

РАСЧЁТ ПЛАСТМАССОВО-ЛИНЗОВЫХ МИКРООБЪЕКТИВОВ СУПЕРАХРОМАТОВ

Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Левин И. А., Степанов С. А.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация

Известная методика суперхроматизации, предполагающая использование корректора, включающего дифракционную и две рефракционные линзы, развита и адаптирована применительно к пластмассово-линзовым оптическим системам. Эффективность методики продемонстрирована на примере расчёта микрообъектива камеры видеонаблюдения, работающей в режиме «день-ночь».

Ключевые слова: коррекция монохроматических и хроматических aberrаций, суперхроматизация, дифракционная линза, рефракционная линза, дифракционно-рефракционный корректор, пластмассово-линзовый объектив.

Введение

Все возрастающие требования к характеристикам камер видеонаблюдения стимулируют совершенствование их оптических трактов. Основным узлом оптического тракта является микрообъектив, определяющий как качество формируемого изображения, так и габариты устройства в целом. Сочетание требований низкой стоимости и весьма высоких оптических характеристик микрообъективов камер видеонаблюдения обуславливает целесообразность изготовления элементов их оптических схем из пластмасс, так как современные методы формообразования на основе прецизионной штамповки позволяют легко тиражировать пластмассовые линзы с асферическими преломляющими поверхностями и, кроме того, при необходимости штамповать эти поверхности с дифракционным микрорельефом [1-3].

Качество полихроматического изображения, формируемого оптической системой, состоящей из рефракционных линз (РЛ), ограничивается, прежде всего, хроматизмом первого порядка – зависимостью заднего отрезка и увеличения системы от длины волны проходящего через неё света. Зависимость заднего отрезка оптической системы s' от длины волны, называемая хроматизмом положения (или продольным хроматизмом), приводит к расфокусировке монохроматических составляющих полихроматического изображения, а зависимость увеличения от длины волны, называемая хроматизмом увеличения (или поперечным хроматизмом), приводит к разномасштабности монохроматических составляющих полихроматического изображения. В результате, оба хроматизма ухудшают качество изображения [4].

С целью минимизации отрицательного воздействия продольного хроматизма на качество формируемого изображения на этапе расчёта оптической системы добиваются равенства задних отрезков на двух или более длинах волн. При расчёте объективов видеокамер предполагают, что предмет удалён в бесконечность. В этом случае контролируются задние фокальные отрезки.

Достижение равенства задних фокальных отрезков $s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\lambda_{\max}}$ на двух длинах волн заданного спектрального диапазона λ_{\min} и λ_{\max} получило название ахроматизации [5]. Ахроматическая коррекция

оптической системы (исправление вторичного спектра) предполагает, как известно, устранение хроматизма положения для трёх 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 фокальных отрезков на трёх длинах волн ($s'_{\lambda_{\min}} = s'_{\bar{\lambda}} = s'_{\lambda_{\max}}$) [5].

Суперхроматическая коррекция (исправление третичного спектра) предполагает устранение хроматизма положения уже для четырёх длин волн заданного спектрального диапазона и направлена на достижение равенства задних отрезков на этих длинах волн [6]. Целью перехода от ахроматизации к апохроматизации и далее к суперхроматизации является уменьшение расфокусировки на промежуточных длинах волн. Это особенно актуально для микрообъективов камер видеонаблюдения, работающих в режиме «день-ночь», т.е. в спектральном интервале, охватывающем видимый и ближний ИК диапазоны от $\lambda_{\min}=0,4$ мкм до $\lambda_{\max}=0,9$ мкм.

Ахроматизация легко достигается даже в простейшем склеенном дублете, для чего его силовую положительную линзу выполняют из крона, имеющего большой коэффициент дисперсии, а коррекционную отрицательную – из флинта, имеющего относительно малый коэффициент дисперсии [4, 5].

Методики выбора оптических материалов для апохроматизации или суперхроматизации, как правило, основываются на использовании γ - ν -диаграмм, где ν и γ – коэффициент дисперсии и относительная частная дисперсия оптического материала. При этом материалы выбирают из условия достижения максимальной площади многоугольника, вершинами которого являются точки γ - ν -диаграммы, соответствующие каждому из материалов [6-9]. При проектировании чисто рефракционных оптических систем удовлетворение этого условия требует использования специальных марок стёкол, объединённых в группы особых флинтов и кронов, а также флюорита. Однако эти специальные стёкла, как правило, являются весьма дорогостоящими и имеющими невысокие эксплуатационные характеристики. Помимо этого, апохроматизация и тем более суперхроматизация, достигаются при весьма больших кривизнах поверхно-

стей линз, что приводит к высокому уровню монохроматических аберраций и, в конечном счёте, ограничивает достижимые световые диаметры [9-11].

Наконец, апохроматизация и тем более суперхроматизация оптических систем, состоящих из РЛ, выполненных только из оптических пластмасс и наиболее перспективных для массовых камер видеонаблюдения, практически вообще невозможна. Это обусловлено тем, что точки γ - ν -диаграммы, координатами которых являются оптические постоянные существующих в настоящее время пластмасс, лежат практически на одной прямой (см., например, каталог MISC в компьютерной программе оптического проектирования ZEMAX [12]).

В то же время известно (см., например, работы [10, 13, 14]), что при ограниченном выборе оптических материалов любая из рассмотренных выше степеней коррекции хроматизма рефракционно-линзовых оптических систем может выполняться за счёт использования дифракционных линз (ДЛ), под которыми в отечественной и зарубежной литературе понимают оптические элементы, осуществляющие преобразование фронта волны в результате дифракции света на микроструктуре элемента, выполненной на поверхности заданной формы.

Методика ахроматизации или апохроматизации оптической системы с помощью дифракционно-рефракционного корректора (ДРК), включающего ДЛ и одну или две РЛ, а также примеры использования этой методики при разработке пластмассово-линзовых микрообъективов представлены в работах [15,16]. Методика суперхроматизации оптической системы, РЛ которой выполнены из оптического стекла, описана в работе [17]. В настоящей статье методика суперхроматизации развивается и адаптируется к пластмассово-линзовым микрообъективам.

1. Компоновка и расчёт ДРК

Методика суперхроматизации оптической системы, описанная в [17], предполагает замену одной из РЛ исходной оптической схемы (как правило, отрицательной и расположенной вблизи апертурной диафрагмы) на ДРК. Исходные параметры ДРК получают путём решения системы четырёх уравнений, первое из которых определяет его оптическую силу Φ на длине волны $\bar{\lambda}$, а три оставшихся уравнения обеспечивают обнуление первых хроматических сумм, вычисленных для четырёх длин волн, ограни-

чивающих три примыкающих спектральных диапазона, выбранных для суперхроматизации. Система уравнений была получена в предположении, что ДРК является бесконечно тонким:

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

Здесь Φ_D и Φ_R – оптические силы ДЛ и РЛ корректора на длине волны $\bar{\lambda}$; h_A – высота апертурного 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 ν и относительные частные дисперсии γ материала РЛ и ДЛ, входящие в систему уравнений (1), имеют вид [4,18]

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

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

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

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

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

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

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 две РЛ ($I=2$), рассматриваемая система линейных уравнений совместна только при выполнении условия [8]:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & -\Phi \\ 1/\nu_D & 1/\nu_{R_1} & 1/\nu_{R_2} & -S_{ch}^{(\lambda_{min}, \lambda_{max})}/h_A^2 \\ \gamma_{1D}/\nu_D & \gamma_{1R_1}/\nu_{R_1} & \gamma_{1R_2}/\nu_{R_2} & -S_{ch}^{(\lambda_1, \lambda_{max})}/h_A^2 \\ \gamma_{2D}/\nu_D & \gamma_{2R_1}/\nu_{R_1} & \gamma_{2R_2}/\nu_{R_2} & -S_{ch}^{(\lambda_{min}, \lambda_2)}/h_A^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Оптические постоянные пластмасс, наиболее часто используемых для изготовления РЛ, приведены в табл. 1. Первые две строки таблицы отведены кроноподобным пластмассам: полиметилметакрилату

(PMMA) и акрилу (Acrylic), а остальные три – флинтоподобным пластмассам: полистиролу (Polystyrene), поликарбонату (Polycarbonate) и стирол-акрилонитрилу (Styrene Acrylonitrile – SAN). Показа-

тель преломления n_d соответствует центральной длине волны видимого диапазона, в качестве которой выбрана жёлтая d-линия гелия ($\bar{\lambda}=\lambda_d=0,58756$ мкм). Сам же диапазон ограничен длинами волн $\lambda_{\min}=0,4$ мкм и $\lambda_{\max}=0,9$ мкм при промежуточных значениях $\lambda_1=(\lambda_{\max}+2\lambda_{\min})/3$ и $\lambda_2=(\lambda_{\min}+2\lambda_{\max})/3$.

Таблица 1. Оптические постоянные пластмасс

Оптический материал	n_d	v_d	γ_{1R}	γ_{2R}
ПММА	1,491756	21,3899	0,3676	0,8756
Акрил	1,491668	21,1561	0,3756	0,8804
Полистирол	1,590481	11,3184	0,3416	0,8888
ПК	1,585470	10,6955	0,3305	0,8922
САН	1,567440	12,7229	0,3451	0,8863

Как показали исследования, обнулить определитель, входящий в уравнение (8), и тем самым добиться суперахроматизации можно уже у одного из простейших объективов – классического триплета Кука [19]. Для этого его внешние положительные РЛ должны быть выполнены из кроноподобной пластмассы, а центральную отрицательную РЛ следует заменить на ДРК, состоящий из ДЛ и крон-флинтовой пары пластмассовых РЛ. Однако в отличие от случая суперахроматизации объективов на основе стеклянных РЛ обнуление определителя требует корректировки параметров четвёртого столбца определителя, что достигается перераспределением оптических сил между ДРК и остальными РЛ объектива. Это требование обусловлено тем, что в случае, когда все РЛ объектива выполнены из оптических пластмасс площадь вышеоговоренного многоугольника на γ - v -диаграмме, одной из вершин которого является точка, соответствующая ДЛ, гораздо меньше, чем площадь, достижимая за счет оптимального выбора оптических стекол с их существенно более широким диапазоном оптических постоянных.

В силу нелинейности показателя преломления материала как функции длины волны, условия равенства нулю первой хроматической суммы и отсутствия хроматизма положения для данной пары длин волн, строго говоря, не совпадают. Поэтому 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:

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

Переход от системы уравнений (1) к системе (9) позволяет, кроме того, ввести толщины элементов и

воздушных промежутков и оперировать с «реальными оптическими материалами», описывая их не основанными на линейризации зависимости показателя преломления от длины волны параметрами v_R и γ_R , а соответствующими дисперсионными формулами.

2. Суперахроматизация микрообъектива

Анализ серийно производимых различными фирмами микрообъективов для камер видеонаблюдения позволил в качестве базовых принять ниже следующие значения их основных параметров: заднее фокусное расстояние $f'=3,71$ мм; относительное отверстие 1:2,4; угловое поле в пространстве предметов $2\omega=60^\circ$ [20].

В качестве исходной схемы был выбран классический триплет Кука, пересчитанный на фокусное расстояние $f'=3,71$ мм с заменой оптических стёкол на ПММА. Затем с целью достижения суперахроматизации внутренняя отрицательная РЛ триплета, расположенная вблизи апертурной диафрагмы, заменялась на ДРК, включающий одну ДЛ и две РЛ, выполненные из акрила и ПК. На рис. 1 представлена оптическая схема полученного таким образом пятилинзового суперахромата, у которого полевые aberrации и сферохроматизм минимизировались в ходе оптимизации путём асферизации преломляющих поверхностей РЛ.

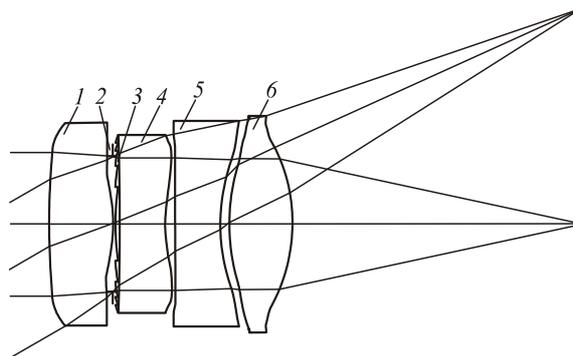


Рис. 1. Оптическая схема пятилинзового суперахромата: 1, 4, 5, 6 – РЛ; 2 – апертурная диафрагма; 3 – ДЛ

На рис. 2 представлена кривая продольного хроматизма, из которой видно, что суперахроматизация микрообъектива действительно достигнута. На рис. 3 для сравнения приведена кривая продольного хроматизма рассматриваемого микрообъектива в отсутствие ДЛ. В этом случае возможна лишь ахроматизация и остаточный хроматизм примерно в 4 раза превышает остаточный хроматизм микрообъектива-суперахромата. Δ

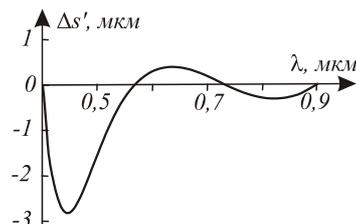


Рис. 2. Кривая продольного хроматизма пятилинзового суперахромата

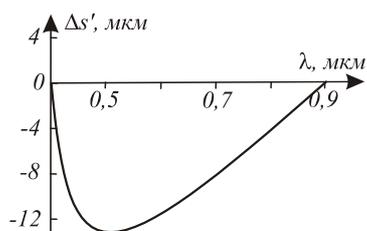


Рис. 3. Кривая продольного хроматизма микрообъектива в отсутствие ДЛ

Несмотря на проведённую оптимизацию, из-за высокого уровня остаточных полевых aberrаций полихроматическое разрешение микрообъектива на суперахромата на краю поля зрения ($\omega=30^\circ$) при контрасте не ниже 0,5 составляет $N=37 \text{ мм}^{-1}$, что для камер видеонаблюдения недопустимо мало. Кроме того, существенным недостатком данного объектива является широкий диапазон полевых углов в пространстве изображений, приводящих к неоднородности освещения по плоскости многоэлементного фотоприёмника [21].

С целью подавления полевых aberrаций и сужения диапазона полевых углов в пространстве изображений в воздушный промежуток между последней РЛ и плоскостью изображения пятилинзового микрообъектива были введены две дополнительные РЛ, выполненные из акрила. Оптимизация полученной при этом семилинзовой оптической системы действительно позволила уменьшить максимальный угол наклона главного луча по отношению к оптической оси в пространстве изображений до величины, не превышающей 20° , и существенно снизить уровень полевых aberrаций. В результате при фокусном расстоянии $f'=3,71 \text{ мм}$ и относительном отверстии 1:2,4 семилинзовый суперахромат способен формировать изображение в плоскости наилучшей установки с разрешением $N=100 \text{ мм}^{-1}$ при контрасте

не ниже 0,5 в пределах полевого угла $2\omega \leq 60^\circ$. Остаточный хроматизм положения в диапазоне от $\lambda_{\min}=0,4 \text{ мкм}$ до $\lambda_{\max}=0,9 \text{ мкм}$ не превышает 3,3 мкм, а модуль дисторсии менее 1%.

На рис. 4 и в табл. 2 приведены оптическая схема и конструктивные параметры высокоразрешающего семилинзового микрообъектива суперахромата. На рис. 5 представлена кривая продольного хроматизма семилинзового микрообъектива, подтверждающая сохранение достигнутой ранее суперахроматизации.

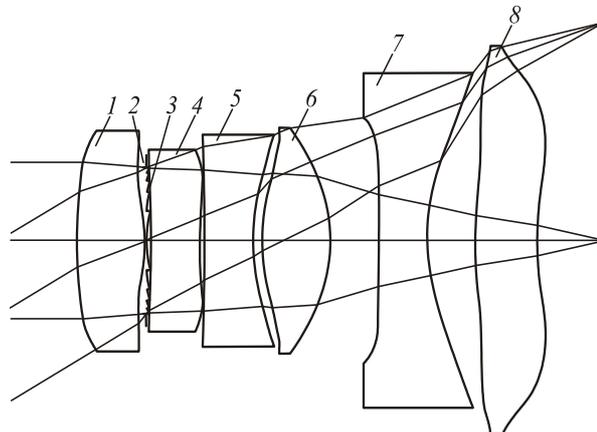


Рис. 4. Оптическая схема высокоразрешающего семилинзового микрообъектива: 1, 4, 5, 6, 7, 8 – РЛ; 2 – апертурная диафрагма; 3 – ДЛ

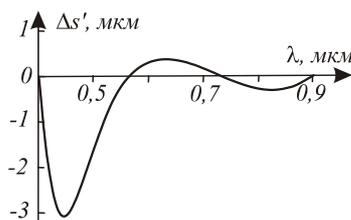


Рис. 5. Кривая продольного хроматизма семилинзового суперахромата

Таблица 2. Конструктивные параметры высокоразрешающего семилинзового микрообъектива

№ поверхности	Радиус r , мм	Толщина, мм	Оптическая среда	Коэффициенты асферичности			
				$\alpha_2 \cdot 10^2, \text{ мм}^{-3}$	$\alpha_3 \cdot 10^2, \text{ мм}^{-5}$	$\alpha_4 \cdot 10^2, \text{ мм}^{-7}$	$\alpha_5 \cdot 10^2, \text{ мм}^{-9}$
Объект	∞	∞	Воздух				
1	7,6015	0,7	ПММА	0,024233	0,071587	-0,036962	0,016835
2	-1,3745	0,0202	Воздух	0,792502	-1,074033	1,305387	-0,656534
3*	∞	0,0468	Воздух				
4**	-3,4785	0,5	Акрил	0,572817	-1,273938	1,551962	-0,980832
5	2,7073	0,05	Воздух	-0,404406	0,492399	-0,717138	0,310795
6	37,8286	0,5	ПК	-0,125236	0,351880	-0,491872	0,236976
7	1,6991	0,1	Воздух	-0,220229	0,186184	-0,106564	0,022939
8	1,6868	0,7	ПММА	-0,222637	0,141093	-0,061519	-0,011513
9	-1,3047	0,5	Воздух	0,181349	-0,102520	0,109329	-0,048121
10	-9,4783	0,5	Акрил	0,165115	-0,217654	0,105650	-0,034772
11	2,1526	0,4927	Воздух	0,013674	-0,045725	0,013921	-0,0016366
12	3,0117	0,6387	Акрил	-0,165224	0,070535	-0,013666	0,0010621
13	2,3035	0,7	Воздух	-0,169572	0,041245	-0,011989	0,00155031
Изображение	∞	—	—	—	—	—	—

* - апертурная диафрагма

** - дифракционная микроструктура: $m=1$; $A_1=-13,486383 \text{ мм}^{-2}$; $A_2=32,450679 \text{ мм}^{-4}$; $A_3=-169,26701 \text{ мм}^{-6}$; $A_4=351,31866 \text{ мм}^{-8}$; $A_5=-284,69487 \text{ мм}^{-10}$.

В табл. 2 и далее m – рабочий порядок дифракции ДЛ, а α_i , и A_j – коэффициенты полиномов, входящих в уравнения, описывающие асферические поверхности и микроструктуру ДЛ, соответственно. При этом уравнение асферической поверхности имеет вид [12]:

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - c^2\rho^2}} + \sum_{i=2} \alpha_i \rho^{2i}, \quad (10)$$

где z – координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстояние ρ в системе координат, плоскость XY которой касается вершины этой поверхности, $c=1/r$ – кривизна асферической поверхности при её вершине.

Пространственная частота микроструктуры ДЛ описывается уравнением

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{2\pi m} \frac{d\psi}{d\rho}, \quad (11)$$

где «фазовая добавка в луч» [12]

$$\psi = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}. \quad (12)$$

При описании структуры ДЛ уравнениями (11) и (12) её оптическая сила определяется коэффициентом A_1 и номером дифракционного порядка m :

$$\Phi = -A_1 \lambda m / \pi. \quad (13)$$

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

Отметим, что структуры ДЛ представленных микрообъективов низкочастотные и содержат менее десяти кольцевых зон. Низкочастотность структуры позволяет выполнить её с пилообразным профилем штриха и, более того, двухслойной, для чего могут быть использованы те же самые оптические пластмассы. Это обеспечит дифракционную эффективность, близкую к 100%, в пределах всего заданного спектрального диапазона [22, 23].

Заключение

Резюмируя основные результаты статьи, можно сделать следующие основные выводы.

Включение ДЛ в рефракционную оптическую систему позволяет произвести её суперхроматизацию не только в том случае, когда все РЛ системы выполнены из оптических стёкол различных марок, но и в случае замены стёкол на оптические пластмассы.

Представленная в данной статье методика, предполагающая использование ДРК, позволяет осуществлять суперхроматизацию пластмассово-линзовых объективов.

Пластмассово-линзовые суперхроматы по своим техническим характеристикам могут быть использованы в устройствах, предназначенных для работы в широких спектральных диапазонах и, в частности, в камерах видеонаблюдения, работающих в режиме «день-ночь».

Благодарность

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. **Potelov, V.V.** Aspherization of high-accuracy optical elements by the vacuum-deposition method / V.V. Potelov, B.N. Senik // Journal of Optical Technology. – 2004 – Vol. 71(12) – P. 814–818.
2. **Radtke, D.** Lazer-lithography on non-planar surfaces / D. Radtke, U.D. Zeitner // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(3). – P. 1167–1174.
3. G-S plastic optics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gsoptics.com>.
4. **Бегунов, Б.Н.** Теория оптических систем / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказнов. – М.: Машиностроение, 1973. – 488 с.
5. Вычислительная оптика: справочник / под ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.
6. **Herzberger, M.** The design of superachromatic lenses / M. Herzberger, N.R. Mc Clure // Appl. Opt. – 1963. – Vol. 2. – P. 553–560.
7. **Stephens, R.E.** Selection of Glasses for Three-Color Achromats / R.E. Stephens // JOSA A. – 1959. – Vol. 49. – P. 398–399.
8. **Слюсарев, Г.Г.** Методы расчёта оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.
9. **Maxwell, J.** Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – Vol. 1354. – P. 408–411.
10. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Appl. Opt. – 1988. – Vol. 27. – P. 2960–2971.
11. **Mercado, R.I.** The design of apochromatic optical systems / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1985. – Vol. 554. – P. 217–227.
12. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zemax.com>.
13. **Ган, М.А.** Теория и методы расчёта голограммных и киноформных оптических элементов / М. А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
14. **Mercado, R.I.** Designs of two-glass apochromats and superachromats / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – Vol. 1354. – P. 263–272.
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 // Appl Opt. – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137–6141.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
19. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с. (M. Born Principles of Optics, 4th ed. Pergamon Press. N.Y., 1968).

20. Universe Kogaku America lens design and optical lenses for industrial, medical, high tech and electronic applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ukaoptics.com/ccd>.
 21. **Грейсук, Г.И.** Расчёт высокоапертурных конфокальных дифракционно-линзовых объективов / Г.И. Грейсук, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 22-28.
 22. **Грейсук, Г.И.** Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсук, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 43-46.
 23. **Грейсук, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур/ Г.И. Грейсук, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106, Вып. 4. – С. 694-699.
- References**
1. **Potelov, V.V.** Aspherization of high-accuracy optical elements by the vacuum-deposition method / V.V. Potelov, B.N. Senik // Journal of Optical Technology. – 2004 – Vol. 71(12) – P. 814-818.
 2. **Radtke, D.** Laser-lithography on non-planar surfaces / D. Radtke, U.D. Zeitner // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(3). – P. 1167-1174.
 3. G-S plastic optics [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.gsoptics.com>.
 4. **Begunov, B.N.** The theory of optical systems / B.N. Begunov, N.P. Zakaznov. – Moscow: "Mashinostroenie" Publisher, 1973. – 488 p. – (in Russian).
 5. Computational Optics: Reference Book / edited by M.M. Rusinov. – Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher, 1984. – 423 p. – (in Russian).
 6. **Herzberger, M.** The design of superachromatic lenses / M. Herzberger, N.R. Mc Clure // Appl. Opt. – 1963. – Vol. 2. – P. 553-560.
 7. **Stephens, R.E.** Selection of Glasses for Three-Color Achromats / R.E. Stephens // JOSA A. – 1959. – Vol. 49. – P. 398-399.
 8. **Slusarev, G.G.** Methods of calculating optical systems / G.G. Slusarev. – Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher, 1969. – 672 p. – (in Russian).
 9. **Maxwell, J.** Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – Vol. 1354. – P. 408-411.
 10. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Appl. Opt. – 1988. – Vol. 27. – P. 2960-2971.
 11. **Mercado, R.I.** The design of apochromatic optical systems / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1985. – Vol. 554. – P. 217-227.
 12. ZEMAX: software for optical system design [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zemax.com>.
 13. **Gan, M.A.** Theory and methods of calculating the hologram and kinoform optical elements / M.A. Gan. – Leningrad: GOI, 1984. – 140 p. – (in Russian).
 14. **Mercado, R.I.** Designs of two-glass apochromats and superachromats / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – Vol. 1354. – P. 263-272.
 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 // Appl Opt. – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137-6141.
 16. **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.
 17. **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.
 18. **Greisukh, G.I.** Comparative analysis of chromatism diffractive and refractive lens / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Computer optics. – 2005. – N. 28. – P. 60-65. – ISSN 0134-2452. – (in Russian)
 19. **Born, M.** Principles of Optics, 5th ed / M. Born, E. Wolf – N.Y.: Pergamon Press, 1975. – 808 p.
 20. Universe Kogaku America lens design and optical lenses for industrial, medical, high tech and electronic applications [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ukaoptics.com/ccd>.
 21. **Greisukh, G.I.** Design of high aperture confocal diffractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin S.A. Stepanov // Computer optics. – 2011. – V. 35, N. 1. – P. 22-28. – ISSN 0134-2452 – (in Russian).
 22. **Greisukh, G.I.** The choice of materials for "achromatization" relief-phase diffraction patterns / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Computer optics. – 2008. – V. 32, N. 1. – P. 43-46. – ISSN 0134-2452 – (in Russian).
 23. **Greisukh, G.I.** Suppression of the spectral selectivity of two-layer relief-phase diffraction structures / G.I. Greisukh, E.A. Bezus, D.A. Bykov, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Opt. Spectrosc. – 2009. – V. 106, N. 4. – P. 694-699. – (in Russian).

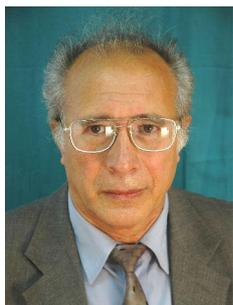
DESIGN OF PLASTIC-LENS MICRO-OBJECTIVES SUPERACHROMATS

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

Abstract

A well-known technique superachromatization, which suggests using of the corrector, which includes diffractive and two refractive lenses, developed and adapted for the plastic-lens optical systems. The effectiveness of technique demonstrated by the design of a micro-objective for video cameras operating in the range "day-night".

Key words: correction of monochromatic and chromatic aberration, superachromatization, diffractive lens, refractive lens, diffractive- refractive corrector, plastic-lens objective.

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 130 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств.

E-mail: grey@pguas.ru.

Grigoriy Isaevitch 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 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). 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.

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 and tutorial.



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 11 публикаций.

E-mail: grey@pguas.ru.

Ilya Anatolievich 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 11 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 80 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств.

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 80 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

Поступила в редакцию 26 сентября 2011 г.