

ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫЙ КОРРЕКТОР ТРЕТИЧНОГО СПЕКТРА

© 2010 г. Г. И. Грейсух, доктор техн. наук; Е. Г. Ежов, доктор физ.-мат. наук; С. В. Казин; С. А. Степанов, доктор физ.-мат. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза

E-mail: grey@pguas.ru

Проанализированы возможности строгой суперахроматизации оптических систем путем включения в них корректора, состоящего из дифракционной и двух рефракционных линз. Приведена методика выбора стекол рефракционных линз и определения конструктивных параметров корректора, обеспечивающая одновременно с суперахроматизацией оптической системы минимизацию ее кривизны Петцваля. Показано, что совместное использование в корректоре дифракционной и рефракционных линз позволяет дополнительно существенно снизить сферическую aberrацию и сферохроматизм, в результате чего полихроматическое разрешение системы как на оси, так и по всему угловому полю оптической системы может быть значительно увеличено.

Ключевые слова: оптическая система, дифракционная линза, дифракционно-рефракционный корректор, суперахроматизация, третичный спектр.

Коды OCIS: 220.4830.

Поступила в редакцию 07.04.2010.

Введение

Апохроматическая коррекция (исправление вторичного спектра) предполагает, как известно, устранение хроматизма положения для трех длин волн выбранного спектрального диапазона: λ_{\min} , $\bar{\lambda}$ и λ_{\max} , где $\bar{\lambda}$ – центральная длина волны этого диапазона. Целью такой коррекции является достижение равенства задних отрезков на трех длинах волн ($s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}} = s'_{\lambda_{\max}}$). Суперахроматическая коррекция (исправление третичного спектра) предполагает устранение хроматизма положения уже для четырех длин волн заданного спектрального диапазона и направлена на достижение равенства задних отрезков на этих длинах волн [1].

При проектировании оптических систем на основе рефракционных линз (РЛ) для исправления вторичного и третичного спектров используют оптические материалы с близкими по значению относительными частными дисперсиями, но с различными коэффициентами дисперсий [2–6]. К таким материалам относятся специальные марки стекол, объединяемые в группы особых флинтов и кронов, а также флюорит.

Уникальные дисперсионные свойства дифракционных линз (ДЛ) и несомненные успехи в области технологии их изготовления обусловили резко возросший в последние годы интерес к использованию таких элементов для коррекции хроматизма [7–11].

Возможности ахроматизации и апохроматизации оптических систем путем включения в них дифракционно-рефракционного корректоров (ДРК), содержащих одну ДЛ и одну или две РЛ, проанализированы в работе [12]. В ней рассматриваются два возможных варианта коррекции хроматизма: когда афокальный ДРК вводится в предварительно рассчитанную оптическую систему как дополнительный компонент, располагаемый вблизи апертурной диафрагмы, и когда корректором заменяется компонент системы, имеющий ненулевую оптическую силу и также расположенный вблизи апертурной диафрагмы. Показано, что афокальный ДРК с одной РЛ позволяет произвести апохроматизацию лишь в не представляющем практический интерес случае переисправленного хроматизма оптической системы. В противном случае возможна только ахроматизация, но рассматриваемый ДРК позволяет скомпенсировать примерно на порядок больший хроматизм, чем это достижимо с помощью чисто рефракционного двухлинзового корректора, имеющего те же оптические силы элементов. При замене на ДРК с одной РЛ отрицательного компонента оптической системы апохроматизация возможна и достигается при кривизне поверхностей РЛ, сопоставимой с кривизной поверхностей заменяемого компонента. Однако диапазон допустимых соотношений оптической силы ДРК и продольного хроматизма исходной системы весьма

ограничен. Кроме того, практически отсутствует возможность влияния на третичный спектр.

Более широкие коррекционные возможности представляет ДРК, включающий одну ДЛ и две РЛ. Анализ этих дополнительных возможностей, опираясь на разработанную авторами методику получения конструктивных параметров таких корректоров, посвящена настоящая работа.

Методика расчета ДРК

Приращение заднего отрезка оптической системы при переходе с одной длины волны на другую практически пропорционально первой хроматической сумме этой системы S_{ch} , вычисленной для данной пары длин волн. Отсюда следует, что суперахроматизация требует обращения в нуль первых хроматических сумм, вычисленных для четырех длин волн, ограничивающих три примыкающих спектральных диапазона.

Полагая ДРК бесконечно тонким и учитывая, что его оптическая сила Φ на центральной длине волны $\bar{\lambda}$ должна иметь фиксированное значение, условие суперахроматизации оптической системы, в которую вводится этот корректор, можно записать в виде системы четырех уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi_D + \sum_{i=1}^I \varphi_{Ri} &= \Phi \\ \left(\frac{\varphi_D}{v_D} + \sum_{i=1}^I \frac{\varphi_{Ri}}{v_{Ri}} \right) h_A^2 - S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})} &= 0 \\ \left(\frac{\varphi_D}{v_D} \gamma_{1D} + \sum_{i=1}^I \gamma_{1Ri} \frac{\varphi_{Ri}}{v_{Ri}} \right) h_A^2 - S_{ch}^{(\lambda_1, \lambda_{\max})} &= 0 \\ \left(\frac{\varphi_D}{v_D} \gamma_{2D} + \sum_{i=1}^I \gamma_{2Ri} \frac{\varphi_{Ri}}{v_{Ri}} \right) h_A^2 - S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_2)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь φ_D и φ_R – оптические силы ДЛ и РЛ корректора на длине волны $\bar{\lambda}$, h_A – высота апертур-

ного нулевого луча в плоскости ДРК, вычисленная на той же длине волны; I – количество РЛ в корректоре, $S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})}$, $S_{ch}^{(\lambda_1, \lambda_{\max})}$ и $S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_2)}$ – вклады в первую хроматическую сумму всех элементов исходной оптической системы (за исключением заменяемого компонента), вычисленные для соответствующих пар длин волн.

Коэффициенты дисперсии v и относительные частные дисперсии γ материала РЛ и ДЛ, входящие в систему уравнений (1), имеют вид

$$v_R = (n_{\bar{\lambda}} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (2)$$

$$\gamma_{1R} = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_{\max}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (3)$$

$$\gamma_{2R} = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_2}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (4)$$

$$v_D = \bar{\lambda} / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (5)$$

$$\gamma_{1D} = (\lambda_1 - \lambda_{\max}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (6)$$

$$\gamma_{2D} = (\lambda_{\min} - \lambda_2) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}). \quad (7)$$

Выбранные длины волн спектрального диапазона удовлетворяют условию

$$\lambda_{\min} < \lambda_1 < \bar{\lambda} < \lambda_2 < \lambda_{\max}.$$

Система уравнений (1) является линейной относительно оптических сил элементов ДРК. Если ДРК наряду с ДЛ содержит три РЛ, эта система практически всегда имеет приемлемые (с точки зрения оптических сил элементов корректора) решения. Более того, эти решения существуют для весьма широкого ряда наборов стекол РЛ “с нормальным ходом” частной дисперсии. В случае же ДРК, включающего наряду с ДЛ две РЛ, рассматриваемая система линейных уравнений совместна только при выполнении условия [13]

$$\left| \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & -\Phi \\ 1/v_D & 1/v_{R1} & 1/v_{R2} & -S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})} / h_A^2 \\ \gamma_{1D}/v_D & \gamma_{1R1}/v_{R1} & \gamma_{1R2}/v_{R2} & -S_{ch}^{(\lambda_1, \lambda_{\max})} / h_A^2 \\ \gamma_{2D}/v_D & \gamma_{2R1}/v_{R1} & \gamma_{2R2}/v_{R2} & -S_{ch}^{(\lambda_{\min}, \lambda_2)} / h_A^2 \end{array} \right| = 0. \quad (8)$$

Если ДРК, подобно исходному объективу, комплектуется РЛ, выполненными из реальных оптических стекол, то вероятность точного решения уравнения (8) на априорно выбранных длинах волн близка к нулю. В то же время требова-

ние минимизации модуля левой части уравнения (8) может быть положено в основу поиска оптимальной пары стекол РЛ трехэлементного ДРК, обеспечивающей возможность решения системы уравнений (1) с наилучшим приближением.

В силу нелинейности показателя преломления стекла как функции длины волны условия равенства нулю первой хроматической суммы и отсутствия хроматизма положения для данной пары длин волн, строго говоря, не совпадают. Поэтому оптические силы элементов ДРК, полученные при решении системы уравнений (1), рассматриваются в качестве нулевого приближения и затем уточняются путем итерационного решения системы уравнений, одно из которых обеспечивает заданное фокусное расстояние f' оптической системы с установленным ДРК на длине волны $\bar{\lambda}$, а три других – равенство задних отрезков этой системы на четырех длинах волн выбранного спектрального диапазона:

$$\left. \begin{aligned} f'_{\lambda} &= f' \\ s'_{\lambda_{\min}} &= s'_{\lambda_{\max}} \\ s'_{\lambda_1} &= s'_{\lambda_{\max}} \\ s'_{\lambda_{\min}} &= s'_{\lambda_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Переход от системы уравнений (1) к системе (9) позволяет, кроме того, ввести толщины элементов и воздушных промежутков и оперировать с “реальными стеклами”, описывая их не основанными на линеаризации зависимости показателя преломления от длины волны параметрами ν_R и γ_R , а соответствующими дисперсионными формулами.

Благодаря использованию ДЛ в корректоре, как правило, за счет выбора стекол удается с достаточно высокой точностью обнулить определитель, входящий в уравнение (8). И в этом случае приближенное решение систем уравнений (1) и (9) дает значения оптических сил элементов ДРК, обеспечивающие строгую суперахроматизацию, но на длинах волн, несколько отличающихся от априорно выбранных.

При выборе стекол РЛ для ДРК необходимо также учитывать, что выбранная пара определяет также и радиус R поверхности Петцваля [14], на которой суперахроматизированная оптическая система сможет формировать стигматическое изображение, –

$$R = \left(\sum_{i=1} \varphi_i / n_i \right)^{-1}, \quad (10)$$

где

$$\varphi_i = (n_i - 1)(c_{2i} - c_{1i}) \quad (11)$$

– “тонкая” составляющая оптической силы РЛ, c_{1i} , c_{2i} и n_i – кривизна ее преломляющих поверхностей и показатель преломления на длине волны $\bar{\lambda}$; суммирование проводится по всем

линзам оптической системы за исключением ДЛ, так как ее кривизна Петцваля равна нулю [15].

Учитывая вышеизложенное, на этапе минимизации модуля левой части уравнения (8) целесообразно выделить несколько пар стекол, а после итерационного решения системы уравнений (9), используя уравнение (10), выбрать из найденных решений то, которое наряду с суперахроматизацией обеспечивает возможность формирования стигматического изображения оптической системой на поверхности с минимальной кривизной.

Здесь отметим, что для однозначного соответствия между оптическими силами и кривизной преломляющих поверхностей РЛ корректора при гауссовом расчете одну из поверхностей этих линз удобно считать плоской. Окончательные соотношения между значениями кривизны преломляющих поверхностей, определяющими форму РЛ корректора, и значениями коэффициентов ДЛ, определяющими ее вклад в сферическую aberrацию, могут быть найдены в результате оптимизации оптической системы в целом с помощью одной из компьютерных программ оптического проектирования, например DEMOS [16] или ZEMAX [17].

Суперахроматизация объектива типа триплет

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема, а в табл. 1 – исходные конструктивные параметры объектива, представляющего собой классический триплет Кука и выбранного для демонстрации возможностей его суперахроматизации с помощью ДРК, обе рефракционные линзы которого выполнены из стекол с обычным ходом частной дисперсии. Выбор обусловлен, в частности, тем, что именно этот объектив ис-

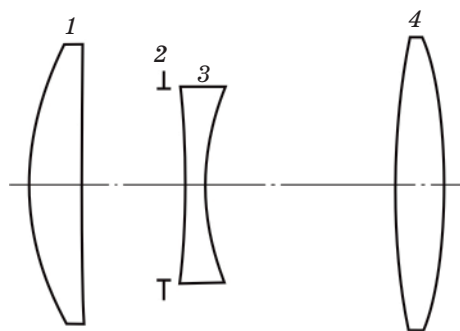


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема исходного объектива. 1, 3, 4 – РЛ; 2 – апертурная диафрагма.

Таблица 1. Исходные конструктивные параметры триплета Кука

r , мм	d , мм	Марка стекла из каталога Schott	$\Delta\gamma_{gF}$
57,21889	7,99986	SSK4A	-0,0008
2364,00631	15,32038		
-166,43045	2,99963	F1	0,0007
54,66462	33,68544		
232,09195	7,48332	SSK4A	-0,0008
-154,21838			
$f' = 240$ мм, $s'_F = 193,978$ мм			

пользовался в работе [12] для демонстрации возможности апохроматической коррекции с помощью ДРК, состоящего из одной ДЛ и одной РЛ. Суперахроматизация осуществлялась в видимом диапазоне, ограниченном синей F - и красной C -линиями водорода ($\lambda_{\min} = \lambda_F = 0,48613$ мкм, $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626$ мкм). В качестве центральной длины волны выбиралась желтая d -линия гелия ($\bar{\lambda} = \lambda_d = 0,58756$ мкм), а промежуточные длины волн вычислялись по формулам $\lambda_1 = (\lambda_C + 2\lambda_F)/3$, $\lambda_2 = (\lambda_F + 2\lambda_C)/3$.

В табл. 1 и в последующих таблицах вместе с маркой стекла указана величина отклонения относительной частной дисперсии $\Delta\gamma_{gF}$, вычисленная в спектральном диапазоне, ограниченном g -линией ртути ($\lambda_g = 0,43583$ мкм) и F -линией водорода, от “нормальной прямой”. Здесь же напомним, что за критерий оценки особого хода частной дисперсии в указанном диапазоне принято отклонение, превышающее 0,005 [18].

Как и в работе [12], на ДРК с двухлинзовой рефракционной частью заменялась внутренняя линза 3 триплета Кука (см. рис. 1), расположенная вблизи апертурной диафрагмы и имеющая отрицательную оптическую силу.

В процессе поиска оптимальной пары стекол для РЛ корректора на этапе минимизации модуля левой части уравнения (8) были выделены, в частности, пары, включающие, наряду с флинтом марки LAF11 (каталог Hikari), нижеследующие кроны: SSK4A (каталог Schott), CF3 (каталог Old Ноуа), СТК19 (каталог ГОСТ). Затем после итерационного решения системы уравнений (9) и оценки кривизны Петцваля была выбрана

пара стекол марок LAF11 и CF3, которая наряду с суперахроматизацией обеспечивает возможность формирования стигматического изображения оптической системой на поверхности с минимальной кривизной.

На рис. 2 приведена принципиальная оптическая схема, а в табл. 2 – конструктивные параметры объектива с ДРК. Кольцевая микроструктура ДЛ корректора нанесена на переднюю поверхность плоскопараллельной подложки, ее пространственная частота описывается, как заложено в программе ZEMAX, выражением

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{2\pi m} \frac{d\psi}{d\rho}, \quad (12)$$

где

$$\psi = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}, \quad (13)$$

ρ – расстояние, отсчитываемое от оптической оси, m – номер дифракционного порядка.

При описании структуры ДЛ уравнениями (12) и (13) ее оптическая сила определяется коэффициентом A_1 и номером дифракционного порядка m как

$$\phi = -A_1 \lambda m / \pi. \quad (14)$$

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

Кривые лучевых aberrаций и волновой сферической aberrации, а также полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) исходного объектива и объектива с ДРК представлены на рис. 3–6. ЧКХ рассчитаны при относительном отверстии 1:6 в плоскости наилучшей установки ($s' = 193,48$ мм) для исходного объектива и в плоскости параксиального изображения для объектива с ДРК.

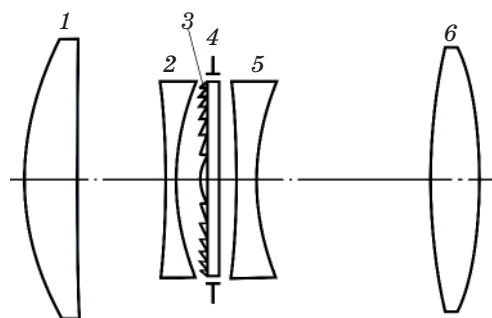


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема объектива с ДРК. 1, 2, 5, 6 – РЛ; 3 – ДЛ, 4 – апертурная диафрагма.

Таблица 2. Конструктивные параметры объектива с ДРК

r , мм	d , мм	Марка стекла	$\Delta\gamma_{gF}$
61,23271	8	SSK4A (каталог Schott)	-0,0008
-354,41360	8,413		
-92,04598	2	CF3 (каталог Old Hoya)	-0,0007
66,58981	3,2		
∞^*	2	SSK4A (каталог Schott)	-0,0008
∞	1,5		
-269,1074	2	LAF11 (каталог Hikari)	-0,0001
117,4592	10,048		
190,4226	7,480	SSK4A (каталог Schott)	-0,0008
-68,38924			
$*m = 1; A_1 = -0,482693 \text{ мм}^{-2}; A_2 = 5,020508 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-4}; A_3 = -3,616424 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-6};$ $A_4 = -8,71728 \times 10^{-6} \text{ мм}^{-8}; A_5 = 1,108981 \times 10^{-7} \text{ мм}^{-10}; A_6 = -8,309046 \times 10^{-10} \text{ мм}^{-12};$ $A_7 = 3,792467 \times 10^{-12} \text{ мм}^{-14}; A_8 = -1,038542 \times 10^{-14} \text{ мм}^{-16}; A_9 = 1,571724 \times 10^{-17} \text{ мм}^{-18};$ $A_{10} = -1,013005 \times 10^{-20} \text{ мм}^{-20}$			
$f' = 240 \text{ мм}, s'_F = 224,03 \text{ мм}$			

Как следует из представленных таблиц и аберрационных кривых, замена внутренней линзы объектива на ДРК с двухлинзовой рефракционной частью действительно позволила обеспечить суперахроматизацию, сократив диапазон изменения заднего фокального отрезка объектива в пределах всего выбранного спектрального интервала с $\Delta s'_F = 606 \text{ мкм}$ до $\Delta s'_F = 9,8 \text{ мкм}$. При этом, благодаря оптимальному сочетанию прогиба РЛ и значений коэффициентов A_2, \dots, A_{10} ДЛ, удалось существенно снизить как сферическую аберрацию, так и сферохроматизм. Наконец, абсолютное значение радиуса поверхности Петцваля благодаря ДРК увеличилось с $|R| = 776 \text{ мм}$ до $|R| = 1190 \text{ мм}$. В результате полихроматическое разрешение объектива, например при контрасте $T = 0,2$ на оси ($\omega = 0$), повысилось с $N = 13 \text{ мм}^{-1}$ до $N = 120 \text{ мм}^{-1}$, а на краю поля ($\omega = 16^\circ$) – с $N = 13 \text{ мм}^{-1}$ до $N = 32,5 \text{ мм}^{-1}$.

С целью оценки возможностей дополнительной коррекции монохроматических аберраций и повышения разрешающей способности рассматриваемого объектива с ДРК изменялась марка стекла его силовых линз с последующим пересчетом по вышеизложенной методике параметров ДРК.

В табл. 3 приведены конструктивные параметры одного из полученных таким образом модифицированных объективов. Так как кривые аберраций тонких пучков и волновой сферической аберрации этого объектива весьма близки к кривым, представленным на рис. 4б и 5б, то на рис. 7 и 8 приведены только кривая продольного хроматизма и ЧКХ модифицированного объектива. Эти ЧКХ, как и представленные на рис. 6б, рассчитаны при относительном отворстии 1:6 в плоскости параксиального изображения. Нетрудно видеть, что замена марки стекла силовых линз исходного объектива и его компоновка соответствующим ДРК позволили, во-первых, сократить диапазон изменения величины заднего фокального отрезка в пределах всего выбранного спектрального интервала до $\Delta s'_F = 8,8 \text{ мкм}$ и, во-вторых, повысить полихроматическое разрешение в центре поля зрения ($\omega = 0$) до $N = 150 \text{ мм}^{-1}$, а на краю поля ($\omega = 16^\circ$) – до $N = 40 \text{ мм}^{-1}$.

В обоих приведенных вариантах объектива-суперахромата наименьший из радиусов кривизны поверхностей РЛ корректора превышает соответствующий радиус заменяемой линзы, а ДЛ имеет низкочастотную микроструктуру.

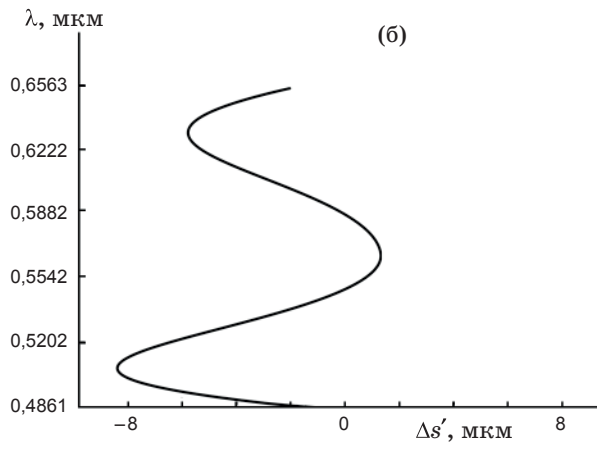
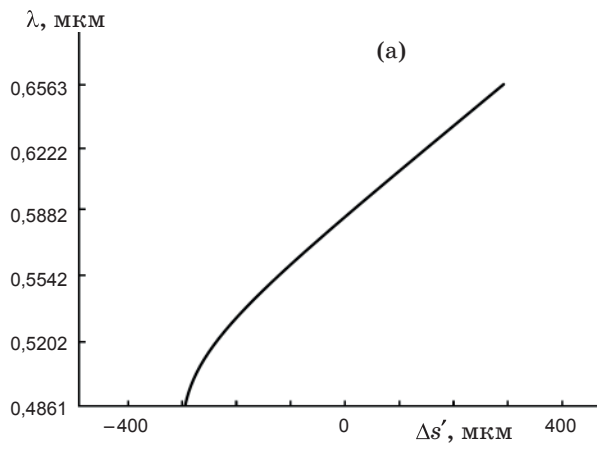


Рис. 3. Продольный хроматизм исходного объектива (а) и объектива с ДРК (б).

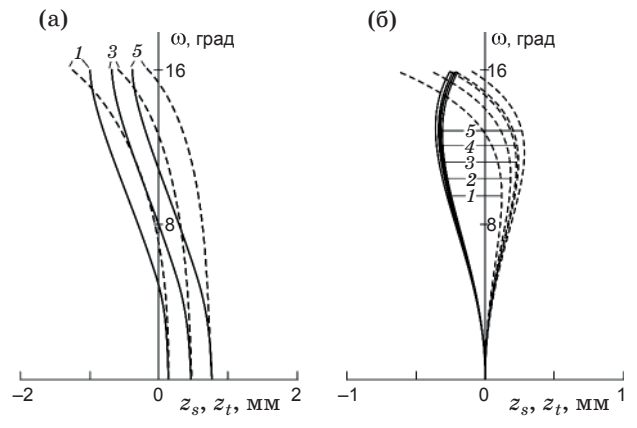


Рис. 4. Астигматизм и кривизна поля исходного объектива (а) и объектива с ДРК (б). 1 – при $\lambda = \lambda_F$, 2 – $\lambda = \lambda_1$, 3 – $\lambda = \lambda_d$, 4 – $\lambda = \lambda_2$, 5 – $\lambda = \lambda_C$; — — — — — саггитальные, ·········· — меридиональные составляющие.

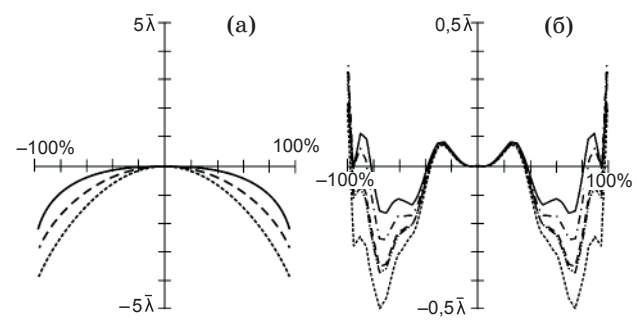


Рис. 5. Волновая сферическая aberrация исходного объектива (а) и объектива с ДРК (б). — — — — — при $\lambda = \lambda_F$, ·········· — $\lambda = \lambda_1$, — — — — — $\lambda = \lambda_d$, ·········· — $\lambda = \lambda_2$, ·········· — $\lambda = \lambda_C$.

Таблица 3. Конструктивные параметры модифицированного объектива с ДРК

r , мм	d , мм	Марка стекла	$\Delta\gamma_{GF}$
61,42653	8	LAKN22 (каталог Schott)	-0,0008
-396,805			
-99,03827	8,413	BACED4 (каталог Schott)	-0,0007
72,03524	2		
∞^*	3,2		
∞	2	LAKN22 (каталог Schott)	-0,0008
-280,4657	1,5	LAF11 (каталог Hikari)	-0,0001
125,4629	2		
215,678	10,048		
-68,3454	7,480	LAKN22 (каталог Schott)	-0,0008

* $m = 1$; $A_1 = -0,58988757 \text{ мм}^{-2}$; $A_2 = 1,2621537 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-4}$; $A_3 = 1,1502 \times 10^{-5} \text{ мм}^{-6}$;
 $A_4 = -1,50153 \times 10^{-7} \text{ мм}^{-8}$; $A_5 = 1,3682194 \times 10^{-9} \text{ мм}^{-10}$; $A_6 = -8,5431085 \times 10^{-12} \text{ мм}^{-12}$;
 $A_7 = 2,8866411 \times 10^{-14} \text{ мм}^{-14}$; $A_8 = -3,5404422 \times 10^{-17} \text{ мм}^{-16}$;
 $A_9 = -3,946366 \times 10^{-20} \text{ мм}^{-18}$; $A_{10} = 1,0227924 \times 10^{-22} \text{ мм}^{-20}$

$f' = 240 \text{ мм}$, $s'_F = 225,5731 \text{ мм}$

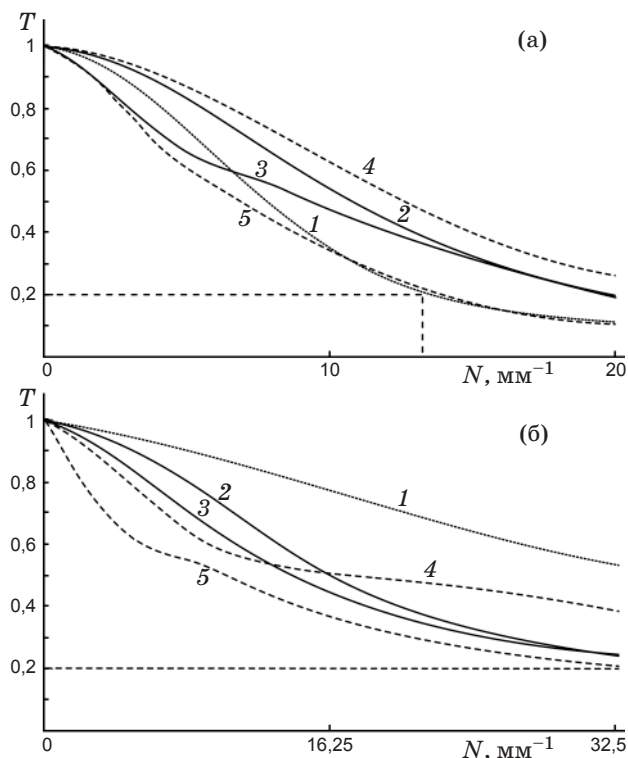


Рис. 6. Дифракционная полихроматическая ЧКХ исходного объектива (а) и объектива с ДРК (б). 1 – при $\omega = 0$, 2 и 3 – $\omega = 11^\circ$, 4 и 5 – $\omega = 16^\circ$; 2 и 4 – для сагиттальной, 3 и 5 – для меридиональной плоскости.

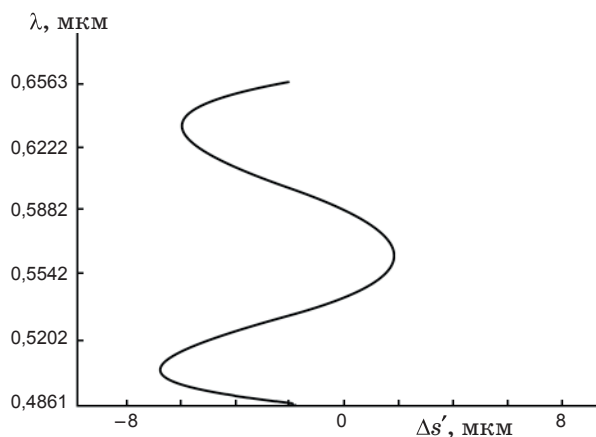


Рис. 7. Продольный хроматизм модифицированного объектива.

Последнее обстоятельство позволяет выполнить эту микроструктуру двухслойной с пилообразным профилем штриха, обеспечив тем самым дифракционную эффективность ДЛ, близкую к 100% в пределах всего заданного спектрального диапазона [19].

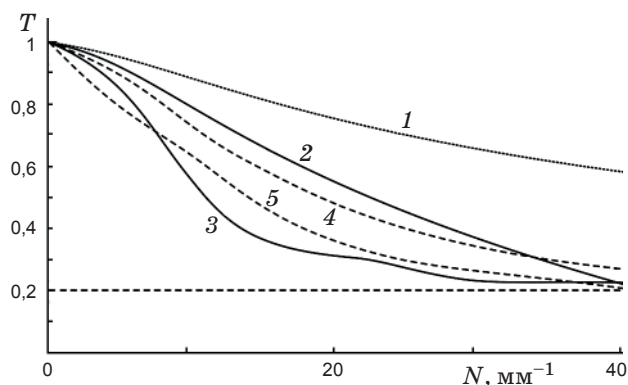


Рис. 8. Дифракционная полихроматическая ЧКХ модифицированного объектива. 1 – при $\omega = 0$, 2 и 3 – $\omega = 11^\circ$, 4 и 5 – $\omega = 16^\circ$; 2 и 4 – для сагиттальной, 3 и 5 – для меридиональной плоскости.

Заключение

Обобщая результаты данной статьи, можно сделать следующие основные выводы:

- вводимый в оптическую систему ДРК, состоящий из ДЛ и двух РЛ, позволяет выполнить ее строгую суперахроматизацию, не прибегая к стеклам “с особым ходом” частной дисперсии, и при этом радиусы кривизны поверхностей РЛ могут быть получены существенно большими, чем это достижимо с помощью чисто рефракционного корректора;

- предложенная методика расчета ДРК с двухлинзовой рефракционной частью позволяет выбрать пары стекол и найти оптические силы всех элементов корректора, которые обеспечат суперахроматизацию оптической системы при минимальной кривизне ее поверхности Петцваля;

- введение в оптическую систему ДРК с двухлинзовой рефракционной частью позволяет одновременно с достижением суперахроматизации и уменьшением кривизны Петцваля существенно снизить сферическую aberrацию и сферохроматизм, в результате чего полихроматическое разрешение системы как на оси, так и по всему полю зрения может быть значительно увеличено.

Авторы выражают благодарность М.А. Гану за постановку задачи и полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (Госконтракт 16.740.11.0145).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Herzberger M.* Color correction in optical systems and a new dispersion formula // *Optica Acta*. 1959. V. 6. P. 197–215.
2. *Чуриловский В.Н.* Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 383 с.
3. Вычислительная оптика: Справочник / Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д. и др. / Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
4. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
5. *Herzberger M., Mc Clure N.R.* The design of superachromatic lenses // *Appl. Opt.* 1963. V. 2. P. 553–560.
6. *Maxwell J.* Tertiary spectrum manipulation in apochromats // *Proc. SPIE*. 1990. V. 1354. P. 408–416.
7. *Ган М.А.* Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.
8. *Stone T., George N.* Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. № 14. P. 2960–2971.
9. *Gan M.A.* Optical systems with holographic and kinoform elements // *Proc. SPIE*. 1989. V. 1136. P. 150.
10. *Gan M.A.* Kinoforms long focal objectives for astronomy // *Adaptive optics and optical structures / Proc. the Meeting, European Congress on Optics*. 1990. P. 330–338.
11. *Gan M., Potyemin I., Pervsev A.* High-speed apo-lens with kinoform element // *Proc. SPIE*. 1991. V. 1574. P. 243–249.
12. *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.
13. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
14. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
15. *Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A.* Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.
16. *Gan M.A., Zhdanov D.D., Novoselskiy V.V., Ustinov S.I., Fedorov A.O., Potyemin I.S., Bezdidko S.N.* Design of optical systems with HOE by DEMOS program // *Proc. SPIE*. 1991. V. 1574. P. 254–260.
17. <http://www.zemax.com>
18. *Бегунов Б.Н., Заказнов П.П.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973. 488 с.
19. *Грейсукх Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур // *Опт. и спектр.* 2009. Т. 106. В. 4. С. 692–697.