

УДК 53.087.352

## ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: УСПЕХИ, ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*Г. И. Грейсух\**, *Е. Г. Ежов*, *С. В. Казин*, *И. А. Левин*, *С. А. Степанов*

Пензенский госуниверситет архитектуры и строительства, г. Пенза, Россия

Коррекция aberrаций рассматривается в качестве одного из наиболее востребованных применений дифракционных оптических элементов в оптических системах. Показаны пути преодоления таких негативных свойств дифракционных элементов, как сферохроматизм и энергетическая спектральная селективность. Приведена методика и рассчитан компактный пластмассово-линзовый рефракционно-дифракционный объектив, предназначенный для работы в широком спектральном диапазоне, включающем видимое и ближнее инфракрасное излучение.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных направлений использования дифракционных оптических элементов в оптических системах является коррекция aberrаций системы в целом и, прежде всего, коррекция хроматизма. Корректирующие дифракционные оптические элементы имеют вращательно-симметричную квазипериодическую рельефно-фазовую микроструктуру с многоступенчатым или пилообразным рельефом. Если при этом оптическая сила элемента отлична от нуля, а его микроструктура в первом приближении подобна микроструктуре зонной пластинки Френеля, то такой элемент называют дифракционной линзой.

Эффективность коррекции aberrаций оптических систем с помощью дифракционных линз обусловлена уникальностью aberrационных свойств таких линз. Для монохроматических aberrаций это быстрая сходимости aberrационного разложения и автоматическое выполнение условия Петцваля, позволяющее одновременно устранять кривизну поля и астигматизм третьего порядка. Для хроматизма первого порядка это линейная зависимость оптической силы дифракционной линзы от длины дифрагирующей волны [1, 2].

Основной целью настоящей статьи является демонстрация путей и возможностей коррекции хроматизма, а также достижения высоких оптических характеристик у оптических систем, рефракционные линзы которых изготавливаются из технологичных и коммерчески доступных пластмасс, за счёт включения в систему одиночной дифракционной линзы. Проблема заключается в том, что, в отличие от оптических стёкол, ассортимент таких пластмасс очень ограничен, а их дисперсионные характеристики весьма близки. Аналогичная проблема наблюдается и в радиооптике, т. к. в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения дисперсионные характеристики радиопрозрачных материалов также отличаются весьма незначительно. Решение, которое предполагает одновременное использование для трансформации волновых фронтов двух явлений — рефракции и дифракции, является универсальным. Оно может быть эффективно использовано как в оптическом, так и в радиодиапазоне электромагнитного излучения.

### 1. ХРОМАТИЗМ РЕФРАКЦИОННОЙ И ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗ

Первичный хроматизм положения (т. е. зависимость оптической силы и заднего отрезка от длины волны) обычной рефракционной линзы определяется дисперсионными свойствами её ма-

\* [subscribing\\_2002@mail.ru](mailto:subscribing_2002@mail.ru)

териала и характеризуется коэффициентом дисперсии

$$\nu_{\text{R}}^{(\bar{\lambda})} = (n_{\bar{\lambda}} - 1)/(n_{\lambda_{\text{min}}} - n_{\lambda_{\text{max}}}), \quad (1)$$

где  $n_{\lambda_{\text{min}}}$ ,  $n_{\bar{\lambda}}$ ,  $n_{\lambda_{\text{max}}}$  — показатель преломления материала рефракционной линзы для минимальной,  $\lambda_{\text{min}}$ , центральной,  $\bar{\lambda}$ , и максимальной,  $\lambda_{\text{max}}$ , длин волн заданного спектрального диапазона. В определение аналогичного параметра, характеризующего первичный хроматизм дифракционной линзы, входят только сами длины волн:

$$\nu_{\text{D}}^{(\lambda^*)} = \lambda^*/(\lambda_{\text{min}} - \lambda_{\text{max}}). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda^*$  — длина волны, для которой рассчитывается структура дифракционной линзы и которая выбирается, как правило, из условия  $\lambda^* = \bar{\lambda}$ .

Обратившись к формуле (2) и каталогам оптического стекла, нетрудно видеть, что в видимом диапазоне длин волн от 0,49 до 0,66 мкм коэффициент дисперсии дифракционной линзы равен  $-4,5$ . У рефракционной линзы в зависимости от марки стекла этот коэффициент составляет от 16 до 85. В расширенном спектральном диапазоне, включающем ближнюю инфракрасную (ИК) область, т. е. от 0,4 до 0,9 мкм, коэффициент дисперсии дифракционной линзы равен  $-1,3$ , а у рефракционной линзы он лежит в интервале  $6,5 \div 25$ . Поэтому при одной и той же оптической силе дифракционная линза по сравнению с рефракционной линзой имеет существенно больший по модулю и противоположный по знаку первичный хроматизм положения. Именно это обстоятельство выдвигает дифракционные линзы в ряд наиболее эффективных корректоров хроматизма рефракционно-линзовых оптических систем.

Наряду с изменением оптической силы дифракционной линзы при отклонении длины волны падающего на неё излучения  $\lambda$  от расчётной длины волны  $\lambda^*$  существенно изменяется и её сферическая аберрация. Это явление, известное в оптике как сферохроматизм, подробно рассмотрено в [3]. Здесь же приведём лишь выражение для коэффициента сферической аберрации третьего порядка дифракционной линзы, выполненной на криволинейной поверхности. В частном случае, когда плоскость апертурной диафрагмы проходит через вершину поверхности, на которой расположена микроструктура дифракционной линзы, это выражение имеет вид

$$S_{\text{D}}^{(3)} = \frac{4m\lambda A_2}{\pi} - \left(\frac{m\lambda A_1}{\pi}\right)^2 \left(-\frac{m\lambda A_1}{\pi} + \frac{2}{s} - 2c\right). \quad (3)$$

Здесь  $s$  — расстояние от вершинной касательной плоскости к несущей поверхности микроструктуры дифракционной линзы до плоскости предмета,  $c$  — кривизна несущей поверхности дифракционной линзы,  $A_1$  и  $A_2$  — первые коэффициенты разложения фазовой задержки дифракционной линзы, определяемой степенным рядом вида

$$\Psi(\rho) = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}, \quad (4)$$

где  $m$  — номер рабочего дифракционного порядка,  $\rho$  — расстояние, отсчитываемое от оптической оси. Степенной ряд (4) принят для описания дифракционных линз в одной из наиболее широко используемых коммерческих компьютерных программ оптического проектирования ZEMAX [4].

Из выражения (4) видно, что исключить зависимость сферической аберрации от длины волны можно лишь в одном тривиальном случае, когда все коэффициенты  $A_j = 0$ , т. е. когда дифракционная микроструктура отсутствует. Иная ситуация имеет место в случае рефракционной линзы. Общие выражения для коэффициентов волновой сферической аберрации третьего, пятого и седьмого порядков асферической преломляющей поверхности приведены в работе [2]. Используя их,

нетрудно получить соответствующие коэффициенты для толстой рефракционной линзы. Однако, ввиду резко возрастающей с ростом номера абберационного порядка громоздкости формул, ниже приводится в приближении тонкой рефракционной линзы выражение только для коэффициента сферической абберации третьего порядка:

$$S_R^{(3)} = - \left[ \frac{n_\lambda (c_1 s'_1 - 1)^2}{s_1^3} \left( 1 - \frac{n_\lambda s'_1}{s_1} \right) + (n_\lambda - 1) (8\alpha_{2,1} + c_1^3 \kappa_1) + \right. \\ \left. + \frac{(c_2 s'_2 - 1)^2}{s_2^3} \left( 1 - \frac{s'_2}{n_\lambda s_2} \right) - (n_\lambda - 1) (8\alpha_{2,2} + c_2^3 \kappa_2) \right]. \quad (5)$$

Здесь  $c_i$ ,  $s_i$ ,  $s'_i$ ,  $\alpha_{2,i}$  и  $\kappa_i$  — кривизна, сопряжённые отрезки, коэффициент асферической деформации и коническая константа передней ( $i = 1$ ) и задней ( $i = 2$ ) преломляющих поверхностей рефракционной линзы. Предполагается, что апертурная диафрагма совмещена с самой линзой, а асферические поверхности рефракционной линзы описываются уравнениями вида [4]

$$z(\rho) = \frac{c_i \rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa_i) c_i^2 \rho^2}} + \sum_{p=2}^P \alpha_{p,i} \rho^{2p}, \quad (6)$$

где  $z$  — координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии  $\rho$  в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности,  $c = 1/r$  — кривизна поверхности в её вершине,  $k$  — коническая константа,  $\alpha_p$  — коэффициенты асферической деформации при  $p = 2, 3, 4, \dots$

Чтобы оптическая сила рефракционной линзы при изменении соотношения между кривизнами её преломляющих поверхностей оставалась постоянной, используют параметр  $\sigma$ , называемый прогибом линзы и связанный с кривизнами её поверхностей соотношениями [3]

$$c_1 = (\sigma + 1)/a, \quad c_2 = (\sigma - 1)/a, \quad (7)$$

где  $a = 2(n_{\bar{\lambda}} - 1) f'_{\bar{\lambda}}$ . Индекс при показателе преломления и фокусном расстоянии рефракционной линзы показывает, что эти величины вычисляются на центральной длине волны заданного спектрального диапазона  $\bar{\lambda}$ .

Исследования, проведённые в работе [5], показали, что, независимо от марки стекла и увеличения, при котором работает рефракционная линза, выбором прогиба и коэффициента асферической деформации одной из её поверхностей можно изменять ход кривой, определяющей сферическую абберацию третьего порядка в зависимости от длины волны или даже устранить эту абберацию на двух любых выбранных длинах волн. Если прогиб линзы уже задействован для управления сферической абберацией третьего порядка, то сферическую абберацию рефракционной линзы пятого порядка можно устранить только на одной длине волны, как и в случае дифракционной линзы.

## 2. ПОДАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ

Рассмотренный выше хроматизм дифракционной линзы является следствием зависимости угла дифракции на микроструктуре от длины волны падающего излучения. Более того, от длины волны падающего излучения зависит и дифракционная эффективность, под которой понимают отношение потока излучения, дифрагирующего в один рабочий порядок, к потоку падающего на микроструктуру излучения. Нетрудно показать, что в случае рельефно-фазовой пилообразной микроструктуры, обеспечивающей на центральной длине волны расширенного спектрального

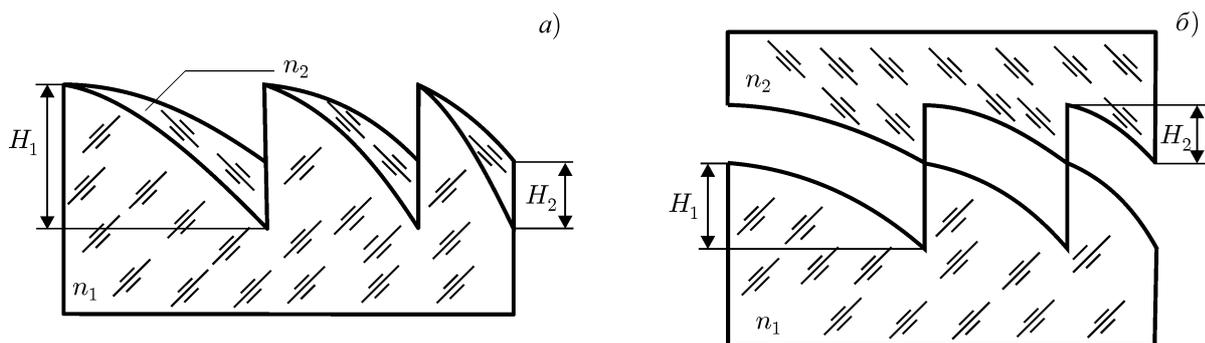


Рис. 1. Двухслойные микроструктуры с согласованными рельефами, обеспечивающие высокую дифракционную эффективность в широком спектральном диапазоне (показан случай дифракционной линзы с положительной оптической силой при  $n_1 < n_2$ ): *а* — структура с внутренним и наружным рельефами, *б* — структура с двумя внутренними рельефами

диапазона дифракционную эффективность, близкую к 100 %, на краях этого диапазона (т. е. на длинах волн 0,4 и 0,9 мкм) дифракционная эффективность падает до 57 %. Это явление, называемое энергетической спектральной селективностью, играет весьма негативную роль в случае, когда дифракционная линза используется в качестве корректора aberrаций оптической системы.

Ослабить спектральную селективность дифракционной структуры, работающей на пропускание, и выровнять с той или иной степенью точности дифракционную эффективность в заданном спектральном интервале позволяет решение, предложенное в 1985 году А. В. Лукиным, К. С. Муштафиным и Р. А. Рафиковым [6, 7]. Оно предполагает создание многослойной и, в частности, двухслойной рельефно-фазовой микроструктуры, выполненной в плоскопараллельной пластине, составленной из двух оптических материалов, каждый из которых ограничен плоской и рельефной поверхностями. Рельефные поверхности подобны, имеют одинаковую глубину рельефа и находятся в оптическом контакте друг с другом. Аналогичное решение предложено и в более поздних работах (см., например, [8]). Способ ослабления спектральной селективности рельефно-фазовых дифракционных микроструктур, выполненных из оптических пластмасс, предложен в [9]. Положительный эффект достигается за счёт использования двух или более рельефов с разными глубинами.

Помимо длины волны падающего излучения, дифракционная эффективность зависит ещё от формы и глубины рельефа, а также от числа зон Френеля дифракционной линзы. При этом под термином «зона Френеля» понимается участок микроструктуры дифракционной линзы, в пределах которого фазовая задержка, вносимая в падающий на него волновой фронт, изменяется от 0 до  $2\pi$ . 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, на которой размещена микроструктура дифракционной линзы. В работах [10, 11] рельефы, имеющие оптимальную форму и обеспечивающие, помимо максимальной дифракционной эффективности, совпадающую с расчётной форму формируемого волнового фронта, получили название коррелированных, или согласованных. В этих же работах приведены уравнения согласованных рельефов однослойных и двухслойных двухрельфных микроструктур, размещённых на плоских и криволинейных поверхностях раздела двух сред. Показано, что в случае двухслойных двухрельфных микроструктур с согласованными рельефами дифракционная эффективность в пределах всего расширенного спектрального диапазона может быть не ниже 93 % независимо от числа зон Френеля в микроструктуре дифракционной линзы.

На рис. 1 представлены двухслойные двухрельефные микроstructures с согласованными рельефами. Оптимальные глубины рельефов  $H_1$  и  $H_2$  в оптических средах с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  могут быть найдены по методикам [12, 13].

Заключая раздел, заметим, что дифракционные линзы с двухслойной, а тем более двухрельефной микроstructureй менее технологичны, чем с однослойной. Однако фирма «Canon» уже наладила серийное производство высококачественного телеобъектива с двухслойным двухрельефным дифракционным элементом [14].

### 3. ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫЙ КОРРЕКТОР

Снизить до приемлемого уровня одновременно первичный хроматизм и сферохроматизм оптической системы позволяет дифракционно-рефракционный корректор — компонент, предложенный в работе [15] и состоящий из одной дифракционной линзы и одной или двух рефракционных линз. Минимальное число рефракционных линз, входящих в состав корректора, зависит от степени коррекции первичного хроматизма. При ахроматизации это одна рефракционная линза, выполненная из того же или подобного оптического материала, что и оптическая система в целом. При апохроматизации это также одна рефракционная линза, но выполненная из флинтоподобного материала. Суперахроматизация требует использования в дифракционно-рефракционном корректоре как минимум двух рефракционных линз, материалами которых является крон-флинтовая пара.

Сразу же отметим, что кроноподобными считают оптические материалы, у которых коэффициент дисперсии для видимого спектрального диапазона  $\nu_R^{(\bar{\lambda})} \geq 50$ , а флинтоподобными — у которых  $\nu_R^{(\bar{\lambda})} \leq 50$ . Далее напомним, что достижение равенства задних отрезков оптической системы,  $s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\lambda_{\max}}$ , на двух длинах волн  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  заданного спектрального диапазона получило название ахроматизации [16, 17]. Апохроматическая коррекция оптической системы (т. е. исправление вторичного спектра) предполагает, как известно, устранение хроматизма положения для трёх длин волн  $\lambda_{\min}$ ,  $\bar{\lambda}$  и  $\lambda_{\max}$  выбранного спектрального диапазона. Целью такой коррекции является равенство задних отрезков на трёх длинах волн,  $s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}} = s'_{\lambda_{\max}}$  [16, 18].

Суперахроматическая коррекция (исправление третичного спектра) предполагает устранение хроматизма положения уже для четырёх длин волн заданного спектрального диапазона и направлена на достижение равенства задних отрезков на этих длинах волн [19–21]. Целью перехода от ахроматизации к апохроматизации и далее к суперахроматизации является уменьшение расфокусировки на промежуточных длинах волн.

Сформулированные выше условия достижения заданной степени коррекции хроматизма при минимальном числе рефракционных линз, входящих в состав дифракционно-рефракционного корректора, поясним на примере достижения апохроматической коррекции оптической системы. Одновременно выделим основные элементы разработанной авторами методики расчёта дифракционно-рефракционного корректора, обеспечивающей заданную степень коррекции хроматизма. Методика включает два этапа. На первом этапе дифракционно-рефракционный корректор считается бесконечно тонким, а хроматизм положения описывается первой хроматической суммой. Учтём, что оптическая сила  $\Phi$  бесконечно тонкого дифракционно-рефракционного корректора на центральной длине волны  $\bar{\lambda}$  должна иметь фиксированное значение. Тогда условие достижения апохроматизации оптической системы, включающей дифракционно-рефракционный корректор, записывают в виде системы уравнений

$$\varphi_D + \sum_{i=1}^I \varphi_{Ri} = \Phi,$$

$$\frac{\varphi_D}{\nu_D} + \sum_{i=1}^I \frac{\varphi_{Ri}}{\nu_{Ri}} = \frac{S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]}}{h_A^2}, \quad \frac{\gamma_D \varphi_D}{\nu_D} + \sum_{i=1}^I \frac{\gamma_{Ri} \varphi_{Ri}}{\nu_{Ri}} = \frac{S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \bar{\lambda}]}}{h_A^2}. \quad (8)$$

Здесь  $\varphi_D$  и  $\varphi_R$  — оптические силы дифракционной и рефракционной линз корректора на длине волны  $\bar{\lambda}$ ,  $h_A$  — высота апертурного нулевого луча в плоскости дифракционно-рефракционного корректора, вычисленная на той же длине волны,  $I$  — число рефракционных линз, входящих в состав корректора,  $S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]}$  и  $S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \bar{\lambda}]}$  — вклады в первые хроматические суммы всех элементов оптической системы за исключением дифракционно-рефракционного корректора, вычисленные для спектральных интервалов  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  и  $[\lambda_{\min}, \bar{\lambda}]$  соответственно,  $\gamma_D$  и  $\gamma_R$  — относительные частные дисперсии для дифракционной линзы и материалов рефракционной линзы, рассчитываемые по формулам

$$\gamma_D = (\lambda_{\min} - \bar{\lambda}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (9)$$

$$\gamma_R = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\bar{\lambda}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}). \quad (10)$$

В случае, когда в состав дифракционно-рефракционного корректора входит одна рефракционная линза, система уравнений (8) является переопределённой и условием существования её решения является равенство нулю определителя расширенной матрицы

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & \Phi \\ 1/\nu_D & 1/\nu_{R1} & S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]} / h_A^2 \\ \gamma_{2D}/\nu_D & \gamma_{2R1}/\nu_{R1} & S_{ch}^{[\lambda_{\min}, \bar{\lambda}]} / h_A^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

Минимизация модуля левой части уравнения (11) достигается выбором оптического материала рефракционной линзы, а её обнуление — путём дополнительной корректировки параметров последнего столбца определителя за счёт перераспределения оптических сил между дифракционно-рефракционным корректором и остальными рефракционными линзами оптической системы.

В силу нелинейности показателя преломления материала как функции длины волны условия равенства нулю первой хроматической суммы и отсутствия хроматизма положения для данной пары длин волн, строго говоря, не совпадают. Поэтому на втором этапе расчёта дифракционно-рефракционного корректора оптические силы его элементов, полученные при решении системы уравнений (8), рассматриваются в качестве нулевого приближения. Затем они уточняются путём итерационного решения системы уравнений, одно из которых обеспечивает заданное фокусное расстояние  $f'$  оптической системы с установленным дифракционно-рефракционным корректором на длине волны  $\bar{\lambda}$ , а другие — равенство задних отрезков оптической системы на соответствующих длинах волн выбранного спектрального диапазона [22]. В случае апохроматизации эта система уравнений имеет вид

$$f'_{\bar{\lambda}} = f', \quad s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\lambda_{\max}}, \quad s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}}. \quad (12)$$

Переход от системы уравнений (8) к системе (12) позволяет, кроме того, ввести толщины элементов и воздушных промежутков и оперировать с «реальными оптическими материалами», описывая их не основанными на линеаризации зависимости показателя преломления от длины волны параметрами  $\nu_R$  и  $\gamma_R$ , а соответствующими дисперсионными формулами.

При выборе материалов для изготовления рефракционных линз для дифракционно-рефракционного корректора необходимо также учитывать, что выбранная пара материалов определяет радиус  $R$  поверхности Петцваля [3], на которой оптическая система может сформировать стигматическое изображение:

$$R = \left( \sum_i \varphi_{Ri} / n_i \right)^{-1}, \quad (13)$$

где

$$\varphi_{Ri} = (n_i - 1)(c_{2i} - c_{1i}) \quad (14)$$

— «тонкая» составляющая оптической силы рефракционной линзы с номером  $i$ . Суммирование проводится по всем линзам оптической системы за исключением дифракционной линзы, т. к. её кривизна Петцваля равна нулю [1, 2].

Следует отметить, что введение дифракционно-рефракционного корректора в предварительно рассчитанную оптическую систему может нарушить ранее достигнутую коррекцию монохроматических аберраций. Восстановить или даже снизить уровень этих аберраций, как правило, удаётся на этапе оптимизации, используя прогиб рефракционной линзы, коэффициенты асферичности преломляющих поверхностей и коэффициенты асферических добавок дифракционной линзы, а также толщины элементов и воздушных промежутков.

#### 4. РАСЧЁТ ПЛАСТМАССОВО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА-АПОХРОМАТА С ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫМ КОРРЕКТОРОМ

Одной из категорий массово и в огромных количествах производимых сегодня оптических систем являются объективы мобильных телефонов и компактных камер видеонаблюдения. Сочетание требований низкой стоимости и весьма высоких оптических характеристик этих объективов обуславливает целесообразность изготовления элементов их оптических схем из пластмасс. Действительно, современные методы формообразования на основе прецизионной штамповки позволяют легко тиражировать пластмассовые линзы с асферическими преломляющими поверхностями и, кроме того, при необходимости штамповать на этих поверхностях дифракционный микрорельеф [23, 24]. Что касается хроматизма пластмассово-линзовых объективов, то дифракционно-рефракционные корректоры позволяют добиваться требуемой степени коррекции первичного хроматизма при изготовлении рефракционных линз таких объективов даже из наиболее технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс только двух марок, например, кроноподобного полиметилметакрилата и флинтоподобного поликарбоната.

При расчёте объективов компактных систем наружного видеонаблюдения, предназначенных для работы в широком спектральном диапазоне, т. е. при естественном дневном и сумеречном освещении, а также при искусственном освещении, создаваемом, например, светодиодным инфракрасным прожектором [25], задача формирования высококачественного изображения существенно усложняется. В результате, например, разрешение пластмассово-линзового объектива-ахромата, описанного в работе [26], при работе в этом расширенном спектральном диапазоне падает со 140 до  $35 \text{ мм}^{-1}$ . Для повышения разрешения требуется скомпенсировать теперь уже, как минимум, и вторичный спектр, т. е. обеспечить апохроматизацию объектива.

Следуя методике введения дифракционно-рефракционного корректора в состав объектива, необходимо выбрать исходную схему оптической системы с недоисправленным хроматизмом. В качестве такой системы был взят уже упоминавшийся выше пластмассово-линзовый объектив-ахромат. Рефракционной частью дифракционно-рефракционного корректора этого объектива является одиночная рефракционная линза, выполненная, как и остальные рефракционные линзы объектива, из кроноподобного полиметилметакрилата. Если ставится задача апохроматизации без увеличения числа элементов дифракционно-рефракционного корректора, то материал его одиночной рефракционной линзы должен быть выбран исходя из условия . Минимизация модуля левой части уравнения (11) требует, чтобы рефракционная линза, входящая в дифракционно-рефракционный корректор, была выполнена из материала с большей дисперсией, чем дисперсии материалов всех остальных линз объектива, т. е. из флинтоподобного оптического материала

(в данном случае это флинтоподобный поликарбонат). При этом, как уже говорилось ранее, равенство нулю определителя расширенной матрицы в левой части уравнения (11) может быть достигнуто не только за счёт материала рефракционной линзы, но и путём перераспределения оптических сил между линзами дифракционно-рефракционного корректора и остальными линзами объектива.

Введение в схему объектива-апохромата рефракционной линзы, выполненной из флинтоподобного поликарбоната, уменьшило радиус поверхности Петцваля. Чтобы увеличить этот радиус и одновременно создать условия для снижения полевых монохроматических aberrаций, силовая рефракционная линза объектива, следующая за дифракционно-рефракционным корректором, была заменена дублетом, выполненным из того же самого кроноподобного материала, т. е. полиметилметакрилата. Сразу же отметим, что указанного эффекта нельзя было достичь введением дополнительной линзы в дифракционно-рефракционный корректор. Затем оптические силы и радиусы кривизны преломляющих поверхностей рефракционных линз уточнялись на основе решения системы уравнений (12).

Заключительным этапом расчёта пластмассово-линзового объектива-апохромата являлась оптимизация, осуществлявшаяся с помощью компьютерной программы оптического проектирования ZEMAX [4]. Оптимизация проводилась по параметрам, не влияющим на оптические силы линз, а, значит, и без нарушения достигнутого условия апохроматизации объектива. Такими параметрами в данном случае являлись прогибы рефракционных линз, коэффициенты асферичности преломляющих поверхностей и коэффициенты асферических добавок дифракционных линз.

На рис. 2 представлена принципиальная схема рассчитанного вышеописанным образом пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного объектива-апохромата. В состав дифракционно-рефракционного корректора объектива входят вторая рефракционная линза и дифракционная линза, микроструктура которой размещена на фронтальной поверхности третьей рефракционной линзы, т. е. первой линзы силового дублета. При этом последняя коррекционная рефракционная линза позволяет уменьшить углы падения лучей на периферийные элементы матричного фотоприёмника и тем самым более равномерно освещать его.

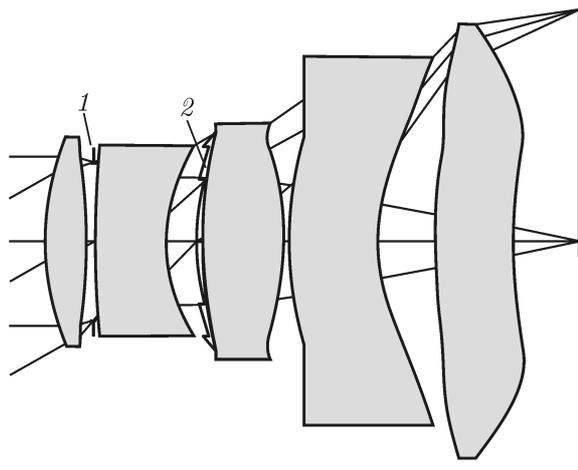


Рис. 2. Оптическая схема пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного объектива-апохромата: 1 — апертурная диафрагма, 2 — дифракционная линза

Изображений меньше  $20^\circ$  обеспечивает при контрасте  $T = 0,5$ : в видимом диапазоне от  $\lambda_F = 0,48613$  мкм до  $\lambda_C = 0,65626$  мкм пространственное разрешение не менее  $N = 150 \text{ мм}^{-1}$ ; в спектральном диапазоне от  $\lambda_{\min} = 0,4$  мкм до  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм, соответствующем естественному сумеречному освещению, пространственное разрешение не менее  $N = 140 \text{ мм}^{-1}$ ; при работе в ночное время с использованием искусственной ИК-подсветки светодиодным прожектором с максимумом излучения на длине волны  $\lambda = 0,85$  мкм пространственное разрешение не менее  $N = 127 \text{ мм}^{-1}$ . Дисторсия рассчитанного объектива-апохромата при всех видах освещения не превышает 1 %, а остаточный продольный хроматизм оказывается не больше 5,5 мкм.

Таким образом, во всех трёх вышеуказанных режимах данный объектив по разрешению как

минимум на 30 % превосходит выпускаемые в настоящее время ведущими производителями стеклянно-линзовые объективы данного класса [27–29].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальные возможности коррекции аберраций рефракционно-линзовых оптических систем с помощью дифракционных линз продемонстрировано на основе сопоставления свойств таких линз со свойствами традиционных рефракционных линз. Показано, что дифракционно-рефракционный корректор в составе одной дифракционной и одной или двух рефракционных линз является компонентом, позволяющим реализовать вышеуказанные потенциальные возможности. При этом особое внимание обращено на возможность подавления энергетической спектральной селективности дифракционных линз и достижения за счёт использования двухслойной двухрельефной микроструктуры с согласованными рельефами дифракционной эффективности, близкой к 100 % в весьма широком спектральном диапазоне. Приведена методика расчёта объектива, обеспечивающая достижение требуемой степени коррекции хроматизма за счёт дифракционно-рефракционного корректора с минимальным числом входящих в его состав рефракционных линз. Рассчитан пластмассово-линзовый объектив-апохромат, который по своим оптическим характеристикам превосходит известные стеклянно-линзовые объективы данного класса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности и в рамках гранта Совета при Президенте РФ по государственной поддержке молодых российских учёных МД-2293.2012.9.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
2. Greisukh G. I., Bobrov S. T., Stepanov S. A. Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.
3. Борн М. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
4. <http://www.radiantzemax.com>.
5. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2005. Вып. 28. С. 60.
6. Пат. 1271240 РФ, МКИ G02B5/32, G03H1/04. Голограммный оптический элемент / А. В. Лукин, К. С. Мустафин, Р. А. Рафиков. Заявл. 04.02.1985; Оpubл. 10.05.1996.
7. Лукин А. В. // Опт. журн. 2007. Т. 74, № 1. С. 80.
8. Ebstein S. T. // Proc. SPIE. 1995. V. 2404. P. 211.
9. Пат. 6262846 В1 США, МКИ G 02B 5/18. Diffractive optical element and optical system having the same ... / T. Nakai. Заявл. 24.07.1998; Оpubл. 17.07.2001.
10. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Калашников А. В., Степанов С. А. // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113, № 4. С. 468.
11. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Сидякина З. А., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37, № 1. С. 45.
12. Грейсух Г. И., Безус Е. А., Быков Д. А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 106, № 4. С. 694.
13. Arieli Y., Noach S., Ozeri S., Eisenberg N. // Appl. Optics. 1998. V. 23, No. 26. P. 6 174.

14. <http://www.shopfoto.ru/p/canon-ef-400-mm-f4-do-is-usm>.
15. Greisukh G. I., Ezhov E. G., Stepanov S. A. // *Appl. Optics*. 2006. V. 45, No. 24. P. 6137.
16. Русинов М. М., Грамматин А. П., Иванов П. Д. и др. *Вычислительная оптика: Справочник*. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
17. Londono C., Clark P. P. // *Proc. SPIE*. 1990. V. 1354. P. 30.
18. Hui X., Wumei L., Jianmei F., Zhijie L. // *Proc. SPIE*. 2008. V. 6624. Art. no. 66240W-1.
19. Герцбергер М. *Современная геометрическая оптика*. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 487 с.
20. Herzberger M., McClure N. R. // *Appl. Optics*. 1963. V. 2. P. 553.
21. Maxwell J. // *Proc. SPIE*. 1990. V. 1354. P. 408.
22. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Казин С. В., Степанов С. А. // *Опт. журн.* 2010. Т. 77, №9. С. 22.
23. <http://www.gsoptics.com>.
24. <http://www.edmundoptics.com>.
25. <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=378&uid2=492>.
26. Greisukh G. I., Ezhov E. G., Levin I. A., Stepanov S. A. // *Appl. Optics*. 2010. V. 49. P. 4379.
27. <http://www.vision-hitech.ru/price.php>.
28. <http://www.ukaoptics.com/ccd.html>.
29. <http://www.videologyinc.com/lenses/megapixel-lenses.htm#megapixel-lenses=fixed>.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

#### **DIFFRACTIVE ELEMENTS IN THE OPTICAL SYSTEM: SUCCESSES, CHALLENGES, AND SOLUTIONS**

*G. I. Greisukh, E. G. Ezhov, I. A. Levin, S. V. Kazin, and S. A. Stepanov*

Correction of aberrations is regarded as one of the most successful applications of diffractive optical elements in the optical system. The ways of overcoming these negative properties of the diffractive elements as spherochromatism and power spectral selectivity are presented. Using the technique given in this paper, a compact plastic-lens refractive-diffractive objective, which can operate in a wide spectral range including the visible and near infrared radiation, has been designed.