

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА

УДК 535.42

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗОБРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. И. Антонов, Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28
E-mail: grey@pguas.ru
subscribing_2002@mail.ru*

Проанализированы проблемы и возможности использования дифракционных элементов с пилообразной рельефно-фазовой микроструктурой в изображающих оптических системах. Особое внимание обращено на минимизацию негативного влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого оптической системой с дифракционным элементом за счёт перехода от однослойных микроструктур к структурам, содержащим несколько слоёв и рельефов. Сформулированы требования к конструктивным параметрам микроструктуры и условиям работы дифракционного элемента в составе оптической системы, обеспечивающие отсутствие визуально наблюдаемого гало, обусловленного побочными дифракционными порядками. На ряде примеров показано, что включение дифракционного элемента в пластмассово-линзовую изображающую оптическую систему позволяет скорректировать хроматизм и обеспечить высокое разрешение в формируемом изображении.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, пилообразная рельефно-фазовая микроструктура, изображающая оптическая система, дифракционная эффективность, качество оптического изображения.

DOI: 10.15372/AUT20170501

Введение. Основной целью включения дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в изображающие оптические системы является коррекция аберраций и, прежде всего хроматизма. В частности, ДОЭ с концентрически-кольцевой микроструктурой [1], представляющий собой дифракционную линзу небольшой оптической силы, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, например коммерчески доступных оптических пластмасс [2]. Переход от оптического стекла к пластмассам позволяет массово тиражировать линзы с асферическими преломляющими поверхностями и дифракционным микрорельефом на сферической или асферической поверхности [3]. Это существенно расширяет возможности коррекции монохроматических аберраций и в конечном счёте обеспечивает производство конкурентоспособных компактных высокоразрешающих оптических систем для фото- и видеокамер мобильных устройств, видеорегистраторов и др.

Однако дифракционный механизм преобразования волнового фронта на микроструктуре дифракционной линзы помимо положительного эффекта порождает и ряд проблем, связанных с негативным влиянием паразитного излучения, дифрагированного в побочные порядки. Действительно, используя известную формулу дифракционной эффективности, полученную в рамках скалярной теории дифракции [4, 5], нетрудно показать, что в случае пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры дифракционной линзы, которая обеспечивает на одной из длин волн видимого спектрального диапазона ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм)

дифракционную эффективность, близкую к 100 %, на краях диапазона эффективность падает до 75 %. При этом 25 % мощности излучения приходится на побочные порядки дифракции, а соотношения между их дифракционными эффективностями зависят от длины волны излучения [6, 7]. Такое явление, называемое спектральной зависимостью дифракционной эффективности, играет весьма негативную роль: с ним, в частности, связана вероятность возникновения цветного ореола (гало), сопровождающего наиболее яркие фрагменты изображения, формируемого оптической системой в полихроматическом излучении. Как показали экспериментальные исследования, вероятность возникновения гало может быть достоверно оценена по падению дифракционной эффективности в рабочем порядке дифракции [8].

Ослабить спектральную зависимость дифракционной эффективности микроструктуры, работающей на пропускание, и выровнять с той или иной степенью точности в заданном спектральном интервале эффективность в рабочем порядке позволяет решение, предложенное в [9, 10]. Это решение предполагает построение двухслойной рельефно-фазовой микроструктуры, выполненной в плоскопараллельной пластине из двух оптических материалов, каждый из которых ограничен плоской и рельефной поверхностями. Рельефные поверхности подобны, имеют одинаковую глубину и находятся в оптическом контакте друг с другом. Аналогичное решение предложено и в ряде других работ (например, [11]).

Непременным условием ослабления спектральной зависимости дифракционной эффективности двухслойной и фактически однорельефной микроструктуры является определённое соотношение между показателями преломления и коэффициентами дисперсии материалов слоёв (материал с большим показателем преломления должен иметь высокий коэффициент дисперсии — большее число Аббе [12]). В случае оптических стёкол наиболее приемлемой парой материалов является тяжёлый крон и лёгкий флинт. К сожалению, сегодня среди технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс отсутствуют пары с требуемым соотношением оптических констант. Тем не менее в [13] предложено решение, направленное на ослабление спектральной зависимости дифракционной эффективности рельефно-фазовых микроструктур, выполненных из таких материалов. Положительный эффект достигается за счёт использования двух рельефов разной глубины.

Дифракционная эффективность зависит от длины волны падающего излучения, угла падения излучения на микроструктуру, формы и глубины рельефа, а также от числа зон Френеля в микроструктуре дифракционной линзы. При этом под термином «зона Френеля» понимается участок микроструктуры, в пределах которого фазовая задержка, вносимая в падающий на него волновой фронт, изменяется от 0 до 2π [14]. При относительно большом числе зон Френеля (более 100) высокая дифракционная эффективность обеспечивается линейно-пилообразным рельефом. При малом числе зон Френеля оптимальная форма рельефа зависит от формы падающего волнового фронта, оптической силы дифракционной линзы, а также формы поверхности, в которой выполнена микроструктура дифракционной линзы. В [15, 16] рельефы, имеющие оптимальную форму, обеспечивают как максимальную дифракционную эффективность, так и совпадающую с расчётной форму результирующего волнового фронта, получили название коррелированных или согласованных. В этих же работах приведены уравнения коррелированных рельефов однослойных и двухслойных двухрельефных микроструктур, размещённых на плоских и криволинейных поверхностях раздела двух сред. Показано, что в случае двухслойных двухрельефных микроструктур с коррелированными рельефами при углах падения излучения на микроструктуру, не превышающих $15\text{--}17^\circ$, дифракционная эффективность в пределах всего видимого спектрального диапазона может не опускаться ниже 95 % независимо от числа зон Френеля в микроструктуре дифракционной линзы.

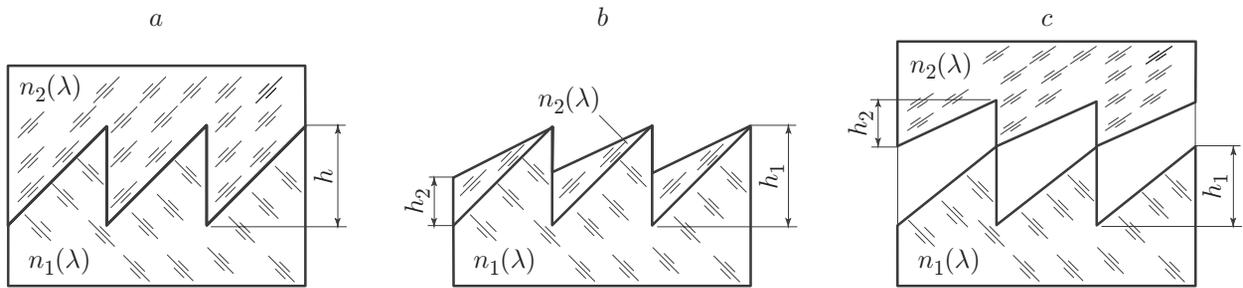


Рис. 1. Двухслойные пилообразные рельефо-фазовые микроструктуры с ослабленной спектральной зависимостью дифракционной эффективности: *a* — с одним внутренним рельефом, *b* — с внутренним и наружным рельефами, *c* — с двумя внутренними рельефами

Таким образом, при расчёте ДОО и выборе типа микроструктуры элемента необходимо учитывать и снижать негативное влияние всех вышеперечисленных факторов даже ценой усложнения конструкции микроструктуры и соответственно технологии изготовления элемента.

В предлагаемой работе дан обзор достижений в области использования ДОО в изображающих оптических системах.

Конструкции, расчёт и исследование многослойных микроструктур. В настоящее время за редким исключением (см., например, [17–19], где рассмотрены трёхслойные микроструктуры) наибольший интерес обращён к двухслойным микроструктурам, прежде всего, по причине относительной простоты их конструкции. Как уже отмечалось во введении и показано на рис. 1, сами такие микроструктуры могут содержать один [9] или два рельефа [20].

При выбранной конструкции многослойной микроструктуры расчёт её параметров сводится к оптимальному выбору оптических материалов слоёв и глубин соответствующих рельефов. Результат оптимизации, очевидно, зависит от выбора оценочной функции. В настоящее время авторам известны, по крайней мере, три подхода к выбору такой функции. В первом из них параметры многослойной микроструктуры (при выбранных материалах это глубины рельефов) рассчитываются исходя из условия, что дифракционная эффективность микроструктуры достигнет своего максимального значения на нескольких длинах волн заданного спектрального диапазона, количество которых равно числу слоёв микроструктуры [11]. Глубины рельефов определяются путём решения соответствующей системы уравнений. При этом анализ совместимости уравнений позволяет сформулировать требования к показателям преломления и дисперсионным характеристикам оптических материалов многослойной микроструктуры. Аналогичный подход использовался в ряде работ, посвящённых расчёту двухслойных микроструктур с ослабленной спектральной зависимостью дифракционной эффективности [21, 22]. С вычислительной точки зрения этот подход наиболее прост и в рамках скалярной теории дифракции допускает аналитическое решение.

Для того чтобы учесть вклад в дифракционную эффективность излучения всех длин волн выбранного спектрального диапазона, в работе [23] при оптимизации параметров двухслойной микроструктуры с подавленной спектральной зависимостью дифракционной эффективности предложено использовать в качестве оценочной функции интегральную полихроматическую дифракционную эффективность

$$\eta(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta(\lambda) d\lambda.$$

Использование такой оценочной функции, на наш взгляд, наиболее целесообразно, когда ДООЭ применяется для фокусировки полихроматического излучения в пятно заданного размера подобно, например, солнечному концентратору. В изображающих же оптических системах провал в дифракционной эффективности на любой длине волны рабочего спектрального диапазона, не влияя существенно на полихроматическую дифракционную эффективность, может привести к возникновению гало. При оптимизации параметров микроструктуры учесть данный факт позволяет оценка минимального значения дифракционной эффективности в пределах заданного спектрального диапазона и интервала углов падения излучения на микроструктуру [13]. Это значение вычисляют, как правило, в скалярном приближении теории дифракции. В таком приближении зависимость (как от длины волны λ , так и от угла падения излучения на микроструктуру θ) дифракционной эффективности в любом порядке дифракции микроструктур, имеющих произвольное число рельефов и слоёв, можно оценить по формуле [5]

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

где m — номер дифракционного порядка, Δl — приращение оптического пути на одном периоде (на одной кольцевой зоне) пилообразного профиля, зависящее от угла падения излучения на микроструктуру θ , а также показателей преломления материалов $n_i(\lambda)$ и глубин рельефов h_i .

В случае двухслойной однорельефной микроструктуры (рис. 1, *a*) приращение оптического пути имеет вид [24]

$$\Delta l = h \left(\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \theta} \right),$$

а в случае двухслойных микроструктур с внутренним и наружным или с двумя внутренними рельефами, представленных на рис. 1, *b*, *c*, величина Δl вычисляется по формуле [18]

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

Имеется достаточно большое количество работ, посвящённых анализу применимости скалярной теории дифракции для расчёта дифракционной эффективности как однослойных, так и многослойных микроструктур. В частности, в [25] показано, что значения дифракционной эффективности двухслойной микроструктуры, получаемые в рамках строгой теории дифракции, основанной на решении системы уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями, в общем случае ниже значений, даваемых скалярной теорией. Однако, если для минимального относительного периода микроструктуры выполняется условие $\Lambda_{\min}/h \geq 10$, где h — полная глубина рельефа, то это различие значений дифракционной эффективности незначительно и им можно пренебречь. Вышеприведённое условие, как правило, используется при расчёте микроструктур, входящих в состав изображающих оптических систем. Для случаев, когда это условие не выполняется, в [26] предложен упрощённый геометрический метод оценки дифракционной эффективности многослойных микроструктур, который, по нашему мнению, даёт достаточно точные результаты при оценке угловой зависимости дифракционной эффективности.

Тем не менее скалярная теория дифракции остаётся основным инструментом не только расчёта (особенно на предварительном этапе), но и исследования многослойных микроструктур. Так, в [27] это приближение использовалось при оценке влияния на дифракционную эффективность погрешностей изготовления двухслойной двухрельефной микроструктуры с двумя внутренними рельефами, а в работе [28] — при оценке влияния изменения температуры такой микроструктуры.

Изображающие оптические системы с ДОЭ. Результаты исследований спектральной и угловой зависимостей дифракционной эффективности рельефно-фазовых микроструктур, приведённые в работах [25, 29–31], показали, что при расчёте изображающих рефракционно-дифракционных оптических систем необходимо учитывать условия, влияющие на вероятность появления гало в изображении, формируемом такими системами. В частности, из этих результатов следует, что визуально наблюдаемое гало будет отсутствовать, если минимальный относительный период двухслойной микроструктуры $\Lambda_{\min}/h > 10$, углы падения излучения на микроструктуру $\theta \leq 15\text{--}17^\circ$, а дифракционная эффективность микроструктуры, рассчитанная в приближении скалярной теории дифракции, $\eta > 0,95$ во всём рабочем спектральном диапазоне. Приведённые требования ограничения минимального периода и дифракционной эффективности микроструктуры снизу, а интервала углов падения излучения на микроструктуру сверху должны быть включены в методику компоновки, расчёта и оптимизации рефракционно-дифракционной оптической системы.

К настоящему времени опубликован целый ряд работ (см., например, [17, 20, 32–34]), в которых описаны изображающие оптические системы с многослойными ДОЭ. Однако информация о том, какие и насколько эффективные меры по исключению негативного влияния побочных порядков дифракции на качество изображения авторами приняты, в этих публикациях либо недостаточна, либо полностью отсутствует. Поэтому в [31, 35, 36] приводятся примеры трёх наиболее характерных типов рефракционно-дифракционных оптических систем, предназначенных для камер мобильных устройств, в которых вышеописанные требования, обеспечивающие отсутствие визуально наблюдаемого гало, связанного с побочными дифракционными порядками, выполнены.

В качестве первого примера рассмотрим компактный восьмилинзовый рефракционно-дифракционный апохромат [31], оптическая схема которого представлена на рис. 2.

Фокусное расстояние объектива $f' = 3,7$ мм, габарит (расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения) $L = 10,5$ мм, все преломляющие поверхности линз объектива асферические. Все рефракционные линзы этого объектива, за исключением той, на одну из поверхностей которой нанесена дифракционная микроструктура, выполнены из технологичных и коммерчески доступных пластмасс двух марок: полиметилметакрилата и поликарбоната. Что же касается рефракционной

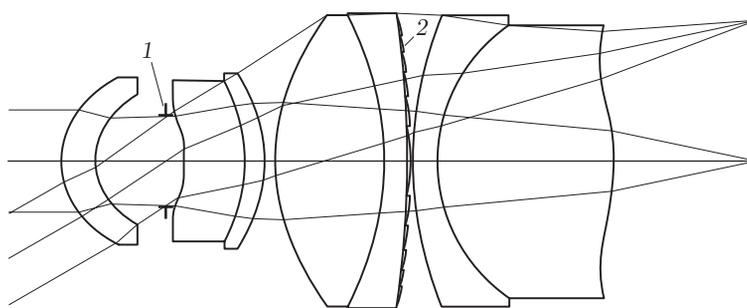


Рис. 2. Схема восьмилинзового рефракционно-дифракционного апохромата: 1 — апертурная диафрагма, 2 — дифракционная линза

линзы, несущей дифракционную микроструктуру, то выбор её материала зависит от рабочего спектрального диапазона объектива, а также конструкции и материалов слоёв этой микроструктуры.

Если взять расширенный спектральный диапазон, включающий видимое и ближнее ИК-излучения ($0,4 \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), и наиболее простую с технологической точки зрения двухслойную однорельефную микроструктуру, то лучшей из коммерчески доступных сегодня парой материалов является M-LAC14/AL-6263-(ОКР4НТ) [31]. Первый из этих материалов (M-LAC14) представляет собой оптическое стекло, позволяющее тиражировать линзы путём прецизионного литья или штамповки, второй материал (AL-6263-(ОКР4НТ)) — оптическая пластмасса. В таком случае стекло M-LAC14 одновременно является и материалом самой рефракционной линзы, несущей дифракционную микроструктуру.

Выбранная пара материалов слоёв микроструктуры при глубине рельефа $h = 10,25$ мкм и максимальном угле падения лучей на микроструктуру $\theta_{\max} = 15^\circ$ обеспечивает в заданном рабочем спектральном диапазоне дифракционную эффективность 0,91. Степень коррекции aberrаций 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 дифракционная частотно-контрастная характеристика 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 меньше $\pm 1\%$. Минимальный период микроструктуры дифракционной линзы объектива $\Lambda_{\min} > 280$ мкм ($\Lambda_{\min}/h > 25$), а максимальный угол падения лучей на микроструктуру $\theta_{\max} \leq 14,3^\circ$. И, наконец, если спектральный диапазон сузить до $\lambda_F \leq \lambda \leq 0,8$ мкм ($\lambda_F = 0,48613$ мкм — длина волны F-линии в спектре атома водорода), то минимальная дифракционная эффективность поднимется до 0,95.

В качестве второго примера приведём объектив с относительно большим фокусным расстоянием, который может быть встроен в мобильное устройство связи. Исходя из габарита, к подобного рода объективам предъявляют два основных требования. Во-первых, объектив не должен занимать много места внутри устройства. Это требование, как правило, формулируется следующим образом: объём параллелепипеда $V = a \times b \times c$, в который можно вписать объектив, должен быть минимальным. Во-вторых, размещение объектива внутри устройства не должно приводить к его утолщению или, другими словами, размер параллелепипеда a , влияющий на толщину мобильного устройства, должен соответствовать выбранной его толщине.

В случае короткофокусного объектива второе требование сводится к условию $L < a$. Для длиннофокусного объектива второе требование, как правило, выполняют путём излома его оптической оси [37]. Здесь размер параллелепипеда, влияющий на толщину мобильного устройства, определяется световыми диаметрами элементов объектива и, прежде всего, размером используемой в устройстве светочувствительной матрицы. Дополнительным требованием к оптической схеме объектива является параллельность плоскости изображения системной плате смартфона, что приводит к необходимости второго излома оптической оси объектива.

Оптическая схема длиннофокусного рефракционно-дифракционного объектива перископического типа приведена на рис. 3. Для достижения компактности объектив собран по P—N-схеме, состоящей из положительной (P-positive) и отрицательной (N-negative) линзовых групп [35]. Положительная линзовая группа включает фронтальный компонент в виде рефракционной линзы, на одну из поверхностей которой нанесена микроструктура дифракционной линзы, поворотную призму и следующую за ней положительную рефракционную линзу. Отрицательная линзовая группа, включающая две оконечные рефракционные линзы, состоит из силовой отрицательной и коррекционной положительной линз. За исключением фронтальной линзы все положительные рефракционные линзы выполнены

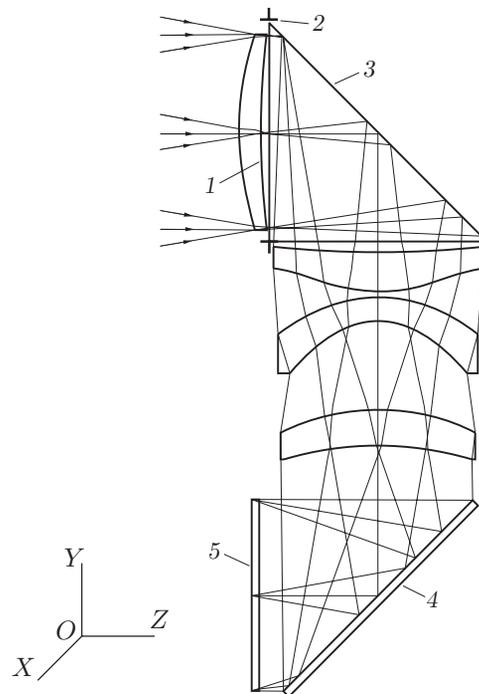


Рис. 3. Схема рефракционно-дифракционного объектива перископического типа: 1 — дифракционная линза, 2 — апертурная диафрагма, 3 — поворотная призма, 4 — поворотное зеркало, 5 — защитное стекло светочувствительной матрицы

из кроноподобного пластика марки E48R, а материалом оптически сильной отрицательной рефракционной линзы является поликарбонат. Каждая поверхность пластмассовых рефракционных линз объектива асферическая.

Фокусное расстояние объектива $f' = 14$ мм, диафрагменное число $K = 2,8$, формат светочувствительной матрицы $1/3''$ (радиус полезного поля изображения $y' = 3$ мм) и угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 22,75^\circ$. Объектив вписывается в параллелепипед размерами $6,8 \times 6,3 \times 17,4$ мм, при этом его сторона $a = 6,8$ мм составляет расстояние между двумя плоскостями, перпендикулярными оси OZ (см. рис. 3) и проходящими через вершину фронтальной поверхности первой линзы и правый край поворотной призмы.

Если рабочий спектральный диапазон объектива включает только видимое излучение ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм), то, как и в предыдущем примере, используют дифракционную линзу с пилообразной двухслойной и однорельефной микроструктурой, выполненной из материалов M-NBF1 и AL-6265-(ОКР-850). Соответственно из стекла M-NBF1 выполнена и фронтальная линза объектива. При оптимальной глубине рельефа $h = 6,52$ мкм и минимальном относительном периоде двухслойной микроструктуры $\Lambda_{\min}/h = 14$ дифракционная эффективность не опустится ниже 0,95 во всем видимом спектральном диапазоне $\pm 12^\circ$ в интервале углов падения излучения на микроструктуру из стекла или пластмассы (интервал углов соответствует вышеприведенному угловому полю объектива $2\omega = 22,75^\circ$). В результате будет гарантированно исключено не только гало, но и сколько-нибудь ощутимое негативное влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого объективом. На рис. 4 представлена дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика, которая показывает, что контраст $T > 0,4$ при пространственных частотах $N \leq 200$ мм⁻¹ по всему полю изображения.

Рассмотрим рефракционно-дифракционный вариообъектив — оптическую систему,

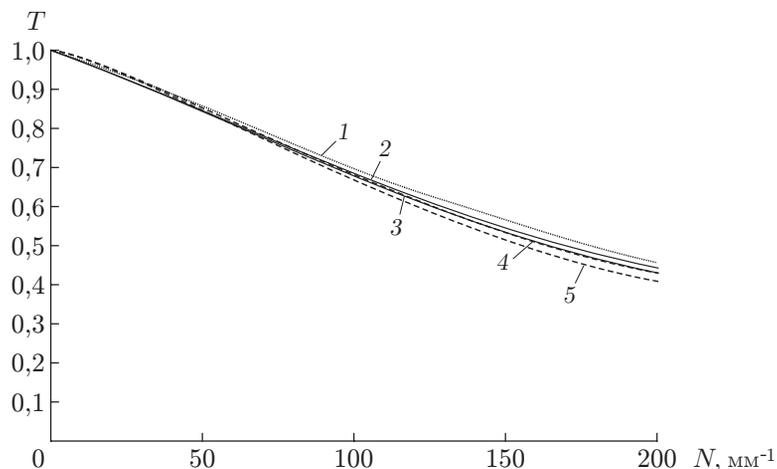


Рис. 4. Дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика (в меридиональной и сагиттальной плоскостях) для точек в плоскости изображения с координатами: $y' = x' = 0$ (кривая 1); $y' = 2,4$ мм, $x' = 1,8$ мм (2, 3); $y' = -2,4$ мм, $x' = 0$ (4, 5) (ориентация осей показана на рис. 3)

обеспечивающую возможность непрерывного изменения масштаба формируемого им изображения [36]. Изменение масштаба сопровождается зуммированием, т. е. изменение фокусного расстояния объектива за счёт плавного перемещения его компонентов. Отличительные положительные свойства вариообъектива — это простота конструкции и компактность, т. е. относительно малый габарит ($L = 25,17$ мм) во всех конфигурациях; широкий рабочий спектральный диапазон ($\lambda_F \leq \lambda \leq 0,9$ мкм), включающий не только видимое, но и ближнее ИК-излучение, что позволяет использовать объектив в охранных устройствах видеонаблюдения; материалом всех линз объектива являются коммерчески доступные оптические пластмассы. Эти положительные свойства обеспечиваются, в частности, оптимальным сочетанием дисперсионных свойств оптических пластмасс и дифракционной линзы, что позволило достичь приемлемой коррекции первичного хроматизма во всех конфигурациях объектива, обеспечивающих заданный перепад его фокусного расстояния.

Описываемый рефракционно-дифракционный вариообъектив, собранный по N—P—P-схеме, состоит из трёх линзовых групп (рис. 5). При этом первая (фронтальная) линзовая группа состоит из трёх рефракционных линз; вторая группа — из апертурной диафрагмы, четырёх рефракционных линз и дифракционной линзы, микроструктура которой нанесена на заднюю поверхность первой рефракционной линзы. Наконец, третья линзовая группа включает одиночную рефракционную линзу.

При зуммировании первая линзовая группа неподвижна относительно фотоприёмника, подвижны вторая и третья линзовые группы. Фокусное расстояние и диафрагменное число вариообъектива в короткофокусной, промежуточной и длиннофокусной конфигурациях соответственно составляют: $f'_1 = 3,41$ мм, $K_1 = 2,99$; $f'_2 = 5,18$ мм, $K_2 = 3,97$; $f'_3 = 8,19$ мм, $K_3 = 5,27$. Перед плоскостью изображения размещена стеклянная плоскопараллельная пластина, имитирующая защитное стекло матричного фотоприёмника. Материалом положительных рефракционных линз является кроноподобный пластик — сополимер циклических олефинов, а отрицательных рефракционных линз — флинтоподобный пластик поликарбонат.

Для подавления спектральной зависимости дифракционной эффективности микроструктура дифракционной линзы должна быть двухслойной с внутренним и наружным рельефами: материалом внутреннего слоя (как и материалом рефракционной линзы, на

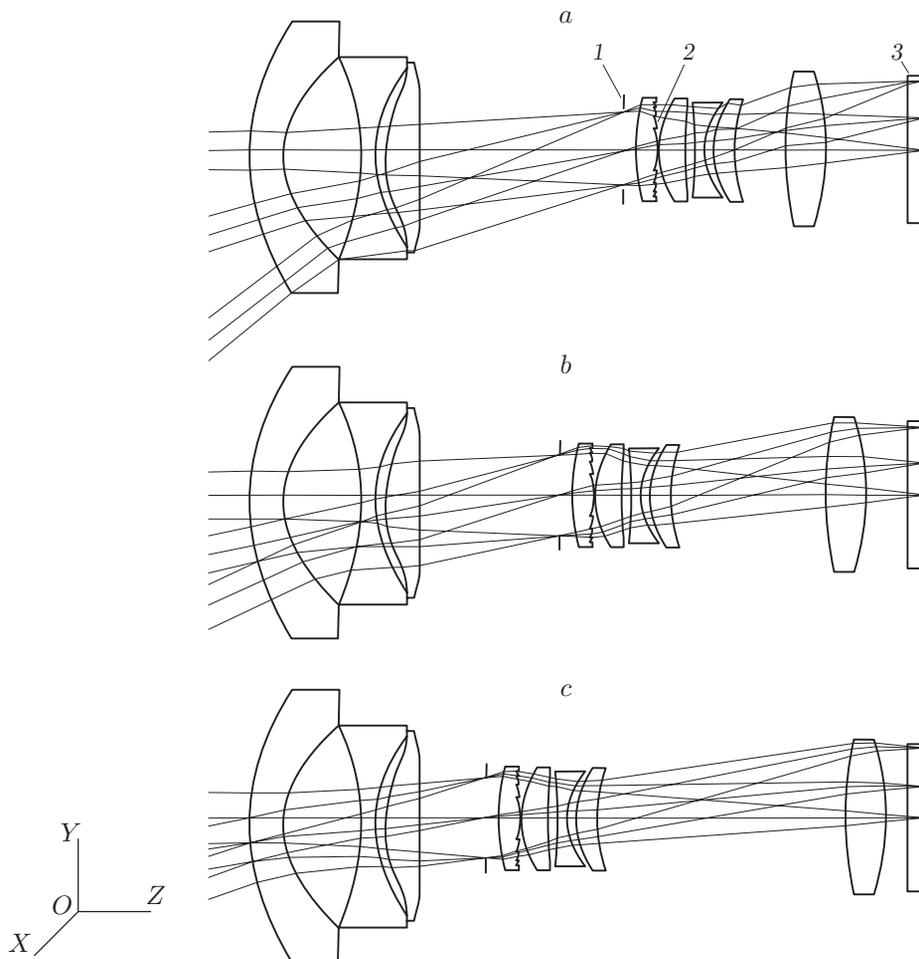


Рис. 5. Оптическая схема компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариобъектива: *a* — короткофокусная (широкоугольная) конфигурация $f'_1 = 3,41$ мм; *b* — промежуточная конфигурация $f'_2 = 5,18$ мм; *c* — длиннофокусная (телеконфигурация) $f'_3 = 8,19$ мм. Обозначения: 1 — апертурная диафрагма, 2 — дифракционная линза, 3 — плоскопараллельная стеклянная пластина

заднюю поверхность которой нанесена микроструктура) является сополимер циклических олефинов, а внешнего — поликарбонат. Оптимизация глубин рельефов, проведённая для спектрального диапазона $\lambda_F \leq \lambda \leq 0,9$ мкм, дала следующие значения глубин: для сополимера циклических олефинов $h_1^{(opt)} = 21,34$ мкм и для поликарбоната $h_2^{(opt)} = 18,36$ мкм. Конструкция и параметры объектива таковы, что даже для широкоугольной его конфигурации максимальный угол падения лучей на микроструктуру дифракционной линзы $\theta_{max} \leq 16^\circ$, а минимальный период микроструктуры $\Lambda_{min} \cong 215$ мкм ($\Lambda_{min}/h_1^{(opt)} > 10$). В результате дифракционная эффективность в пределах всего рабочего спектрального и углового диапазонов не опускается ниже значения 0,92. Что же касается качества изображения, формируемого компактным пластмассово-линзовым рефракционно-дифракционным вариобъективом, то наглядное представление об этом дают кривые, приведённые на рис. 6: контраст в изображении на пространственных частотах до 175 лин/мм не опускается ниже значения 0,2 в любой из конфигураций.

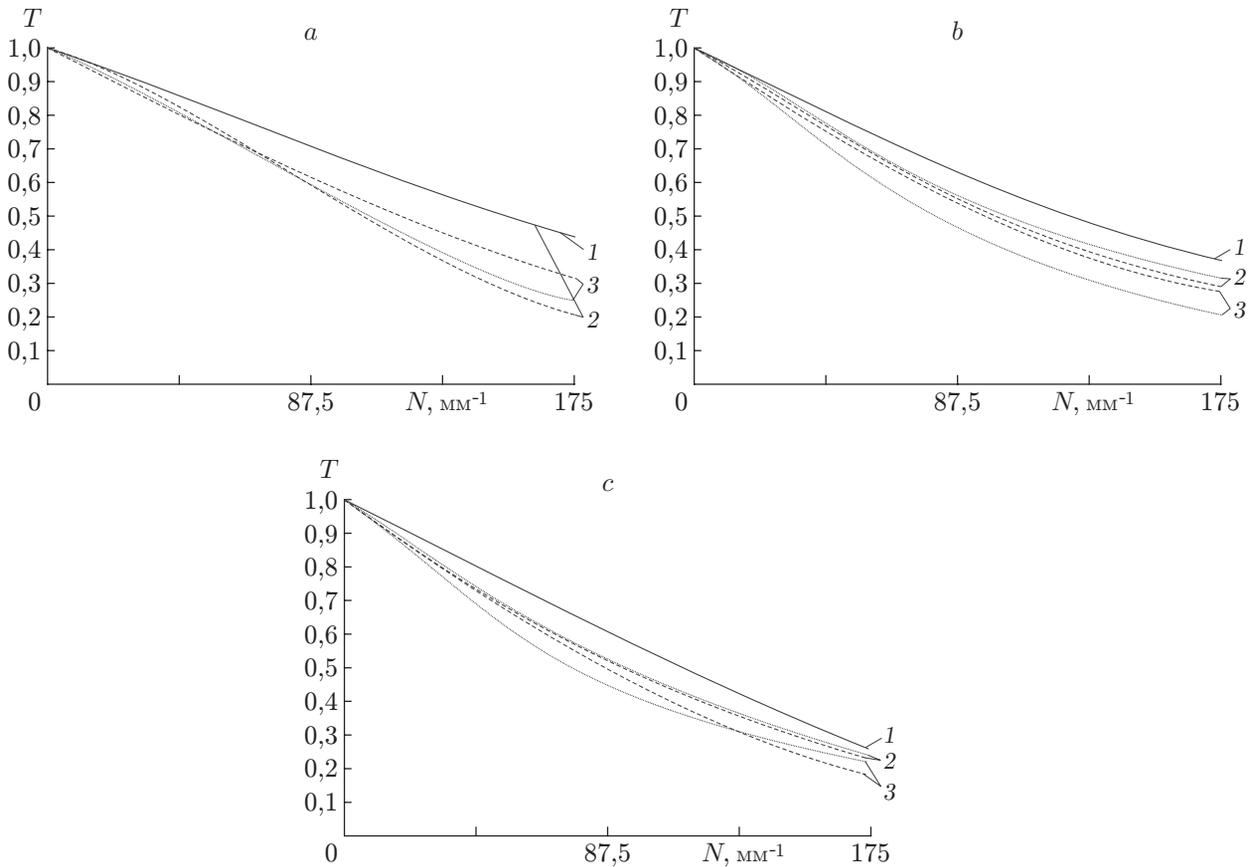


Рис. 6. Дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика (для меридиональной и сагиттальной плоскостей) компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариобъектива: для широкоугольной (*a*), промежуточной (*b*) и телеконфигурации (*c*) (вычислена в точках плоскости изображения с координатами $y' = x' = 0$ (кривая 1); $y' = 1,25$ мм, $x' = 0$ (2); $y' = 2,5$ мм, $x' = 0$ (3) (ориентация осей показана на рис. 5))

Заключение. В данной работе проанализированы возможности и проблемы использования ДОЭ в изображающих оптических системах. Показано, что основной проблемой, связанной с такими элементами, является негативное влияние на качество формируемого изображения паразитного излучения, дифрагированного на микроструктуре ДОЭ в побочные порядки. Проблема обусловлена спектральной и угловой зависимостями дифракционной эффективности ДОЭ. Ослабить зависимости до приемлемого уровня позволяет переход от однослойных микроструктур к структурам, содержащим несколько слоёв, выполненных из материалов с отличающимися оптическими характеристиками. В частности, у двухслойной однорельефной микроструктуры требуемое ослабление достигается при условии, что слой с большим показателем преломления имеет и больший коэффициент дисперсии. В настоящее время это реализуется, если, как минимум, один из слоёв двухслойной микроструктуры выполнен из оптического стекла.

Переход от однорельефных к двухрельефным микроструктурам позволяет преодолеть данное ограничение и тем самым расширить ассортимент оптических материалов, которые могут использоваться для компоновки многослойных микроструктур, включив в него коммерчески доступные и технологичные оптические пластмассы, такие как полиметилметакрилат, поликарбонат и сополимер циклических олефинов.

Показано, что спектральная и угловая зависимости дифракционной эффективности двухслойной микроструктуры будут снижены до уровня, при котором визуально наблюдаемое ухудшение качества формируемого изображения, обусловленное побочными порядками дифракции, будет исключено, если минимальный период микроструктуры, отнесённый к её глубине, $\Lambda_{\min}/h > 10$, углы падения излучения на микроструктуру $\theta \leq 15\text{--}17^\circ$, а дифракционная эффективность, рассчитанная в приближении скалярной теории дифракции, $\eta > 0,95$ во всём рабочем спектральном диапазоне.

Приведены примеры рефракционно-дифракционных изображающих оптических систем, предназначенных для камер мобильных устройств, в которых вышеописанные требования, обеспечивающие отсутствие визуально наблюдаемого гало из-за побочных дифракционных порядков, выполнены. Показано, что включение ДОЭ в оптическую схему пластмассово-линзовых систем позволило скорректировать хроматизм и обеспечить высокое разрешение в формируемом изображении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиманский Р. В., Полецук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при синтезе дифракционных оптических элементов в полярной системе координат // Автометрия. 2017. **53**, № 2. С. 30–38.
2. Greisukh G. I., Ezhov E. G., Levin I. A., Stepanov S. A. Design of achromatic and apochromatic plastic micro-objectives // Appl. Opt. 2010. **49**, Is. 23. P. 4379–4384.
3. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses. URL: <https://www.edmundoptics.eu/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses> (дата обращения: 15.05.2017).
4. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
5. Buralli D. A., Morris G. M., Rogers J. R. Optical performance of holographic kinoforms // Appl. Opt. 1989. **28**, N 5. P. 976–983.
6. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Казин С. В. и др. Визуальная оценка влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой // Компьютерная оптика. 2014. **38**, № 3. С. 418–424.
7. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Казин С. В. и др. Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств // Компьютерная оптика. 2017. **41**, № 2. С. 218–226.
8. 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. **83**, № 3. С. 27–31.
9. Пат. 1271240 РФ. Голограммный оптический элемент /А. В. Лукин, К. С. Мустафин, Р. А. Рафиков. Опубл. 10.05.1996.
10. Лукин А. В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. **74**, № 1. С. 80–87.
11. Arieli Y., Noach S., Ozeri S., Eisenberg N. Design of diffractive optical elements for multiple wavelengths // Appl. Opt. 1998. **37**, N 26. P. 6174–6177.
12. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур // Компьютерная оптика. 2008. **32**, № 1. С. 43–46.
13. Грейсух Г. И., Безус Е. А., Быков Д. А. и др. Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур // Оптика и спектроскопия. 2009. **106**, № 4. С. 694–699.

14. **Коронкевич В. П., Пальчикова И. Г.** Современные зонные пластинки // *Автометрия*. 1992. № 1. С. 85–100.
15. **Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Калашников А. В. и др.** Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля // *Оптика и спектроскопия*. 2012. **113**, № 4. С. 468–473.
16. **Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Сидякина З. А., Степанов С. А.** Высокоэффективные рельефно-фазовые дифракционные элементы на криволинейных поверхностях вращения // *Компьютерная оптика*. 2013. **37**, № 1. С. 45–50.
17. **Pat. 6262846 B1 US.** Diffractive optical element and optical system having the same /T. Nakai. Publ. 17.07.2001.
18. **Zhao Y. H., Fan C. J., Ying C. F., Liu S. H.** The investigation of triple-layer diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency // *Opt. Commun.* 2013. **295**. P. 104–107.
19. **Zhao Y. H., Fan C. J., Ying C. F., Wang H.** The investigation of three layers diffraction optical element with wide field of view and high diffraction efficiency // *Optik*. 2013. **124**, N 20. P. 4142–4144.
20. **Pat. 2001/0038503 A1 US.** Diffractive optical element and optical system having the same /T. Nakai. Publ. 08.11.2001.
21. **Kleemann B. H., Seesselberg M., Ruoff J.** Design concepts for broadband high-efficiency DOEs // *Journ. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ.* 2008. **3**. 08015.
22. **Gühne T., Barth J.** Strategy for design of achromatic diffractive optical elements with minimized etch depths // *Appl. Opt.* 2013. **52**, Is. 34. P. 8419–8423.
23. **Xue C., Cui Q.** Design of multilayer diffractive optical elements with polychromatic integral diffraction efficiency // *Opt. Lett.* 2010. **35**, N 7. P. 986–988.
24. **Грейсух Г. И., Данилов В. А., Ежов Е. Г. и др.** Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трёхслойной микроструктурами // *Оптика и спектроскопия*. 2015. **118**, № 6. С. 118–125.
25. **Greisukh G. I., Danilov V. A., Ezhov E. G. et al.** Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // *Opt. Commun.* 2015. **338**. P. 54–57.
26. **Yang H., Xue C., Li C., Wang J.** Optimal design of multilayer diffractive optical elements with effective area method // *Appl. Opt.* 2016. **55**, N 7. P. 1675–1682.
27. **Yang L., Cui Q., Liu T., Xue C.** Effects of manufacturing errors on diffraction efficiency for multilayer diffractive optical elements // *Appl. Opt.* 2011. **50**, N 32. P. 6128–6133.
28. **Piao M., Cui Q., Zhu H. et al.** Diffraction efficiency change of multilayer diffractive optics with environmental temperature // *Journ. Opt.* 2014. **16**, N 3. 035707.
29. **Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Казин С. В. и др.** Визуальная оценка влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой // *Компьютерная оптика*. 2014. **38**, № 3. С. 418–424.
30. **Грейсух Г. И., Данилов В. А., Ежов Е. Г. и др.** Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой // *Оптический журнал*. 2015. **82**, № 5. С. 56–61.
31. **Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А.** Учёт дифракционной эффективности при проектировании рефракционно-дифракционных оптических систем // *Оптический журнал*. 2016. **83**, № 3. С. 32–38.
32. **Nakai T., Ogawa H.** Research on multi-layer diffractive optical elements and their application to camera lenses // *Proc. of the Conf. "Diffractive Optics and Micro-Optics"*. Tucson, USA, June 3, 2002. DMA2.

33. **Pat. 2007/0297057 A1 US.** Diffractive optical element and optical system having the same /T. Nakai. Publ. 27.12.2007.
34. **Changjiang F.** The investigation of large field of view eyepiece with multilayer diffractive optical element // Proc. SPIE. 2014. **9272**. 92720N-1.
35. **Грейсукх Г. И., Ежов Е. Г., Казин С. В., Степанов С. А.** Компоновка и расчёт рефракционно-дифракционного объектива перископического типа для мобильного устройства связи // Оптический журнал. 2016. **83**, № 11. С. 51–57.
36. **Greisukh G. I., Ezhov E. G., Sidyakina Z. A., Stepanov S. A.** Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum // Appl. Opt. 2013. **52**, N 23. P. 5843–5850.
37. **Поспехов В. Г., Крюков А. В.** Исследование и расчёт малогабаритного панкратического объектива перископического типа // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. **7**. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/826.html> (дата обращения: 15.05.2017).

Поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
