

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ХРОМАТИЗМА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ЛИНЗЫ КОТОРЫХ ВЫПОЛНЕНЫ ИЗ МАТЕРИАЛОВ, ДОПУСКАЮЩИХ ПРЕЦИЗИОННОЕ ПРЕССОВАНИЕ

Г.И. Грейсх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

### Аннотация

Исследована коррекция хроматизма в оптических системах с линзами, выполненными из материалов, допускающих прецизионное прессование. Показаны преимущества такого подхода.

**Ключевые слова:** корректор хроматизма, рефракционная линза, дифракционная линза, прецизионное прессование стекла, апохроматизация, суперахроматизация.

**Цитирование:** Грейсх, Г.И. Моделирование и исследование коррекции хроматизма оптических систем, линзы которых выполнены из материалов, допускающих прецизионное прессование / 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.

### Введение

В работе [1] была предложена модель бесконечно тонкого объектива-суперахромата, состоящего из корректора хроматизма (КХ) и силовой положительной линзы (СПЛ). При этом предполагалось, что КХ может состоять только из рефракционных линз (РЛ) или включать, наряду с РЛ, и одну дифракционную линзу (ДЛ). С использованием этой модели исследовано влияние на максимальную по модулю оптическую силу (т.е. величину, обратную фокусному расстоянию) РЛ корректора материалов этих РЛ. Исследование охватывало почти два десятка оптических пластмасс и свыше тысячи наименований марок оптического стекла, серийно выпускавшихся ведущими мировыми производителями.

За несколько лет, прошедших со времени публикации цитируемой работы, в области производства оптических пластмасс и компонентов из них принципиальных изменений не произошло. В то же время традиционные методы изготовления стеклянных компонентов с помощью шлифования и полирования дополнились новой технологией производства высокоточных оптических компонентов. Эта технология прецизионного прессования стекла открывает возможность массового и малозатратного производства асферических линз или даже линз с поверхностями произвольной формы. Её широкое внедрение позволит, в частности, существенно повысить оптические характеристики фото- и видеокамер всех видов гаджетов при сохранении или даже снижении их стоимости. Здесь следует отметить, что появление технологии прецизионного прессования оптического стекла ни в коей мере не отменяет и не снижает роли оптических пластмасс в оптическом приборостроении. Это, в частности, связано с тем, что технология прессования оптических пластмасс является в настоящее время более отработанной, а сами элементы из пластмассы имеют более предсказуемые оптические и физико-механические характеристики [2, 3].

Технология прецизионного прессования оптического стекла [moldable glasses (MG)], одной из отличительных особенностей которого является то, что требу-

мая для прессовки вязкость стекла достигается при относительно низкой температуре порядка 500°C [2]. Весьма широкий ассортимент марок стекла MG-класса сегодня серийно производят Schott Group [3] и Hoya Corporation [4], причём последняя уже представила в своих каталогах дисперсионные формулы производимых стёкол этого класса. Данное обстоятельство и позволило произвести исследования, результаты которых представлены в настоящей статье.

### Условия и результаты исследований

Дополнив MG-класс стёкол группой оптических пластмасс и используя ранее предложенную модель оптической системы, состоящую из бесконечно тонких КХ и СПЛ, исследовались потенциальные возможности КХ, включающего РЛ, каждая из которых может иметь асферические поверхности и, следовательно, наряду с коррекцией хроматизма первого порядка, участвовать в коррекции как монохроматических, так и полихроматических аберраций третьего и более высоких порядков [5–12]. Вышеупомянутые потенциальные возможности КХ определяются радиусами кривизны поверхностей его РЛ. Действительно, через КХ должно проходить всё излучение, участвующее в формировании изображения, а малые радиусы кривизны поверхностей РЛ будут ограничивать световой диаметр объектива и вносить нежелательные аберрации третьего и более высоких порядков.

Очевидно, что чем больше (по модулю) радиусы кривизны поверхностей, а значит, и меньше оптические силы РЛ, входящих в КХ, по отношению к оптической силе объектива в целом, тем больше возможностей для увеличения апертуры объектива и поля его высококачественного изображения. Поэтому одним из определяющих факторов при выборе комбинации оптических материалов РЛ КХ является их влияние на максимальную по модулю оптическую силу РЛ-корректора. В настоящей статье представлены результаты исследования этого влияния при апохроматизации и суперахроматизации оптической системы, причём так же, как и в работе [1], рассматривались варианты с КХ, состоящим только из РЛ или включающим, наряду с РЛ, и одну ДЛ.

Здесь напомним, что виды коррекции продольно-го хроматизма различаются тем, на скольких длинах волн рабочего спектрального диапазона обеспечивается равенство задних отрезков оптической системы. При ахроматизации это равенство обеспечивается на двух, при апохроматизации – на трёх и при суперахроматизации – на четырёх длинах волн. С увеличением количества длин волн, на которых обеспечивается равенство задних отрезков, уменьшается расфокусировка изображения на промежуточных длинах волн, не задействованных в коррекции продольного хроматизма.

К апохроматизации и суперахроматизации, обеспечивающим более низкий уровень остаточного хроматизма по сравнению с ахроматизацией, прибегают в тех случаях, когда стремятся получить высококачественное полихроматическое изображение, формируемое оптической системой, в широком спектральном диапазоне, например, как в данной статье и в работе [1], включающем видимое и ближнее ИК-излучение ( $\lambda_{\min} = 0,4$  мкм,  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм). При апохроматизации спектральный диапазон от ( $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  разбивают на два, а при суперахроматизации – на три примерно равных интервала [13].

Полагая, что оптическая сила модели объектива на центральной длине волны  $\bar{\lambda}$  заданного спектрального диапазона должна быть равна единице, условие его апохроматизации можно записать в виде системы трёх уравнений [14]

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^I \phi_i &= 1 - \phi_{PL} \\ \sum_{i=1}^I \frac{1}{v_i} \phi_i &= -\frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \\ \sum_{i=1}^I \frac{\gamma_i}{v_i} \phi_i &= -\frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \gamma_{PL} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $\phi_{PL}$ ,  $v_{PL}$ ,  $\gamma_{PL}$  и  $\phi_i$ ,  $v_i$ ,  $\gamma_i$  – нормированная оптическая сила на длине волны  $\bar{\lambda}$ , коэффициент дисперсии и относительная частная дисперсия СПЛ и линз КХ соответственно. Коэффициент дисперсии и относительная частная дисперсия ДЛ ( $v_D$ ,  $\gamma_D$ ) и материалов РЛ ( $v_R$ ,  $\gamma_R$ ) вычисляются по формулам [7]

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

$$\gamma_D = (\lambda_{\min} - \bar{\lambda}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}) \quad (3)$$

и

$$v_R = (n_{\bar{\lambda}} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (4)$$

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

где  $n_{\bar{\lambda}}$ ,  $n_{\lambda_{\min}}$  и  $n_{\lambda_{\max}}$  – значения показателя преломления материала РЛ на длинах волн  $\bar{\lambda}$ , ( $\lambda_{\min}$  и ( $\lambda_{\max}$  соответственно.

Условие достижения суперахроматизации можно записать в виде системы четырёх уравнений [1]

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^I \phi_i &= 1 - \phi_{PL} \\ \sum_{i=1}^I \frac{1}{v_i} \phi_i &= -\frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \\ \sum_{i=1}^I \frac{\gamma_{ki}}{v_i} \phi_i &= -\frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \gamma_{k,PL} \quad (k = 1; 2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\gamma_{ki}$  – относительные частные дисперсии которые для ДЛ и материалов РЛ вычисляются соответственно, по формулам [1, 8]

$$\gamma_{1D} = (\lambda_1 - \lambda_{\max}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (7)$$

$$\gamma_{2D} = (\lambda_{\min} - \lambda_2) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}) \quad (8)$$

и

$$\gamma_{1R} = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_{\max}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (9)$$

$$\gamma_{2R} = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_2}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}). \quad (10)$$

Здесь длины волн  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_{\max}$ , удовлетворяют условию  $\lambda_{\min} < \lambda_1 < \bar{\lambda} < \lambda_2 < \lambda_{\max}$ .

Системы уравнений (1) и (6) являются линейными и определёнными относительно нормированных оптических сил трёх ( $I = 3$ ) или четырёх ( $I = 4$ ) линз КХ соответственно.

Опыт коррекции хроматизма реальных оптических систем, состоящих из стеклянных или пластмассовых РЛ, с использованием методик, предполагающих замену одной из РЛ оптической системы КХ показал, что хроматизм остающейся (незаменяемой) части оптической системы сопоставим с хроматизмом одиночной РЛ, имеющей такую же оптическую силу, как и у заменяемой части системы. Более того, этот хроматизм имеет, как правило, промежуточную величину между хроматизмом одиночной РЛ, выполненной из крона (кродноподобной пластмассы) и из флинта (флинтоподобной пластмассы) [15 – 17]. Поэтому, выбирая для СПЛ-модели какой-то крон (кродноподобную пластмассу) или флинт (флинтоподобную пластмассу) и осуществляя поиск оптимальной комбинации оптических материалов КХ для ряда значений соотношения оптических сил СПЛ и КХ, можно охватить весьма широкий диапазон возможных ситуаций, характерных для схемных решений реальных объективов.

При исследованиях, результаты которых представлены в данной статье, оптические материалы для СПЛ и линз КХ выбирались из каталогов Misc и Zeon, включённых в базу данных Glasscat компьютерной программы оптического проектирования Zemax [18], из раздела Glass Molded Lens каталога Hoya Group Optics Division [4] и из раздела Optical Plastic For molded lenses каталога фирмы Fiber Optic Center [19].

В табл. 1 и 2 представлены оптимальные комбинации оптических материалов РЛ КХ для семи вариантов компоновки модельных объектива-апохромата и суперахромата соответственно.

Табл. 1. Оптимальные комбинации оптических материалов РЛ, составляющих КХ модельного объектива-апохромата

Тип КХ	Пластмасса СПЛ	Нормированная оптическая сила СПЛ	$ \phi _{\max}$	Оптический материал РЛ КХ		
				РЛ1	РЛ2	РЛ3
3РЛ	PMMA	0,9	1,0	M-FCD1	AL-6265 (OKP-850)	M-FDS2
		0,8	0,98			
		0,5	0,94			
	POLYCARB	0	1,18			
		0,9	1,37			
		0,8	1,31			
2РЛ+ДЛ	PMMA	0,9	0,40	M-FDS2	M-FCD1	-
		0,8	0,49			-
		0,5	0,76			-
	POLYCARB	0	1,2			-
		0,9	0,77			-
		0,8	0,81			-
		0,5	0,96			-
		-	-			-

Табл. 2. Оптимальные комбинации оптических материалов РЛ, составляющих КХ модельного объектива-суперахромата

Тип КХ	Пластмасса СПЛ	Нормированная оптическая сила СПЛ	$ \phi _{\max}$	Оптический материал РЛ КХ			
				Л1	Л2	Л3	Л4
4РЛ	PMMA	0,9	0,72	M-BACD15	AL-6265 (OKP-850)	M-FDS1	M-FDS910
		0,8	0,73	M-FDS2		M-FDS910	M-PCD51
		0,5	0,90	M-BACD5N	M-FDS2	M-FCD1	AL-6265 (OKP-850)
	POLYCARB	0	0,92	AL-6265 (OKP-850)	M-FCD1	M-FDS2	480R
		0,9	1,13		M-BACD12		M-FDS910
		0,8	1,08	M-TAF1	M-FCD1	M-TAFD307	M-FDS2
		0,5	1,15			M-FDS2	AL-6265 (OKP-850)
3РЛ+ДЛ	PMMA	0,9	0,79	M-TAF1	M-FCD1	AL-6263 (OKP4HT)	-
		0,8	0,79	M-FCD1	AL-6261 (OKP4)	AL-6265 (OKP-850)	-
		0,5	0,90		AL-6265 (OKP-850)	AL-6263 (OKP4HT)	-
	POLYCARB	0	1,11	M-FD80	AL-6261 (OKP4)	M-FCD1	-
		0,9	1,10	M-FCD1	AL-6265 (OKP-850)	AL-6263 (OKP4HT)	-
		0,8	1,04	AL-6263 (OKP4HT)		M-FCD1	-
		0,5	1,09	POLYSTYR	M-FCD500	-	-
		-	-	-	-	-	-

Представленные в табл. 1 и 2 варианты компоновки отличаются материалом и нормированной оптической силой СПЛ. КХ модельного объектива-апохромата в табл. 1 состоит из трёх РЛ или из двух РЛ и ДЛ, а КХ модельного объектива-суперахромата в табл. 2 – из четырёх РЛ или из трёх РЛ и ДЛ. Обе таблицы показывают, каков будет в самом лучшем случае максимальный модуль нормированной оптической силы линз КХ  $|\phi|_{\max}$ , если корректор должен будет осуществлять апохроматизацию или суперахроматизацию объектива, силовой компонент которого по своим хроматическим свойствам эквивалентен одиночной линзе, выполненной из кроноподобной (PMMA) или флинтоподобной (POLYCARB) пластмассы. Выбор пластмасс PMMA и POLYCARB связан с тем, что их коэффициенты дисперсии позволяют

перекрыть весьма широкий диапазон остаточного хроматизма реальных объективов, линзы которых выполнены из материалов, допускающих прецизионное прессование.

На рис. 1 и 2 в качестве примеров приведены оптические схемы модельных объектива-апохромата и суперахромата, причём бесконечно тонкие воздушные промежутки между элементами для наглядности показаны имеющими конечную толщину.

В табл. 3 представлены основные оптические характеристики материалов РЛ, приведённых в табл. 1 и 2. При этом коэффициент дисперсии  $\nu_R$  получен по формуле (4) для рассматриваемого в данной статье расширенного спектрального диапазона, включающего видимое и ближнее ИК-излучение ( $\lambda_{\min} = 0,4$  мкм,  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм).

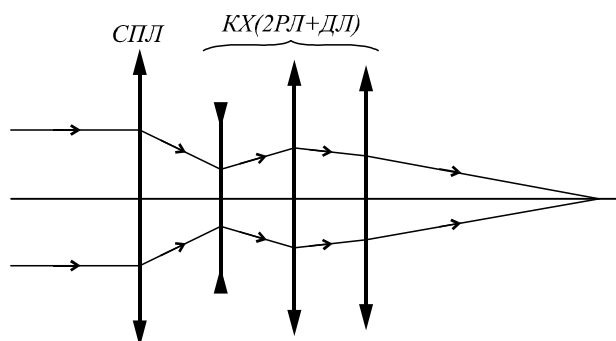


Рис. 1. Оптическая схема модельного объектива-апохромата, КХ которого состоит из двух РЛ и ДЛ, а СПЛ выполнена из PMMA и имеет нормированную оптическую силу, равную 0,90 (см. табл. 1). Нормированные оптические силы двух РЛ и ДЛ соответственно равны -0,32; 0,40; 0,01

Из табл. 1 нетрудно видеть, что при апохроматизации в зависимости от материала и оптической силы СПК замена одной РЛ на ДЛ позволяет уменьшить максимальную оптическую силу РЛ КХ в 1,2÷2,5 раза. При этом следует заметить, что оптическая сила ДЛ как минимум на порядок меньше оптической силы самой слабой РЛ КХ. В то же время табл. 2 показывает, что при суперхроматизации замена одной из четырёх РЛ КХ на ДЛ не приводит к сколь-нибудь ощутимому уменьшению максимальной оптической силы РЛ.

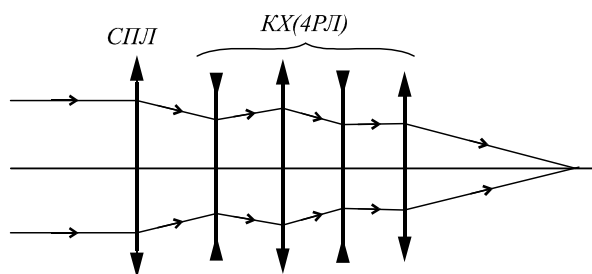


Рис. 2. Оптическая схема модельного объектива-суперхромата, КХ которого состоит из четырёх РЛ, а СПЛ выполнена из POLYCARB и имеет нормированную оптическую силу, равную 0,80 (см. табл. 2). Нормированные оптические силы четырёх РЛ соответственно равны -1,08; 1,07; -0,39; 0,60

**Заключение**

Результаты, представленные в настоящей статье, показывают, что если КХ состоит только из РЛ, выполненных из оптических материалов, допускающих прецизионное прессование, то максимальные оптические силы этих РЛ при апохроматизации и при суперхроматизации сопоставимы (при ахроматизации они в среднем на 20–25 % больше). В то же время максимальные оптические силы РЛ при суперхроматизации как минимум на 35–40 % меньше соответствующих оптических сил РЛ КХ, выполненных из традиционных оптических стекол, входящих в каталоги ведущих мировых производителей (см. табл. 2 работы [1]).

Табл. 3. Оптические характеристики материалов, входящих в табл. 1 и 2

Компонент	Марка оптического материала	Каталог	$n_{\lambda}$	$v_R$
СПЛ	PMMA	Misc	1,4893999	21,2899
	POLYCARB	Misc	1,5802963	10,5987
КХ	M-FCD1	Hoya Group	1,4953891	30,1383
	480R	Zeon	1,5227177	21,0343
	M-FCD500	Hoya Group	1,5511577	26,5512
	M-BACD12	Hoya Group	1,5803758	21,8943
	POLYSTYR	Misc	1,5853759	11,2193
	M-BACD5N	Hoya Group	1,5864168	22,4933
	M-PCD51	Hoya Group	1,5895242	24,7170
	AL-6261 (ОКР4)	Fiber Optic Center	1,6012884	9,5576
	M-BACD15	Hoya Group	1,6196105	21,3693
	AL-6263 (ОКР4НТ)	Fiber Optic Center	1,6250213	8,3797
	AL-6265 (ОКР-850)	Fiber Optic Center	1,6433915	7,5437
	M-FD80	Hoya Group	1,6830174	11,0616
	M-TAF1	Hoya Group	1,7681758	19,5309
	M-FDS910	Hoya Group	1,8121523	8,4189
	M-TAFD307	Hoya Group	1,8755809	13,5331
	M-FDS1	Hoya Group	1,9113227	7,2270
M-FDS2	Hoya Group	1,9883254	6,6445	

**Благодарность**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Пензенскому государственному университету архитектуры и строительства.

**Литература**

1. Грейсух, Г.И. Моделирование и исследование суперхроматизации рефракционных и рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, А.В. Калашников, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т.36 (3). – С. 395-404.

2. Дамбон, О. Прецизионное прессование стекла – высокоточные оптические компоненты со сложной геометрией [Электронный ресурс] / О. Дамбон, Ю. Дуквен. – URL: [http://www.photonics.su/files/article\\_pdf/3/article\\_307\\_0\\_985.pdf](http://www.photonics.su/files/article_pdf/3/article_307_0_985.pdf) (дата обращения 12.05.2015).
3. Optical Materials for Precision Molding [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.us.schott.com/advanced\\_optics/english/download/schott-optical-materials-for-precision-molding-january-2014-us.pdf](http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/schott-optical-materials-for-precision-molding-january-2014-us.pdf) (дата обращения 12.05.2015).
4. Hoya Group Optics Division. [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/all\\_products.html](http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/all_products.html) (дата обращения 06.05.2015).
5. Бронштейн, И.Г. Выбор оптической схемы и расчет малогабаритных объективов для мобильных телефонов / И.Г. Бронштейн, В.А. Зверев, И.Л. Лившиц, К. Young-Gi, К. Tae-Young, J. Phil-Ho // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 5. – С. 25-31. – ISSN 0030-4042.
6. Hiroses, M. Image pickup optical system / M. Hiroses // Patent No.US7,551,373B2 of June 23, 2009.
7. Грейсух, Г.И. Пластмассово-линзовый объектив апохромат / Г.И. Грейсух, С.А. Степанов, Е.Г. Ежов, О.А. Захаров, И.А. Левин // Патент РФ на изобретение №2464600C2 от 20.10.2012.
8. Ohtsu, T. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same / T. Ohtsu // Patent No.US8,508,836B2 of August 13, 2013.
9. Iwamoto, S. Optical system and image pickup apparatus including the same / S. Iwamoto // Patent No.US8,854,747B2 of October 7, 2014.
10. Ohtsu, T. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same / T. Ohtsu // Patent No.US8,964,095B2 of February. 24, 2015.
11. Uchida, Y. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same / Y. Uchida, S. Oki // Patent No.8,964,309B2 of February 24, 2015.
12. Otsu, T. Image forming optical system, image pickup apparatus using the same, and information processing apparatus / T. Ohtsu // Patent No.US2015/0062403A1 of March. 5, 2015.
13. Herzberger, M. Color correction in optical systems and a new dispersion formula / M. Herzberger // Optica Acta. – 1959. – Vol. 6 (3). – P. 197-215.
14. Слюсарев, Г.Г. Расчёт оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 640 с.
15. 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 (24). – P. 6137-6141.
16. Грейсух, Г.И. Дифракционно-рефракционный корректор третичного спектра / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77 (9). – С. 22-29. – ISSN 0030-4042.
17. Грейсух, Г.И. Расчёт пластмассово-линзовых микрообъективов суперахроматов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т.35 (4). – С. 473-479. – ISSN 0134-2452.
18. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zemax.com> (дата обращения 12.04.2015).
19. Angstrom Link. Optical Polymers. [Электронный ресурс]. – URL: <http://focenter.com/wp-content/uploads/2015/05/AngstromLink-AL-6261-6263-6264-6265.pdf> (дата обращения 10.05.2015).

### References

- [1] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Modeling and investigation superachromatization refractive and refractive-diffractive optical systems [In Russian]. Computer Optics 2012; 36(3): 395-404.
- [2] Dambon O, Dookven Yu, Precision molding glass is high-precision optical components with complex geometry. Source: [http://www.photonics.su/files/article\\_pdf/3/article\\_3070\\_985.pdf](http://www.photonics.su/files/article_pdf/3/article_3070_985.pdf).
- [3] Optical Materials for Precision Molding. Source: [http://www.us.schott.com/advanced\\_optics/english/download/schott-optical-materials-for-precision-molding-january-2014-us.pdf](http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/schott-optical-materials-for-precision-molding-january-2014-us.pdf).
- [4] Hoya Group Optics Division. Source: [http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/all\\_products.html](http://www.hoya-opticalworld.com/english/products/all_products.html).
- [5] Bronshtein I. G., Zverev V. A., Livshits I. L., Kim Young-Gi, Kim Tae-Young, and Jung Phil-Ho Choosing an optical setup and designing compact objectives for mobile telephones. Journal of Optical Technology 2009; 76(5): 268-73. DOI: 10.1364/JOT.76.000268.
- [6] Hiroses M. Image pickup optical system. Pat No.US7,551,373 B2 of June 23, 2009.
- [7] Greisukh GI, Stepanov SA, Ezhov EG, Zaharov OA, Levin IA, Plastic-lens objective apochromat [In Russian]. Pat RF of Invent N2464600C2 of October 20, 2012.
- [8] Ohtsu T. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same. Pat No.US8,508,836B2 of August 13, 2013.
- [9] Iwamoto S. Optical system and image pickup apparatus including the same. Pat No.US8,854,747 B2 of October 7, 2014.
- [10] Ohtsu T. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same. Pat No.US8,964,095B2 of February 24, 2015.
- [11] Uchida Y, Oki S. Image pickup optical system and image pickup apparatus using the same. Pat No.US8,964,309B2 of February. 24, 2015.
- [12] Otsu T. Image forming optical system, image pickup apparatus using the same, and information processing apparatus. Pat No.US2015/0062403A1 of March. 5, 2015.
- [13] Herzberger M. Color correction in optical systems and a new dispersion formula. Optica Acta 1959; 6(3): 197-215.
- [14] Slusarev GG. Methods of calculating optical systems [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1969.
- [15] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems. Applied Optics 2006; 45(24): 6137-41. DOI: 10.1364/AO.45.006137
- [16] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Diffraction-refraction corrector of the tertiary spectrum. Journal of Optical Technology 2010; 77(9): 542-7. DOI: 10.1364/JOT.77.000542
- [17] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of plastic-lens micro-objectives superachromats [In Russian]. Computer Optics 2011; 35 (4): 473-79.
- [18] ZEMAX: software for optical system design. Source: <http://www.radiantzemax.com>.
- [19] Angstrom Link. Optical Polymers. Source: <http://focenter.com/wp-content/uploads/2015/05/AngstromLink-AL-6261-6263-6264-6265.pdf> ).

**MODELING AND INVESTIGATION OF COLOR CORRECTION IN OPTICAL SYSTEMS WITH CONSTITUENT ELEMENTS SYNTHESIZED BY PRECISION MOLDING**

*G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov  
Penza State University of Architecture and Construction*

**Abstract**

Color correction in optical systems with constituent elements synthesized by precision molding is investigated. Advantages associated with the use of the technique are demonstrated.

**Keywords:** Color corrector, refractive lens, diffractive lens, precision glass molding, apochromatic correction, superachromatic correction.

**Citation:** Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Modelling and investigation of color correction in optical systems with constituent elements synthesized by precision molding. *Computer Optics* 2015; 39 (4): 529-35. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-529-535.

**Acknowledgements:** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of government orders to Higher Education Institutions in Scientific Research.

**Сведения об авторах**

**Грейсук 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. Грейсук – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 130 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Grigoriy Isaevich Greisukh** (b. 1943) graduated (1965) from Penza Polytechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian higher school. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of 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 130 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions.

**Ежов Евгений Григорьевич**, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 год), доцент. 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 50 статей и учебник.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Eugeniy Grigorievich Ezhov** (b. 1977) graduated (1981) from Penza State University, majoring in Radio Engineering. He received his Doctor in Physics & Maths (2008) degrees from Samara State Aerospace University. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is co-author over 50 scientific papers and tutorial.

**Казин Сергей Владимирович**, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат физико-математических наук (2012 год). Научный сотрудник кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ С.В. Казина 12 публикаций.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Sergey Vladimirovich Kazin** (b. 1988) graduated (2010) from Penza State University of Architecture and Construction, majoring in Information Systems and Technologies. He received his Candidate in Physics & Maths (2012) degrees from Samara State Aerospace University. He is researcher of the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 12 publications.

**Степанов Сергей Алексеевич**, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне Самарский государственный университет) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (1999 г.), профессор (2001 г.), работает профессором кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического

общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. С.А. Степанов – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова более 80 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств.

E-mail: [asut@pguas.ru](mailto:asut@pguas.ru) .

**Sergei Alekseevich Stepanov** (b. 1951) graduated (1974) from Kuibyshev State University (presently, Samara State University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara State Aerospace University, professor (2001). He is professor in the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. He is a 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 more 80 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

---

*Поступила в редакцию 14 августа 2015 г.  
Окончательный вариант – 10 сентября 2015 г.*