

Коррекция хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона

Г.И. Грейсух¹, Е.Г. Ежов¹, А.И. Антонов¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Пенза, Россия

Аннотация

На основе представленных результатов исследования остаточного хроматизма двухлинзовых компонентов, выполненных из технологичных и коммерчески доступных оптических материалов, прозрачных в среднем ИК-диапазоне, показано, что такие компоненты являются эффективным инструментом коррекции хроматизма вариообъективов данного спектрального диапазона.

Ключевые слова: ахроматизация, апохроматизация, хроматизм увеличения, сферохроматизм, средний ИК-диапазон, двухлинзовый компонент, вариообъектив.

Цитирование: Грейсух, Г.И. Коррекция хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 544-549. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-544-549.

Введение

При расчёте оптических систем различных типов часто используется приём, позволяющий устранить хроматические aberrации, не нарушая уже достигнутой коррекции монохроматических aberrаций. Этот приём заключается в том, что одна или несколько толстых линз рассчитываемого объектива разбиваются на две линзы вводимой хроматической поверхностью склейки. Марки оптического стекла этих линз подбираются из условия, чтобы их показатели преломления для центральной длины волны рабочего спектрального диапазона были равны, а дисперсии максимально различались [1]. Разница дисперсий ограничивает по модулю оптическую силу отрицательной линзы склеенного компонента и тем самым обеспечивает возможность получения требуемого относительного отверстия. К сожалению, ряд технологичных и коммерчески доступных сегодня оптических материалов, прозрачных в среднем ИК-диапазоне ($3 \leq \lambda \leq 5$ мкм), представленный в табл. 1, не содержит ни одной пары оптических материалов, удовлетворяющих этому условию. В то же время несколько пар материалов из этого ряда дают возможность получить склеенные или несклеенные двухлинзовые компоненты с высокой степенью коррекции хроматизма при относительном отверстии, недоступном для аналогичных компонентов в видимом диапазоне. Речь идёт об ахроматизации с весьма ограниченным вторичным спектром и даже об апохроматизации.

Напомним, что ахроматическая коррекция оптической системы предполагает устранение хроматизма положения для двух длин волн выбранного спектрального диапазона, например, λ_{\min} и λ_{\max} , что обеспечивает равенство задних отрезков на этих длинах волн, т.е. $s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\lambda_{\max}}$. И если $\bar{\lambda}$ – центральная длина волны выбранного спектрального диапазона, то $s'_{\bar{\lambda}} - s'_{\lambda_{\max}} = \Delta s'$ – мера вторичного спектра. Апохроматическая коррекция (исправление вторичного спектра) предполагает устранение хроматизма положения для трёх длин волн, например, λ_{\min} , $\bar{\lambda}$ и λ_{\max} . При такой коррекции обеспечивается равенство задних отрезков на трёх выбранных длинах волн ($s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}} = s'_{\lambda_{\max}}$). Если предметная плоскость оптиче-

ской системы расположена на бесконечности, то оговоренные выше условия накладываются на задние фокальные отрезки и мера вторичного спектра ниже будет обозначена как $\Delta s'_F$.

Учитывая, что на качество полихроматического изображения, формируемого оптической системой, оказывает влияние и хроматизм увеличения, он также рассматривается в настоящей статье. Напомним, что хроматизм данного типа заключается в изменении линейного увеличения при изменении длины волны. Он оценивается здесь по максимальному расстоянию в плоскости изображения от точки пересечения параксиального главного луча на какой-то из длин волн среднего ИК-диапазона до точки пересечения параксиального главного луча на центральной длине волны $\Delta y'$.

Завершая введение, напомним, что изменение масштаба изображения, сопровождающее зуммирование, т.е. изменение фокусного расстояния вариообъектива, достигается за счёт плавного перемещения его компонентов. При этом изменяющиеся положения предметных плоскостей и входных зрачков всех компонентов не должны нарушать коррекции хроматизма объектива в целом.

1. Хроматизм склеенного двухлинзового компонента

Учитывая, что влияние малых толщин на коррекцию хроматизма положения склеенного оптического компонента незначительно, ниже приводится анализ условий ахроматизации и апохроматизации тонкого двухлинзового компонента с заданной оптической силой при расположении предметной плоскости на бесконечности.

Условие ахроматизации имеет вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^2 \frac{\Phi_i}{v_i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^2 \Phi_i &= \Phi. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

здесь Φ_i и Φ – оптические силы линз и компонента в целом на длине волны $\bar{\lambda}$; v_i – коэффициенты дисперсии материалов линз, вычисленные для каждого материала по общей формуле:

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

где $n_{\bar{\lambda}}$, $n_{\lambda_{\min}}$ и $n_{\lambda_{\max}}$ – показатель преломления оптического материала на центральной и крайних длинах волн.

В случае апохроматической коррекции система уравнений (1) дополняется выражением

$$\sum_{i=1}^2 \gamma_i \frac{\Phi_i}{v_i} = 0, \tag{3}$$

где параметр

$$\gamma_i = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\bar{\lambda}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}) - \tag{4}$$

это относительная частная дисперсия оптического материала (см., например, [1–3]).

Нетрудно видеть, что выполнение условия (1) легко обеспечивается соответствующим соотношением оптических сил Φ_1 и Φ_2 , а одновременное выполнение и условия (3) возможно лишь при равенстве частных дисперсий $\gamma_1 = \gamma_2$. В видимом диапазоне это достигается использованием специальных марок стекла, объединяемых в группы особых флинтгов и кронов [4]. В ИК и, в частности, в среднем ИК-диапазоне ассортимент оптических материалов гораздо уже, что и демонстрирует табл. 1. Показатели преломления и коэффициенты дисперсии оптических материалов, приведённых в этой таблице, рассчитаны авторами настоящей статьи при $\lambda_{\min} = 3$ мкм, $\bar{\lambda} = 4$ мкм и $\lambda_{\max} = 5$ мкм по дисперсионным формулам каталога «INFRARED» программы оптического проектирования ZEMAX [5] и работы [6].

Табл. 1. Оптические материалы и их основные характеристики

№	Марка	$n_{\bar{\lambda}}$	v	γ
1	MgF2	1,3488289	13,4663	0,4291
2	CaF2	1,4096399	21,6830	0,4346
3	BaF2	1,4566982	45,0944	0,4397
4	Al2O3	1,6607309	5,8638	0,6886
5	AGCL	1,9999569	205,9362	0,5081
6	ZNS BROAD	2,2524696	109,6359	0,4841
7	ZnSe	2,4331588	177,9947	0,5489
8	AMTIR1	2,5144281	198,2490	0,6059
9	AMTIR3	2,6209994	173,3841	0,5990
10	Silicon	3,4253005	236,5013	0,6847
11	Germanium	4,0250577	107,2939	0,6889

Введём функцию, позволяющую сравнивать материалы с точки зрения достижимости апохроматизации. Левую часть уравнения (3) легко привести к виду

$$\gamma_1 \left(\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2} \right) + (\gamma_2 - \gamma_1) \frac{\Phi_2}{v_2}. \tag{5}$$

Если условие ахроматизации выполнено, т.е. сомножитель при γ_1 обращён в ноль, то величина, определяющая степень отступления от условия апохроматизации, равна $(\gamma_2 - \gamma_1)(\Phi_2/v_2)$ и её модуль можно принять за оценочную функцию. Используя систему уравнений (1), нетрудно получить $\Phi_2/v_2 = 1/(v_2 - v_1)$, и в результате требуемая оценочная функция принимает вид

$$M = \left| \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{v_2 - v_1} \right|. \tag{6}$$

В табл. 2 представлены скомпонованные в пары оптические материалы табл. 1, обеспечивающие наименьшее значение данной оценочной функции. Кроме того, в этой таблице приведена оценка вторичного спектра $\Delta s'_F$ тонкого двухлинзового компонента с фокусным расстоянием $f' = 100$ мм, выполненного из соответствующей пары оптических материалов. Учитывая существенное влияние на качество изображения, формируемого компонентом, работающим с полихроматическим излучением, сферохроматизма, в табл. 2 приведён также интервал значений волновой сферической aberrации W_S на краю зрачка, соответствующего относительному отверстию 1:2, при условии полного устранения этой aberrации для центральной длины волны среднего ИК-диапазона $\lambda = 4$ мкм.

Табл. 2. Остаточный хроматизм двухлинзового компонента, выполненного из представленных пар оптических материалов

№	Пара оптических материалов	M	$\Delta s'_F$, мкм	$W_S/\bar{\lambda}$	$\Delta y'$, мкм
1	Germanium/Al2O3	2,6E-006	≈ 0	0,05	4,3
2	Silicon/Al2O3	1,7E-005	1,68	0,05	8,5
3	Germanium/Silicon	3,2E-005	3,95	0,073	3,2
4	BaF2/CaF2	2,2E-004	21,99	2,20	16
5	ZnS_broad/AgCl	2,5E-004	24,81	0,27	1,6
6	BaF2/MgF2	3,3E-004	33,60	1,43	5,7
7	ZnS_broad/CaF2	5,6E-004	56,88	0,53	2,6
8	Silicon/ZnS_broad	1,6E-003	156,4	1,66	1,5

Как следует из табл. 2, вторичный спектр компонентов, выполненных из пар материалов с 1-й по 5-ю, не превышает допуск, ограниченный дифракцией и составляющий для коротковолнового края рабочего спектрального диапазона ≈ 25 мкм. При этом строгую апохроматизацию, т.е. практическое равенство задних фокальных отрезков на трёх длинах волн λ_{\min} , $\bar{\lambda}$ и λ_{\max} , обеспечивает только 1-я пара оптических материалов. Что касается 6-й и 7-й пар материалов, то максимумы их вторичных спектров лежат в районе дифракционного допуска, соответствующего длинноволновому краю рабочего спектрального диапазона (≈ 42 мкм). Поэтому можно считать, что все пары оптических материалов от 2-й до 7-й обеспечивают коррекцию хроматизма положения, близкую к апохроматизации.

Обращаясь к хроматизму увеличения, напомним, что он устраняется автоматически при устранении хроматизма положения тонкой оптической системы. У системы же с конечными толщинами линз и воздушных промежутков при устранённом хроматизме положения хроматизм увеличения зависит от выбора оптических материалов. Представленные в табл. 2 значения $\Delta y'$ вычислялись для склеенного компонента, выполненного из соответствующей пары оптических

материалов при $f' = 100$ мм, относительном отверстии 1:2, толщине фронтальной и последующей линз 15 и 5 мм и полевом угле в пространстве предметов 10° . Допуск на хроматизм увеличения, ограниченный дифракцией, при вышеперечисленных параметрах составляет $\approx 9,5$ мкм. Завершая анализ результатов, представленных в табл. 2, укажем, что значения параметров $\Delta s'_F$, $W_S/\bar{\lambda}$, $\Delta u'$, как и ограниченные дифракцией допуски на эти параметры, были получены с помощью программы оптического проектирования ZEMAX.

В зависимости от места двухлинзового компонента в проектируемой ИК-системе, а также его характеристик (фокусного расстояния, относительного отверстия, увеличения, полевого угла и т.д.) та или иная хроматическая aberrация может оказаться превалирующей, что и определит оптимальный выбор пары его оптических материалов.

Напомним, что при устранённом хроматизме положения хроматизм увеличения любой оптической системы не зависит от положения входного зрачка [1]. Это обстоятельство позволяет, эффективно используя двухлинзовые склеенные или несклеенные компоненты в схемах ИК-вариообъективов, обеспечить требуемую коррекцию хроматизма для всего диапазона значений фокусного расстояния.

2. Двухлинзовые компоненты в вариообъективах среднего ИК-диапазона

Эффективность использования двухлинзовых склеенных компонентов в качестве корректоров хроматизма вариообъективов продемонстрируем на примере простого по конструкции объектива, обеспечивающего примерно трёхкратное непрерывное изменение масштаба формируемого им изображения и предложенного в работе [7]. Схема этого объектива относится к N-P-P типу, т.к. состоит из трёх линзовых групп, при этом первая из них имеет отрицательную (*Negative*), а последующие две – положительные (*Positive*) оптические силы. При зуммировании фронтальная группа этого объектива, выполненная в виде одной отрицательной линзы, неподвижна относительно плоскости изображения. Подвижны обе последующие группы – силовая положительная группа, расположенная за фронтальной линзой и состоящая из силовой положительной и коррекционной отрицательной линз, а также следующая за коррекционной вторая положительная линза.

Переход от видимого рабочего спектрального диапазона к среднему ИК осуществлялся в два этапа. На первом этапе, используя методику, предложенную и развитую в работах [8] и [9], выбранный для демонстрации объектив был пересчитан на одну длину волны $\bar{\lambda} = 4$ мкм, стёкла всех линз заменены на оптический материал ZnS_broad, а фокусные расстояния и габарит (расстояние от вершинной касательной плоскости фронтальной линзы до плоскости изображения) были увеличены примерно в десять раз. Затем в ходе оптимизации, выполнявшейся с помощью программы оптического проектирования ZEMAX, оценивались

достижимые (с точки зрения качества формируемого изображения) значения светосилы во всём интервале изменения фокусного расстояния.

На втором этапе все три линзовые группы заменялись склеенными двухлинзовыми компонентами с соответствующими оптическими силами и затем, после уточняющего габаритного и абберационного расчёта, выполнялась оптимизация по всем конструктивным параметрам. Для склеенных компонентов всех линзовых групп выбиралась одна и та же пара оптических материалов. Расчёты выполнялись для пар материалов № 2 и № 3 табл. 2, характеризующихся очень низким уровнем вторичного спектра и сферо-хроматизма, и пары № 8, обеспечивающей наинизший уровень хроматизма увеличения. Пара материалов № 2 не позволила получить вариообъектив с приемлемым качеством изображения из-за очень большого и неустранимого хроматизма увеличения.

В то же время на основе склеенных компонентов из пар материалов № 3 и № 8 были получены две версии вариообъектива с низким уровнем хроматических и монохроматических aberrаций. Общими для обеих версий объектива являются оптическая схема, представленная на рис. 1, габарит, равный 121,5 мм, и значения фокусного расстояния, углового поля в пространстве предметов и относительного отверстия в короткофокусной ($f'_1 = 35$ мм; $2\omega = 22,6^\circ$; 1:1,5), промежуточной ($f'_2 = 54$ мм; $2\omega = 14,7^\circ$; 1:2,5) и длиннофокусной конфигурациях ($f'_3 = 84$ мм; $2\omega = 9,5^\circ$; 1:3,5).

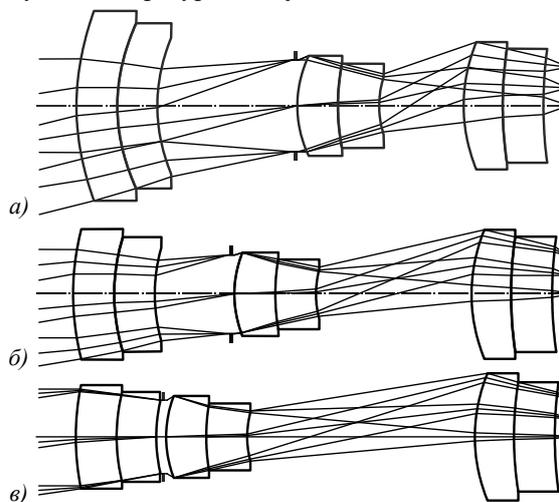


Рис. 1. Оптическая схема вариообъектива: короткофокусная конфигурация, соответствующая $f'_1 = 35$ мм (а); промежуточная конфигурация, соответствующая $f'_2 = 54$ мм (б); длиннофокусная конфигурация, соответствующая $f'_3 = 84$ мм (в)

Все склеенные поверхности в обеих версиях объектива сферические, а остальные преломляющие поверхности асферические, задаваемые в ZEMAX уравнением чётной асферической поверхности. Конструктивные параметры одной из версий сведены в табл. 3–5.

Из табл. 5 следует, что вторичный спектр $\Delta s'_F$, хроматизм увеличения $\Delta u'$ и хроматическая разность волновой сферической aberrации $\Delta W_S/\bar{\lambda}$ вариообъ-

ектива во всех конфигурациях не превышает допуск, ограниченный дифракцией.

Табл. 3. Основные конструктивные параметры вариообъектива

Номер поверхности	Радиус r , мм	Толщина d , мм	Оптический материал
ПП*	∞	∞	–
1	65,751	10	Silicon
2	47,278	10	Germanium
3	42,694	Изменяемая d_3	–
АД**	∞	0,500	–
4	29,168	10	Silicon
5	53,356	10	Germanium
6	22,907	Изменяемая d_6	–
7	40,904	10	Silicon
8	112,619	10	Germanium
9	140,438	Изменяемая d_9	–
ПИ***	∞	0	–

* ПП – плоскость предмета;

** АД – апертурная диафрагма;

*** ПИ – плоскость изображения.

Табл. 4. Дополнительные характеристики асферических поверхностей вариообъектива

Номер поверхности	Коэффициент асферичности при конической постоянной $k = 0$				
	$\alpha_2 \times 10^3$, мм ⁻³	$\alpha_3 \times 10^5$, мм ⁻⁵	$\alpha_4 \times 10^7$, мм ⁻⁷	$\alpha_5 \times 10^9$, мм ⁻⁹	$\alpha_6 \times 10^{11}$, мм ⁻¹¹
1	-1,163 · 10 ⁻³	1,413 · 10 ⁻⁴	-3,349 · 10 ⁻⁵	3,759 · 10 ⁻⁶	-2,655 · 10 ⁻⁷
3	-3,512 · 10 ⁻³	9,553 · 10 ⁻⁴	-4,541 · 10 ⁻⁶	9,647 · 10 ⁻⁵	-1,032 · 10 ⁻⁵
4	1,751 · 10 ⁻³	2,877 · 10 ⁻⁵	8,846 · 10 ⁻⁴	-7,595 · 10 ⁻⁴	2,001 · 10 ⁻⁴
6	2,502 · 10 ⁻²	6,468 · 10 ⁻³	3,179 · 10 ⁻²	-6,937 · 10 ⁻²	5,016 · 10 ⁻²
7	-2,012 · 10 ⁻³	7,518 · 10 ⁻³	-4,902 · 10 ⁻³	1,481 · 10 ⁻³	-1,660 · 10 ⁻⁴
9	-1,062 · 10 ⁻²	4,675 · 10 ⁻²	-4,749 · 10 ⁻²	2,133 · 10 ⁻²	-3,353 · 10 ⁻³

Табл. 5. Параметры вариообъектива, изменяемые при зуммировании

Оптическая характеристика	Номер конфигурации		
	1	2	3
Толщина d_3 , мм	34,234	18,902	1,828
Толщина d_6 , мм	20,878	37,988	56,188
Толщина d_9 , мм	5,889	4,108	2,988
$\Delta s' / f$, мкм	3	8	7,4
$\Delta u' / \bar{\lambda}$, мкм	3	1,7	0,7
$\Delta W_s / \bar{\lambda}$	0,12	0,19	0,11
Значения дифракционно-ограниченной полихроматической частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) на пространственных частотах 25 и 50 мм ⁻¹ (в верхней и нижней строках соответственно)	0,8	0,68	0,55
	0,62	0,39	0,18
Минимальные значения полихроматической ЧКХ, оцененные по меридиональным и сагиттальным составляющим в пределах всего поля зрения на пространственных частотах 25 и 50 мм ⁻¹ (в верхней и нижней строках соответственно)	0,55	0,53	0,37
	0,30	0,25	0,12

Весьма близкий результат продемонстрировала и вторая версия вариообъектива, для компонентов которого использовалась 8-я пара материалов, т.е. Silicon/ZnS_broad. Следовательно, двухлинзовые склеенные компоненты на основе технологичных и коммерчески доступных оптических материалов действительно являются эффективным инструментом коррекции хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона.

Заключение

Исследование остаточного хроматизма двухлинзового компонента, выполненного из технологичных и коммерчески доступных оптических материалов, прозрачных в среднем ИК-диапазоне, позволило выявить пары материалов, обеспечивающих апохроматизацию или близкую к ней коррекцию хроматизма положения при низком уровне хроматизма увеличения и сферохроматизма. Эти результаты легли в основу рекомендаций по выбору оптических материалов для двухлинзового компонента в зависимости от его прогнозируемых оптических характеристик и места в составе проектируемой ИК-системы.

Эффективность использования двухлинзовых склеенных компонентов в качестве корректоров хроматизма вариообъективов продемонстрирована на примере простого по конструкции объектива, обеспечивающего примерно трёхкратное непрерывное изменение масштаба формируемого ими изображения. Показано, в частности, что вторичный спектр, хроматизм увеличения и хроматическая разность волновой сферической аберрации рассчитанного вариообъектива во всех конфигурациях не превышает допуск, ограниченный дифракцией, а разрешение объектива ограничено лишь монохроматическими аберрациями. На этой основе сделан вывод о том, что двухлинзовые склеенные компоненты, выполненные из технологичных и коммерчески доступных оптических материалов, действительно являются эффективным инструментом коррекции хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона.

Литература

1. **Чуриловский, В.Н.** Теория хроматизма и аберраций третьего порядка / В.Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1968. – 312 с.
2. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, Issue 24. – P. 6137-6141.
3. **Грейсх, Г.И.** Моделирование и исследование коррекции хроматизма оптических систем, линзы которых выполнены из материалов, допускающих прецизионное пресообразование / Г.И. Грейсх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 529-535. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-529-535.
4. **Слюсарев, Г.Г.** Расчёт оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 640 с.
5. ZEMAX: software for optical system design [Electronical Resource]. – URL: <http://www.radiantzemax.com/> (request date 01.02.2019).

6. **Xie, Hongbo.** Design of high-efficiency diffractive optical elements towards ultrafast mid-infrared timestretched imaging and spectroscopy / Hongbo Xie, Delun Ren, Chao Wang, Chensheng Mao, Lei Yang // *Journal of Modern Optics*. – 2018. – Vol. 65, Issue 3. – P. 255-261.
7. **U.S. Patent 7,136,232 B2 G02B 15/14, G02B 15/16, 359/689.** Miniature zoom lens / A. Komatsu, A. Shimizu, K. Honda, filed of February 17, 2005, published of November 14, 2006.
8. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, Issue 20. – P. 4597-4604.
9. **Грейсух, Г.И.** Расчёт и анализ компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариообъектива // Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 210-214.

Сведения об авторах

Грейсух Григорий Исаевич, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Г.И. Грейсух – специалист в области расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 200 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств. E-mail: grey@pguas.ru.

Ежов Евгений Григорьевич, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 г.). Работает профессором кафедры информационных систем и компьютерного моделирования Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Специалист в области расчёта оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Ежова свыше 60 статей, учебник и 2 патента. E-mail: grey@pguas.ru.

Антонов Артем Иванович, 1993 года рождения. В 2014 окончил бакалавриат Пензенского государственного университета по направлению «Физика». В 2016 окончил магистратуру Пензенского государственного университета по направлению «Физика». Аспирант кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства по направлению «Приборы и методы экспериментальной физики». В списке научных работ А.И. Антонова 5 статей и 1 авторское свидетельство. E-mail: grey@pguas.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 11 февраля 2019 г. Окончательный вариант – 28 апреля 2019 г.

Correction of chromatism of mid-infrared zoom lenses

G.I. Greisukh¹, E.G. Ezhov¹, A.I. Antonov¹

¹Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

Abstract

Based on the presented results of the research of residual chromatism of two-lens components made of technologically advanced and commercially available optical materials that are transparent in the mid-IR range, it has been shown that such components are an effective tool for correcting chromatism of zoom lenses of this spectral range.

Keywords: achromatization, apochromatization, lateral color, spherochromatism, middle IR range, two-lens component, zoom lens.

Citation: Greisukh GI, Ezhov EG, Antonov AI. Correction of chromatism of mid-infrared zoom lenses. *Computer Optics* 2019; 43(4): 544-549. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-544-549.

References

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> [1] Churilovsky VN. Theory of chromatism and third order aberrations [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1968. [2] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems. <i>Appl Opt</i> 2006; 45(24): 6137-6141. [3] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Modeling and investigation of color correction in optical systems with constituent elements synthesized by precision mold- | <ol style="list-style-type: none"> ing. <i>Computer Optics</i> 2015; 39(4): 529-535. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-529-535. [4] Slusarev GG. Design of optical systems [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1975. [5] ZEMAX: software for optical system design. Source: (http://www.radiantzemax.com/). [6] Xie H, Ren D, Wang Ch, Mao Ch, Yang L. Design of high-efficiency diffractive optical elements towards ultrafast mid-infrared timestretched imaging and spectroscopy. <i>J Mod Opt</i> 2018; 65(3): 255-261. [7] Komatsu A, Shimizu A, Honda K. Miniature zoom lens, Pat US 7136232 of November 14, 2006. |
|--|--|

-
- | | |
|---|---|
| [8] Greisukh GI, Ezhov EG, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses. <i>Appl Opt</i> 2012; 51(20): 4597-4604. | [9] Graysukh GI, Ezhov EG, Sidyakina ZA, Stepanov SA. Design and analysis of the compact plastic refractive-diffractive zoom lens. <i>Computer Optics</i> 2013; 37(2): 210-214. |
|---|---|
-

Authors' information

Grigoriy Isaevitch Greisukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 200 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions. E-mail: grey@pguas.ru.

Eugeny Grigorievich Ezhov (b. 1977) graduated (1981) from the Penza State University majoring in Radio Engineering. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (2008), professor of the Information Systems and Computer-Modeling department of Penza State University of Architecture and Construction. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is coauthor over 55 scientific papers, tutorial and 2 patents. E-mail: grey@pguas.ru.

Artyom Ivanovich Antonov (b. 1993). In 2014 he graduated from Penza State University, direction of "Physics", as bachelor. In 2016 he acquired the master degree of direction of "Physics". Now he is a post-graduate student of Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction in the direction "Devices and Methods of Experimental Physics". A.I. Antonov is co-author of 5 articles and 1 invention. E-mail: grey@pguas.ru.

Received – 11 February, 2019. The final version – 28 April, 2019.
