

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРАХРОМАТИЗАЦИИ РЕФРАКЦИОННЫХ И РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Грейсх Г.И., Ежов Е.Г., Левин И.А., Калашников А.В., Степанов С.А.
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Аннотация

Предложена модель объектива-суперахромата, состоящая из бесконечно тонких корректора хроматизма и силовой положительной линзы. С использованием этой модели исследовано влияние материалов линз корректора на максимальную по модулю оптическую силу его рефракционных линз. Исследование охватывало свыше тысячи наименований марок стекла и оптических пластмасс, что позволило достоверно оценить возможности рефракционного и рефракционно-дифракционного корректора хроматизма и прогнозировать целесообразность использования корректора того или иного типа.

Ключевые слова: оптическая система, объектив, хроматизм, суперахроматизация, рефракционная линза, дифракционная линза, корректор хроматизма, оптические материалы.

Введение

Одним из условий формирования высококачественного изображения оптической системой, работающей с полихроматическим излучением, является минимизация хроматизма положения на всех длинах волн в пределах заданного спектрального диапазона. При этом под хроматизмом положения понимают зависимость заднего отрезка оптической системы от длины волны. Высокая степень минимизации хроматизма положения обеспечивается, в частности, при суперахроматизации, обеспечивающей равенство задних отрезков оптической системы на четырёх длинах волн заданного спектрального диапазона ($s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\lambda_1} = s'_{\lambda_2} = s'_{\lambda_{\max}}$) [1]. Длины волн λ_1 и λ_2 разбивают заданный спектральный диапазон от λ_{\min} до λ_{\max} , как правило, на три примерно равных интервала.

Суперахроматизация достигается благодаря включению в оптическую систему нескольких линз, выполненных из оптических материалов с существенно отличающимися дисперсионными свойствами [2, 3]. Сегодня ассортимент оптических материалов, которые могут быть использованы для этого, включает свыше тысячи различных стекол и пластмасс. Они представлены несколькими десятками каталогов различных производителей.

Группу линз оптической системы, осуществляющую коррекцию хроматизма, ниже будем называть корректором хроматизма (КХ). Поскольку через КХ проходит всё излучение, участвующее в формировании изображения, то малыми радиусами кривизны поверхностей своих линз он может ограничивать световой диаметр оптической системы и к тому же вносить нежелательные монохроматические аберрации. Очевидно, что чем больше (по модулю) радиусы кривизны поверхностей, а значит, и меньше оптические силы линз КХ по отношению к оптической силе системы в целом, тем больше возможностей для увеличения апертуры системы и поля её высококачественного изображения. В связи с этим настоящая статья посвящена анализу влияния схемы КХ и комбинации оптических материалов

его линз на оптическую силу того элемента КХ, у которого она по модулю максимальна $|\phi|_{\max}$. Что касается компоновки схемы КХ, то рассматривается как чисто рефракционная, так и рефракционно-дифракционная схема. В последнем случае КХ помимо рефракционных линз (РЛ) включает одну дифракционную линзу (ДЛ) [3–6].

1. Модель суперахроматизируемой оптической системы

Заявленное исследование влияния комбинации оптических материалов с охватом свыше тысячи наименований марок стекла и оптических пластмасс, выполненное на базе реальной схемы какой-то оптической системы, например объектива, потребовало бы значительных затрат компьютерного времени. Полученные же при этом результаты не позволили бы сформулировать сколь-нибудь общие рекомендации по выбору оптимальной схемы и оптических материалов для КХ. Преодолеть оба этих недостатка позволяет модель оптической системы, представляющая собой бесконечно тонкий объектив, состоящий из КХ и силовой положительной линзы (СПЛ).

Опыт коррекции хроматизма реальных оптических систем, состоящих из стеклянных или пластмассовых РЛ, с использованием методик, предполагающих замену одной из РЛ системы КХ показал, что хроматизм остающейся (незаменимой) части системы сопоставим с хроматизмом одиночной РЛ, имеющей такую же оптическую силу, как и у незаменимой части системы. Более того, этот хроматизм имеет, как правило, промежуточную величину между хроматизмом одиночной РЛ, выполненной из крона (крупноподобной пластмассы), и хроматизмом одиночной РЛ, выполненной из флинта (флинтоподобной пластмассы) [5–8]. Поэтому, выбирая для модели СПЛ какой-то крон (крупноподобную 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 диапа-

зон возможных ситуаций, характерных для схемных решений реальных объективов.

Полагая, что оптическая сила введённой выше модели объектива на центральной длине волны $\bar{\lambda}$ заданного спектрального диапазона должна быть равна единице, условие её суперахроматизации можно записать в виде системы четырёх уравнений [6]

$$\left. \begin{aligned} \phi_{PL} + \sum_{i=1}^I \phi_i &= 1 \\ \frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} + \sum_{i=1}^I \frac{\phi_i}{v_i} &= 0 \\ \frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \gamma_{1PL} + \sum_{i=1}^I \gamma_{1i} \frac{\phi_i}{v_i} &= 0 \\ \frac{\phi_{PL}}{v_{PL}} \gamma_{2PL} + \sum_{i=1}^I \gamma_{2i} \frac{\phi_i}{v_i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь ϕ_{PL} и ϕ_i – оптические силы СПЛ и линз КХ на длине волны $\bar{\lambda}$; I – количество линз в КХ.

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

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

$$\gamma_1 = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_{\max}}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (3)$$

$$\gamma_2 = (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_2}) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}). \quad (4)$$

Эти же константы, но для ДЛ вычисляются по формулам

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

$$\gamma_1 = (\lambda_1 - \lambda_{\max}) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}), \quad (6)$$

$$\gamma_2 = (\lambda_{\min} - \lambda_2) / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}). \quad (7)$$

Выбранные длины волн заданного спектрального диапазона удовлетворяют условию $\lambda_{\min} < \lambda_1 < \bar{\lambda} < \lambda_2 < \lambda_{\max}$.

Система уравнений (1) является линейной относительно оптических сил элементов КХ и число неизвестных равно числу уравнений, если КХ состоит из четырёх РЛ или из трёх РЛ и одной ДЛ. Как показали исследования, если $0 \leq \phi_{PL} \leq 0,9$, то рассматриваемая система имеет решения для весьма широкого ряда комбинаций оптических материалов РЛ. Это обстоятельство и позволяет осуществлять отбор комбинаций, одновременно удовлетворяющих нескольким, имеющим принципиальное значение требованиям.

2. Условия и результаты исследований

Практика расчёта высокоразрешающих оптических систем показывает, что суперахроматическая

коррекция необходима тогда, когда спектральный диапазон полихроматического излучения, на которое рассчитывается оптическая система, достаточно широк [$\lambda_{\max} \geq (2 \dots 3)\lambda_{\min}$]. В частности, такая коррекция может быть необходимой для объективов цифровых фотоаппаратов или видеокамер наблюдения, работающих в режиме день/ночь, т.е. в спектральном диапазоне, охватывающем видимое и ближнее инфракрасное излучение ($\lambda_{\min} = 0,4$ мкм, $\lambda_{\max} = 0,9$ мкм). Именно в этом спектральном диапазоне проводились исследования, результаты которых представлены ниже. Оптические материалы для СПЛ и линз КХ выбирались из каталогов основных мировых производителей (Archer, Arton, Cdgm, Corning, GOST, Hikari, Hoya, Lightpath, Lzos, Misc, Ohara, Pilkington, Rpo, Sumita, Zeon), включённых, например, в базу данных Glasscat компьютерной программы оптического проектирования Zemax [9]. Выбирались только доступные стёкла и пластмассы, т.е. находящиеся в свободной продаже (далее они будут маркироваться буквой Д) и имеющие гарантированное пропускание в отмеченном выше спектральном диапазоне (их маркировка – буква П).

В табл. 1 представлены оптимальные комбинации ДП «нормальных» стёкол четырёх РЛ, составляющих КХ для семи вариантов компоновки модельного объектива-суперахромата. Эти варианты отличаются материалом и оптической силой СПЛ. В результате табл. 1 показывает, каков будет в самом лучшем случае максимальный модуль оптической силы линз КХ, если корректор должен будет осуществлять суперахроматизацию объектива, силовой компонент которого по своим хроматическим свойствам эквивалентен одиночной линзе, выполненной из «нормального» крона (BK7) или тяжёлого флинта (SF59). Здесь напомним, что «нормальными» считаются стёкла, у которых 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 ($\lambda_F = 0,48613$ мкм), от «нормальной прямой» не превышает 0,005 [10]. Выбор стёкол BK7 и SF59 связан с тем, что их коэффициенты дисперсии позволяют, как было отмечено выше, перекрыть весьма широкий диапазон остаточного хроматизма реальных объективов.

Табл. 2 аналогична по форме табл. 1, но оптимальные комбинации стёкол четырёх РЛ, составляющих КХ, компоновались не только из «нормальных» стёкол, но и из стёкол всех марок, входящих в группу ДП. Табл. 3 аналогична по форме табл. 2, но в ней оптические материалы четырёх РЛ, составляющих КХ, расширены за счёт пластмасс всех марок, входящих в группу ДП.

Сопоставляя данные табл. 1–3, легко увидеть, что максимальный модуль оптической силы линз

КХ $|\phi|_{\max}$ заметно убывает со снятием ограничений и расширением круга оптических материалов, из которых набирались оптимальные комбинации \square Атериалов четырёх РЛ, составляющих КХ.

В табл. 4–6 представлены оптимальные комбинации материалов трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ, для семи вариантов компоновки модельного объектива-суперахромата. Сразу же заметим, что максимальный модуль оптической силы линз КХ $|\phi|_{\max}$ является модулем оптической силы одной из РЛ, т.к. модуль оптической силы ДЛ всегда меньше. При переходе от табл. 4 к табл. 5 и 6, так же как

и в случае табл. 1, 2 и 3, снималось одно ограничение на круг оптических материалов, из которых набирались оптимальные комбинации.

Данные табл. 4–6 показывают, что в случае рефракционно-дифракционного КХ, так же как и в случае чисто рефракционного корректора, максимальный модуль оптической силы РЛ $|\phi|_{\max}$ заметно убывает со снятием ограничений и расширением круга оптических материалов, из которых набирались оптимальные комбинации материалов трёх РЛ, составляющих КХ.

Таблица 1. Оптимальные комбинации ДП «нормальных» стёкол четырёх РЛ, составляющих КХ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка стекла РЛ КХ с порядковым номером				$ \phi _{\max}$
	1	2	3	4	
БК7, $\phi_p=0,9$	L-LAM69M	C3	EDF673322A	S-LAH60M	4,20
БК7, $\phi_p=0,8$	L-LAM69M	C3	EDF673322A	S-LAH60M	4,29
БК7, $\phi_p=0,5$	A63-65	E65-40	E-ADF50	EDF673322A	4,54
$\phi_p=0$	S-FSL5M	E65-40	E-ADF50	EDF673322A	4,60
SF59, $\phi_p=0,9$	S-FSL5M	ECO550	E-ADF50	S-LAH60M	2,90
SF59, $\phi_p=0,8$	BAF11	S-FSL5M	E-ADF50	S-NBH52	2,88
SF59, $\phi_p=0,5$	E-FEL1	ECO550	E-ADF50	S-LAH60M	3,66

Таблица 2. Оптимальные комбинации ДП стёкол четырёх РЛ, составляющих КХ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка стекла РЛ КХ с порядковым номером				$ \phi _{\max}$
	1	2	3	4	
БК7, $\phi_p=0,9$	A87-84	LZ_BF21	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	1,30
БК7, $\phi_p=0,8$	A87-84	LZ_BF21	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	1,36
БК7, $\phi_p=0,5$	A87-84	LZ_BF21	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	1,54
$\phi_p=0$	A87-84	LZ_BF21	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	1,58
SF59, $\phi_p=0,9$	A87-84	UVIR	ADF50	LZ_TF10	1,24
SF59, $\phi_p=0,8$	A87-84	UVIR	C97-36	LZ_TF7	1,25
SF59, $\phi_p=0,5$	A87-84	B29-77	ADF50	LZ_TF1	1,31

Таблица 3. Оптимальные комбинации ДП стёкол и пластмасс четырёх РЛ, составляющих КХ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка оптического материала РЛ КХ с порядковым номером				$ \phi _{\max}$
	1	2	3	4	
БК7, $\phi_p=0,9$	DX4900	A87-84	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	0,66
БК7, $\phi_p=0,8$	DX4900	A87-84	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	0,74
БК7, $\phi_p=0,5$	DX4900	A87-84	E-FDS1_MOLD	S-NPH1_MOLD	1,00
$\phi_p=0$	A87-84	ACRYLIC	LDF728285A	FDS1	0,92
SF59, $\phi_p=0,9$	A87-84	UVIR	ADF50	LZ_TF10	1,24
SF59, $\phi_p=0,8$	A87-84	UVIR	C97-36	LZ_TF7	1,25
SF59, $\phi_p=0,5$	A87-84	B29-77	ADF50	LZ_TF1	1,31

В табл. 7 для стёкол всех марок табл. 1–6 приведены значения параметра, характеризующего отступление от «нормальной» прямой, $\Delta\gamma_{GF}$, показателя преломления n_d и коэффициента дисперсии

v . При этом значения $\Delta\gamma_{GF}$ и измеренные на центральной длине волны видимого диапазона, в качестве которой принята жёлтая d-линия гелия ($\bar{\lambda} = \lambda_d = 0,58756$ мкм), значения n_d взяты из соот-

ветствующих каталогов оптического стекла. Коэффициент же дисперсии вычислялся по формуле (2) с использованием значений показателя преломле-

ния на длинах волн $\bar{\lambda} = \lambda_d$, $\lambda_{\min} = 0,4$ мкм и $\lambda_{\max} = 0,9$ мкм.

Таблица 4. Оптимальные комбинации ДП «нормальных» стёкол трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка стекла РЛ КХ с порядковым номером			$ \phi _{\max}$
	1	2	3	
БК7, $\phi_p = 0,9$	S-FSL5M	LZ_BF21	LZ_TF4	0,73
БК7, $\phi_p = 0,8$	S-FSL5M	LZ_BF21	LZ_TF4	0,73
БК7, $\phi_p = 0,5$	S-FSL5M	LZ_BF21	D28-28	0,75
$\phi_p = 0$	S-FSL5M	LZ_BF21	D28-28	1,22
SF59, $\phi_p = 0,9$	S-FSL5M	LZ_TK23	LZ_TF4	2,00
SF59, $\phi_p = 0,8$	S-FSL5M	A88-66	LZ_TF4	1,85
SF59, $\phi_p = 0,$	S-FSL5M	A88-66	EDF689312A	1,63

Таблица 5. Оптимальные комбинации ДП стёкол трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка стекла РЛ КХ с порядковым номером			$ \phi _{\max}$
	1	2	3	
БК7, $\phi_p = 0,9$	A87-84	LZ_BF21	SF57_MOLD	0,57
БК7, $\phi_p = 0,8$	A87-84	LZ_BF21	SF57_MOLD	0,56
БК7, $\phi_p = 0,5$	A87-84	LZ_BF21	SF57_MOLD	0,53
$\phi_p = 0$	FC5	LZ_BF21	S-NPH1_MOLD	0,81
SF59, $\phi_p = 0,9$	A87-84	LZ_BF21	SF57_MOLD	1,48
SF59, $\phi_p = 0,8$	A87-84	LZ_BF21	SF57_MOLD	1,39
SF59, $\phi_p = 0,5$	A87-84	LZ_BF21	FDS90	1,14

Таблица 6. Оптимальные комбинации ДП стёкол и пластмасс трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ

Марка стекла СПЛ и её оптическая сила	Марка оптического материала РЛ КХ с порядковым номером			$ \phi _{\max}$
	1	2	3	
БК7, $\phi_p = 0,9$	E65-40	DX4900	H-ZF62	0,12
БК7, $\phi_p = 0,8$	D4531F	DX4900	FDS1	0,08
БК7, $\phi_p = 0,5$	S-LAL13M	F5023	H-ZF62	0,22
$\phi_p = 0$	F5023	E65-40	FDS1	0,62
SF59, $\phi_p = 0,9$	E65-40	DX4900	E-FDS1_MOLD	0,42
SF59, $\phi_p = 0,8$	E65-40	DX4900	H-ZF62	0,37
SF59, $\phi_p = 0,5$	DX4900	F5023	FDS1	0,25

Данные табл. 1 – 7 наглядно демонстрируют, как трансформируются оптимальные комбинации оптических материалов РЛ КХ в зависимости от соотношения оптических сил СПЛ и КХ, а также от величины хроматизма, который и призван компенсировать корректор. Сопоставить же возможности рефракционного и рефракционно-дифракционного КХ, исходя из значений максимального модуля оптической силы его линз $|\phi|_{\max}$, позволяет табл. 8, из которой следует:

1. Решения, предполагающие компоновку рефракционного КХ только из «нормальных» стёкол, практического значения не имеют, т.к. чрезмерно

большие оптические силы РЛ и соответствующие им малые радиусы преломляющих поверхностей не позволят получить сколь-нибудь значимые световые диаметры оптической системы.

2. Включение ДЛ в КХ, компоновку РЛ, выполненными только из «нормальных» стёкол, позволяет до 4 раз уменьшить модули оптических сил РЛ и, примерно, во столько же раз увеличить радиусы преломляющих поверхностей РЛ, что делает такое решение вполне практически значимым.

3. Расширение круга оптических материалов, из которых набираются оптимальные комбинации материалов РЛ рефракционного КХ, позволяет в 3 и более раз уменьшить оптические силы РЛ, при

этом наиболее резкое сокращение оптических сил достигается в случае, когда оптическое стекло в одной из крон-флинтových пар КХ замещается оптической пластмассой.

4. Включение ДЛ в КХ, оптимальные комбинации трёх РЛ которого набираются из широкого

круга коммерчески доступных и прозрачных в требуемом диапазоне стёкол и пластмасс, позволяет дополнительно в 2–8 раз уменьшить оптические силы РЛ и, примерно, во столько же раз увеличить радиусы преломляющих поверхностей.

Таблица 7. Константы оптических материалов всех марок, входящих в табл. 1–6

Компонент	Марка стекла	Каталог	n_d	ν	$\Delta\gamma_{gF}$
СПЛ	BK7	Schott	1,516800	23,65	-0,000900
	SF59	Schott	1,952497	7,21	0,021700
КХ	L-LAM69M	Archer	1,727801	14,77	-0,003100
	C3	Hoya	1,518234	21,78	0,003500
	EDF673322A	Pilkington	1,672703	11,74	0,002100
	S-LAH60M	Archer	1,828944	13,54	-0,003700
	A63-65	Corning	1,464501	24,24	0,002400
	E65-40	Corning	1,865000	14,75	-0,005000
	E-ADF50	Hoya	1,654120	14,37	-0,003300
	S-FSL5M	Archer	1,484524	25,82	0,002200
	ECO550	Lightpath	1,605503	18,56	0,0027
	BAF11	Hoya	1,666720	17,81	0,002100
	S-NBH52	Ohara	1,672999	13,93	-0,0043
	E-FEL1	Hoya	1,54814	16,69	0,0041
	A87-84	Corning	1,486561	31,39	0,032400
	LZ_BF21	Lzos	1,614225	14,39	-0,000100
	E-FDS1_MOLD	Rpo	1,912658	7,21	0,028200
	S-NPH1_MOLD	Rpo	1,797892	7,89	0,026100
	UVIR	Irphotonics	1,499256	28,69	0,020000
	ADF50	Hoya	1,654118	14,45	-0,00710
	LZ_TF10	Lzos	1,806276	9,12	0,007500
	C97-36	Corning	1,695989	13,29	-0,00510
	LZ_TF7	Lzos	1,728221	10,23	0,003900
	B29-77	Corning	1,528554	28,62	0,023600
	LZ_TF1	Lzos	1,647660	12,32	0,000600
	DX4900	Arton	1,530803	6,33	□
	ACRYLIC	Misc	1,491668	21,15	□
	S-FSL5M	Archer	1,484524	25,82	0,002200
	LZ_TF4	Lzos	1,740025	10,16	0,004400
	D28-28	Corning	1,728304	10,23	0,005000
	LZ_TK23	Lzos	1,589173	22,74	-0,001400
	A88-66	Corning	1,487502	24,20	0,001000
	EDF689312A	Pilkington	1,688929	11,31	0,001500
	SF57_MOLD	Rpo	1,844570	8,50	0,012300
FC5	Hoya	1,487489	25,91	0,009100	
FDS90	Hoya	1,846663	8,45	0,013600	
H-ZF62	Cdgm	1,922864	7,28	0,030200	
D4531F	Arton	1,514872	7,34	□	
FDS1	Hoya	1,922859	7,40	0,017400	
S-LAL13M	Archer	1,689007	19,57	-0,008100	
F5023	Arton	1,512262	7,73	□	

Учитывая наметившуюся в последние годы тенденцию создания массовых чисто пластмассово-линзовых объективов для мобильных телефонов, видеокамер наблюдения и др., было отдельно проведено исследование влияния комбинации оптических материалов при суперахроматизации таких

рефракционных и рефракционно-дифракционных объективов. При этом СПЛ объектива предполагалась выполненной из наиболее технологичных и обладающих наилучшими эксплуатационными качествами оптических пластмасс: полиметилметакрилата (PMMA) или поликарбоната (POLYCARB).

Оптимальные комбинации материалов РЛ, входящих в состав КХ, набирались либо из пяти наиболее технологичных пластмасс каталога Misc, либо

из коммерчески доступных и прозрачных в выбранном диапазоне пластмасс всех каталогов.

Таблица 8. Значения максимального модуля оптической силы линз рефракционного и рефракционно-дифракционного КХ

Тип КХ	Марка стекла СПЛ	Оптическая сила СПЛ	Значение $ \phi _{\max}$ для набора РЛ, выполненных из			
			ДП «нормального» стекла	ДП стекла	ДП стекла и пластмассы	
4РЛ	BK7	0,9	4,20	1,30	0,66	
		0,8	4,29	1,36	0,74	
		0,5	4,54	1,54	1,00	
	□	0	4,60	1,58	0,97	
		SF59	0,9	2,90	1,24	1,24
			0,8	2,88	1,25	1,25
0,5	3,66		1,31	1,31		
3РЛ+ДЛ	BK7	0,9	0,73	0,57	0,12	
		0,8	0,73	0,56	0,08	
		0,5	0,75	0,53	0,22	
	□	0	1,22	0,81	0,62	
		SF59	0,9	2,00	1,48	0,42
			0,8	1,85	1,39	0,37
0,5	1,63		1,14	0,25		

Исследования показали, что если оптимальные комбинации материалов РЛ рефракционного КХ набираются из пяти наиболее технологичных пластмасс каталога Misc (ACRYLIC, СОС, POLYCARB, PMMA, POLYSTYR), то независимо от материала и

оптической силы СПЛ величина $|\phi|_{\max} \approx 5,4$. Результаты, полученные при наборе комбинаций пластмасс из всех каталогов, представлены в табл. 9.

Таблица 9. Оптимальные комбинации ДП пластмасс четырёх РЛ, составляющих КХ

Марка пластмассы СПЛ и её оптическая сила	Марка пластмассы РЛ КХ с порядковым номером				$ \phi _{\max}$
	1	2	3	4	
PMMA, $\phi_p=0,9$	СОС	POLYCARB	D4532	DX4900	1,08
PMMA, $\phi_p=0,8$	СОС	POLYCARB	F5023	DX4900	1,14
PMMA, $\phi_p=0,5$	СОС	POLYCARB	F5023	DX4900	1,44
$\phi_p=0$	СОС	POLYCARB	F5023	DX4900	1,94
POLYCARB, $\phi_p=0,9$	СОС	POLYCARB	D4532	DX4900	1,97
POLYCARB, $\phi_p=0,8$	СОС	POLYCARB	F5023	DX4900	1,94
POLYCARB, $\phi_p=0,5$	СОС	POLYCARB	F5023	DX4900	1,94

В табл. 10 и 11 представлены оптимальные комбинации материалов трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ, для семи вариантов компоновки модельного объектива-суперахромата. При этом оптимальные комбинации материалов трёх РЛ табл. 10 набирались из пяти наиболее технологичных пластмасс каталога Misc, а табл. 11 – из коммерчески доступных и прозрачных в выбранном спектральном диапазоне пластмасс всех каталогов.

В табл. 12 приведены значения показателя преломления n_d и коэффициента дисперсии ν . При этом, как и в табл. 7, коэффициент дисперсии ν соответствует спектральному диапазону, ограниченному длинами волн $\lambda_{\min} = 0,4$ мкм и $\lambda_{\max} = 0,9$ мкм.

Данные табл. 9–12, так же как и табл. 1–7, наглядно демонстрируют, как трансформируются оптимальные комбинации оптических пластмасс РЛ КХ в зависимости от соотношения оптических сил СПЛ и КХ, а также от величины хроматизма, который и призван компенсировать корректор. Сопоставить же возможности рефракционного и рефракционно-дифракционного КХ бесконечно тонкого пластмассово-линзового суперахромата исходя из значений максимального модуля оптической силы его линз $|\phi|_{\max}$ позволяет табл. 13.

Данные табл. 13 показывают, что если бы все прозрачные в выбранном спектральном диапазоне пластмассы, представленные в каталогах мировых производителей, были технологичны и имели высокие эксплуатационные качества, то с точки зре-

ния суперахроматизации переход от чисто рефракционного к рефракционно-дифракционному КХ был бы вряд ли целесообразен. Однако в связи с тем, что сегодня вышперечисленным требованиям удовлетворяют не более пяти пластмасс каталога

Misc, то переход от чисто рефракционного к рефракционно-дифракционному КХ, несомненно, оправдан, поскольку обеспечивает уменьшение модулей оптических сил РЛ в 2,3 ... 2,8 раза.

Таблица 10. Оптимальные комбинации пластмасс трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ, набравшихся из пяти наиболее технологичных пластмасс каталога Misc

Марка пластмассы СПЛ и её оптическая сила	Марка оптической пластмассы РЛ КХ с порядковым номером			$ \phi _{\max}$
	1	2	3	
PMMA, $\phi_p=0,9$	POLYSTYR	COC	ACRYLIC	1.89
PMMA, $\phi_p=0,8$	POLYSTYR	COC	ACRYLIC	1.99
PMMA, $\phi_p=0,5$	POLYSTYR	COC	ACRYLIC	2.29
$\phi_p=0$	POLYSTYR	COC	POLYCARB	2.33
POLYCARB, $\phi_p=0,9$	POLYSTYR	COC	POLYCARB	2.30
POLYCARB, $\phi_p=0,8$	POLYSTYR	COC	POLYCARB	2.33
POLYCARB, $\phi_p=0,5$	POLYSTYR	COC	POLYCARB	2.33

Таблица 11. Оптимальные комбинации пластмасс трёх РЛ, входящих в КХ наряду с ДЛ, набравшихся из коммерчески доступных и прозрачных в выбранном спектральном диапазоне пластмасс всех каталогов

Марка пластмассы СПЛ и её оптическая сила	Марка оптической пластмассы РЛ КХ с порядковым номером			$ \phi _{\max}$
	1	2	3	
PMMA, $\phi_p=0,9$	POLYCARB	COC	DX4900	0,91
PMMA, $\phi_p=0,8$	POLYCARB	COC	DX4900	1,01
PMMA, $\phi_p=0,5$	POLYCARB	COC	DX4900	1,31
$\phi_p=0$	COC	DX4900	F5023	1,47
POLYCARB, $\phi_p=0,9$	POLYCARB	COC	DX4900	1,80
POLYCARB, $\phi_p=0,8$	POLYCARB	COC	DX4900	1,80
POLYCARB, $\phi_p=0,5$	POLYCARB	COC	DX4900	1,80

Таблица 12. Константы оптических пластмасс всех марок, входящих в табл. 9–11

Компонент	Марка оптической пластмассы	Каталог	n_d	ν
СПЛ	PMMA	Misc	1,491756	21.39
	POLYCARB	Misc	1,585470	10.69
КХ	ACRYLIC	Misc	1,491668	21.16
	COC	Misc	1,533732	21.49
	D4532	Arton	1,513792	7.32
	DX4900	Arton	1,530803	6.33
	F5023	Arton	1,512262	7.74
	POLYSTYR	Misc	1,590481	11.32

Заключение

Обобщая результаты, представленные в настоящей статье, можно констатировать, что модель объектива-суперахромата, состоящая из бесконечно тонких КХ и СПЛ, действительно позволяет произвести исчерпывающий анализ влияния на максимальную по модулю оптическую силу РЛ КХ материалов этих РЛ, с охватом свыше тысячи наименований марок стекла и оптических пластмасс. При этом данные таблиц наглядно демонстрируют, как трансформируются оптимальные комбинации оптических материалов РЛ КХ в зависимости от соотношения оптических сил СПЛ и КХ, а также от

величины хроматизма, который и призван компенсировать корректор. Эти данные также позволяют сопоставить возможности рефракционного и рефракционно-дифракционного КХ и прогнозировать целесообразность использования КХ того или иного типа.

Благодарности

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).

Таблица 13. Значения максимального модуля оптической силы линз рефракционного и рефракционно-дифракционного КХ модели пластмассово-линзового суперахромата

Тип КХ	Марка пластмассы СПЛ	Оптическая сила СПЛ	Значение $ \phi _{\max}$ для набора РЛ, выполненных из	
			пяти пластиков каталога Misc	пластиков всех каталогов
4РЛ	PMMA	0,9	5,37	1,08
		0,8	5,37	1,14
		0,5	5,37	1,44
		0	5,37	1,94
	POLYCARB	0,9	5,37	1,97
		0,8	5,37	1,94
		0,5	5,37	1,94
3РЛ+ДЛ	PMMA	0,9	1.89	0.91
		0,8	1.99	1.01
		0,5	2.29	1.31
		0	2.33	1.47
	POLYCARB	0,9	2.30	1.80
		0,8	2.33	1.80
		0,5	2.33	1.80

Литература

1. Herzberger, M. Color correction in optical systems and a new dispersion formula / M. Herzberger // *Optica Acta*. – 1959. – Vol. 6 (3). – P. 197-215.
2. Maxwell, J. Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // *International Lens Design Conference, SPIE*. – 1990, – Vol. 1354. – P. 408-411.
3. Stone, T. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // *Appl. Opt.* – 1988. – Vol. 27(4). – P. 2960-2971.
4. Грейсух, Г.И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2005. – № 28. – С. 60-65. – ISSN 0134-2452.
5. Greisukh, G.I. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Appl Opt.* – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137-6141.
6. 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.
7. Greisukh, G.I. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Appl Opt.* – 2010. – Vol. 49(23). – P. 4379-4384.
8. 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.
9. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zemax.com>.
10. Бегунов, Б.Н. Теория оптических систем / Б.Н. Бегунов, П. П. Заказов. – М.: Машиностроение, 1973. – 488 с.

References

1. Herzberger, M. Color correction in optical systems and a new dispersion formula / M. Herzberger // *Optica Acta*. – 1959. – Vol. 6 (3). – P. 197-215.
2. Maxwell, J. Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // *International Lens Design Conference, SPIE*. – 1990, – Vol. 1354. – P. 408-411.
3. Stone, T. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // *Appl. Opt.* – 1988. – Vol. 27(4). – P. 2960-2971.
4. Greisukh, G.I. Comparative analysis of the chromatic aberrations of the diffractive and refractive lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Computer optics*. – 2005. – N 28. – P. 60-65. – ISSN 0134-2452 – (in Russian).
5. Greisukh, G.I. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Appl Opt.* – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137-6141.
6. Greisukh, G.I. Diffraction-refraction corrector of the tertiary spectrum / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // *Journal of Optical Technology*. – 2010. – Vol. 77(9) – P. 542-547.
7. Greisukh, G.I. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Appl Opt.* – 2010. – Vol. 49(23). – P. 4379-4384.
8. Greisukh, G.I. Design of plastic-lens micro-objectives superachromats/ G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Computer optics*. – 2011. – V. 35, N 4. – P. 473-479. – ISSN 0134-2452 – (in Russian).
9. ZEMAX: software for optical system design [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zemax.com>.
10. Begunov, B.N. The theory of optical systems / B.N. Begunov, N.P. Zakaznov. – Moscow: “Mashinostroenie” Publisher, 1973. – 488 p. – (in Russian).

MODELING AND INVESTIGATION SUPERACHROMATOZATION REFRACTIVE AND REFRACTIVE-DIFFRACTIVE OPTICAL SYSTEMS

*G.I. Greysukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov
Penza State University of Architecture and Construction*

Abstract

A model of superachromatization objective consisting of infinitely thin chromatism corrector and the power of positive lenses. Using this model, studied the effect on the maximum absolute value of the optical power of refractive lenses of the corrector lens of his materials. The study covered more than a thousand names brands of optical glass and plastics, which allowed the possibility to reliably estimate the refractive and diffractive refractive corrector chromaticity and to predict the feasibility of using a corrector of some type.

Key words: optical system, objective, chromatic aberration, superachromatization, diffractive lens, refractive lens, chromatism corrector, optical materials.

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 Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Грейсух Г.И. – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха 135 статей, 3 монографии, 11 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: grey@pguas.ru .

Grigoriy Isaevich Greysukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical Institute, majoring in radio engineering. He is the deserved worker of the Russian higher school, Doctor of Technical Sciences (1990), professor, chief of the Physics Department of Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greysukh 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 135 scientific papers, 3 monographs and 11 inventions and patents.

Ежов Евгений Григорьевич, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 год). 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, учебник и 2 патента.

E-mail: grey@pguas.ru .

Eugeniy 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 co-author over 50 scientific papers, tutorial and 2 patents.



Левин Илья Анатольевич, 1987 года рождения. В 2009 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Физика». Аспирант кафедры физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ И.А. Левина 12 публикаций.

E-mail: grey@pguas.ru .

Ilya Anatolevich Levin (b. 1987). graduated (2009) from the Penza State University, majoring in Physics. He is postgraduate of the Physics Department of Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 12 publications.

Калашников Александр Валерьевич, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Аспирант кафедры физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ А.В. Калашникова 2 публикации.

E-mail: grey@pguas.ru .

Alexander Valeryevich Kalashnikov (b. 1988). graduated (2009) from the Penza State University of Architecture and Construction, majoring in information system and technology. He is postgraduate of the Physics Department of Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 2 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.). Работает профессором кафедры физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Степанов С.А. – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова 85 статей, 2 монографии, 7 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: grey@pguas.ru .

Sergei Alekseevich Stepanov (b. 1951) graduated (1974) from the Kuibyshev State University (presently, Samara State University), majoring in Physics. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (1999), professor of the Physics Department of Penza State University of Architecture and Construction. S. Stepanov 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 85 scientific papers, 2 monographs and 7 inventions and patents.

Поступила в редакцию 4 июня 2012 г.