 3. В этой таблице в отличие от табл. 2 приведены коэффициенты асферизации преломляющих поверхностей линз, так как данные модернизированного объектива приводятся впервые.

Фокусное расстояние и габарит модернизированного объектива по-прежнему 3,7 мм и $L = 10,5$ мм. Степень коррекции аберраций этого объектива такова, что в спектральном диапазоне $0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм и в пределах углового поля $2\omega \leq 30^\circ$ полихроматическая дифракцион-

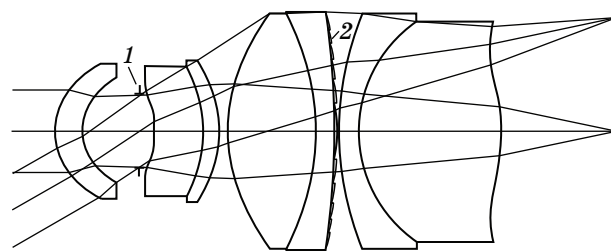


Рис. 5. Модернизированный восьмилинзовый рефракционно-дифракционный апохромат (1 – апертурная диафрагма, 2 – ДЛ).

Таблица 3. Конструктивные параметры модернизированного объектива (представлены в формате Zemax)

Поверхность	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал	Коэффициенты асферизации поверхности (коническая постоянная $k = 0$)			
				$\alpha_2 \times 10^2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3 \times 10^2, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4 \times 10^2, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5 \times 10^2, \text{мм}^{-9}$
ПП	∞	∞	–	–	–	–	–
1	1,363	0,561	РС	–	–	–	–
2	1,082	1,154	–	–	–	–	–
АД	∞	0,196	–	–	–	–	–
4	-1,572	0,874	РС	3,4401	1,7178	-1,6934	0,1272
5	-5,894	0,400	PMMA	–	–	–	–
6	-1,751	0,150	–	3,5310	0,7681	-0,2964	0,0366
7	3,3493	1,388	PMMA	–	–	–	–
8	-4,290	0,473	M-LAC14	–	–	–	–
9*	-12,896	0,100	–	0,3903	-0,2161	0,0521	-0,0042
10	8,755	0,299	РС	3,5317	-0,8517	0,1268	-0,0090
11	2,047	2,683	PMMA	–	–	–	–
12	-3,680	2,183		3,4222	0,1821	0,0057	-0,0072
ПИ	∞	0,0000	–	–	–	–	–

Примечание. * Рабочий дифракционный порядок и первые два коэффициента полинома фазовой задержки ДЛ: $m = 1, A_1 = -12,279 \text{мм}^{-2}, A_2 = 1,000 \text{мм}^{-4}$.

ная ЧКХ не опускается ниже 0,5 при пространственных частотах до 100 лин/мм и ниже 0,2 при пространственных частотах до 200 лин/мм. При этом дисторсия менее $\pm 1\%$. Минимальный период МС ДЛ этого объектива $\Lambda_{\min} > 280 \text{мкм}$ ($\Lambda_{\min}/h > 25$), а максимальный угол падения лучей на МС $14,3^\circ$. И, наконец, если спектральный диапазон сузить до $\lambda_F \leq \lambda \leq 0,8 \text{мкм}$, то ДЭ, прогнозируемая методом RCWA, поднимется до 0,95.

Заключение

Известные методики компоновки, расчета и оптимизации изображающих рефракционно-дифракционных ОС, изложенные в работах [6–11], предложено дополнить требованиями, реализация которых позволяет достичь высокой ДЭ микроструктуры ДЛ, входящей в такие системы, в достаточно широком спектральном диапазоне и интервале углов падения излучения на МС ДЛ. Определены требования к кривой спектральной зависимости ДЭ и ее минимальным значениям на границах рабочего спектрального диапазона, при которых удается добиться отсутствия гало в плоскости изображения, обусловленного паразитными изображениями, формируемыми побочными дифракционными порядками.

В зависимости от широты рабочего спектрального диапазона даны рекомендации по выбору конструкции МС (однослойная одно-рельефная МС или МС с несколькими слоями и рельефами). Даны также рекомендации по выбору материалов как однослойной МС, так и МС с подавленной спектральной и угловой зависимостью ее ДЭ. Выделена конструкция МС, позволяющая уменьшить глубину рельефа при одновременном упрощении технологии ее изготовления.

На примере компактного рефракционно-дифракционного объектива, работающего в расширенном спектральном диапазоне (включающем видимое и ближнее инфракрасное излучения) и описанного в работе [7], показано, что использование предложенных дополнений к методике расчета и реализация соответствующих требований к параметрам и режиму работы ДЛ позволяют достичь требуемой высокой ДЭ без ухудшения других оптических характеристик изображающей рефракционно-дифракционной ОС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A., Usievich B.A. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // Opt. Commun. 2015. V. 338. P. 54–57.
2. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 56–61.
3. Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А. Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойной микроструктурами // Опт. спектр. 2015. Т. 118. № 6. С. 118–125.
4. HOYA GROUP Optics Division. Glass Molded Lenses, <http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/moldlenses.html>
5. Edmund Optics, <http://www.edmundoptics.com>
6. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 24. P. 6137–6141.
7. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives // Appl. Opt. 2010. V. 49. № 23. P. 4379–4384.
8. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Левин И.А., Степанов С.А. Расчёт пластмассово-линзовых микрообъективов супер-ахроматов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 4. С. 473–479.
9. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Kalashnikov A.V., Stepanov S.A. Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 20. P. 4597–4604.
10. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Сидякина З.А., Степанов С.А. Расчёт и анализ компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариообъектива // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 2. С. 210–214.
11. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Sidiyakina Z.A., Stepanov S.A. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum // Appl. Opt. 2013. V. 52. № 23. P. 5843–5850.
12. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Калашников А.В., Левин И.А., Степанов С.А. Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля // Опт. спектр. 2012. Т. 113. № 4. С. 468–473.
13. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционным объективом цифровой фотокамеры // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 3. С. 27–31.
14. ZEMAX: software for optical system design, <http://www.radiantzemax.com>
15. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
16. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.