

С. В. ОЛЕЙНИК, Т. Н. ХАЦЕВИЧ

## ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ДВУХЛИНЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЕТОСИЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С СОВРЕМЕННЫМИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Для российских марок стекол был проведен расчет величин относительной частотной и средней дисперсии в диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм и составлены базовые пары. Получен набор базовых двухлинзовых объективов с относительным отверстием 1:3—1:2,5, ахроматизированных для указанного спектрального интервала, которые могут служить основой для расчета светосильных объективов приборов ночного видения, работающих с современными электронно-оптическими преобразователями II и III поколений.

**Ключевые слова:** двухлинзовые компоненты, светосильные объективы, приборы ночного видения.

При разработке приборов ночного видения (ПНВ) с ограничениями по массогабаритным характеристикам необходимо использовать объективы с большим относительным отверстием. Возможность расчета светосильного объектива во многом определяется его базовыми (силовыми) компонентами. Двухлинзовый объектив остается основным силовым компонентом в большинстве оптических систем современных объективов ПНВ. Возможность увеличения относительного отверстия оптической системы во многом определяется степенью коррекции сферической и хроматической аберрации.

В настоящей работе была поставлена задача определения оптимальных сочетаний марок стекол в двухлинзовом объективе, ахроматизированном в спектральном диапазоне, соответствующем чувствительности современных электронно-оптических преобразователей (ЭОП), с одновременным устранением (минимизацией) в нем сферической аберрации. Фактически для разных сочетаний марок стекол определялось наибольшее значение относительного отверстия двухлинзового компонента, при котором качество получаемого с его помощью изображения сопоставимо с разрешающей способностью современных ЭОП.

В качестве критерия допустимой величины остаточных аберраций использовались предварительно полученные значения коэффициентов передачи контраста объектива в диапазоне частот, соответствующих рабочему диапазону пространственных частот ЭОП. Для этого исходя из допустимого снижения предела разрешения ПНВ по сравнению с пределом разрешения используемого в нем ЭОП определялись предельные значения коэффициентов передачи контраста объектива, и далее эти требования переносились на базовый компонент объектива. Без учета влияния остальных компонентов ПНВ с использованием свойства мультипликативности частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) ПНВ

$$T(\nu)_{\text{ПНВ}} = T(\nu)_{\text{ЭОП}} T(\nu)_{\text{об}},$$

где  $T(\nu)_{\text{ЭОП}} = \exp(-\pi^2 \nu^2 a^{-2})$  — ЧКХ ЭОП [1, 2], во всем диапазоне пространственных рабочих частот ЭОП ( $\nu$ ) были вычислены значения ЧКХ объектива  $T(\nu)_{\text{об}}$ , при которых ЧКХ ПНВ снижается соответственно до  $0,9T(\nu)_{\text{ЭОП}}$ ,  $0,8T(\nu)_{\text{ЭОП}}$ ,  $0,7T(\nu)_{\text{ЭОП}}$  и  $0,6T(\nu)_{\text{ЭОП}}$  (табл. 1). Более низкие значения  $T(\nu)_{\text{ПНВ}}$  не представляют практического интереса из-за малого разрешения и низкого уровня контрастности изображения.

Свойства двухлинзовых базовых компонентов исследованы при 10 %-ном уровне снижения ЧКХ ПНВ в сравнении с ЧКХ ЭОП.

Таблица 1

Значения  $T(v)_{об}$  в соответствии с допустимым снижением ЧКХ ПНВ

$T(v)_{ПНВ}$	$T(v)_{об}$ , при частоте				
	10 мм <sup>-1</sup>	20 мм <sup>-1</sup>	30 мм <sup>-1</sup>	40 мм <sup>-1</sup>	50 мм <sup>-1</sup>
0,9 $T(v)_{ЭОП}$	0,98	0,91	0,82	0,70	0,6
0,8 $T(v)_{ЭОП}$	0,95	0,81	0,62	0,44	0,3
0,7 $T(v)_{ЭОП}$	0,91	0,68	0,41	0,22	0,1
0,6 $T(v)_{ЭОП}$	0,84	0,52	0,23	0,10	0

Как известно, в оптической системе, состоящей из двух близко расположенных компонентов, ахроматическая коррекция в определенном спектральном интервале осуществляется при выполнении условий

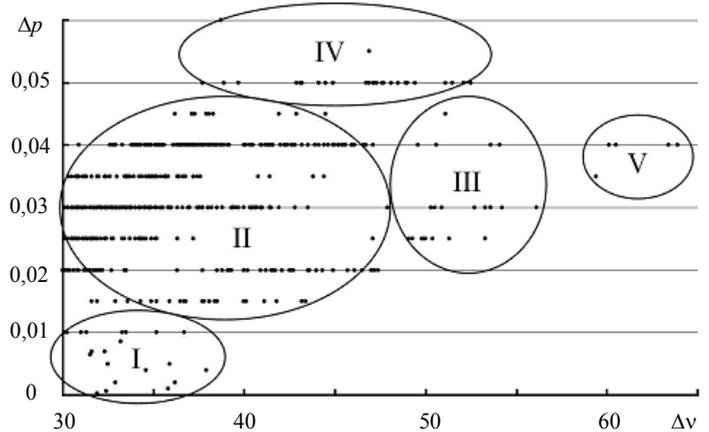
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2; \quad \Phi_1 = \Phi v_1 / (v_1 - v_2); \quad \Phi_2 = \Phi v_2 / (v_2 - v_1), \quad (1)$$

связывающих оптические силы  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  первого и второго компонентов и всей системы  $\Phi$  с величиной коэффициентов средних дисперсий  $v_1$  и  $v_2$  материалов линз. Одновременное уменьшение вторичного спектра  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_0}$ , значение которого в двухлинзовом объективе-ахромате определяется как

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_0} = -f'_{\lambda_0} (p_1 - p_2) / (v_1 - v_2), \quad (2)$$

возможно при соблюдении равенства относительных частных дисперсий  $p_1$  и  $p_2$  используемых марок стекол. Значения относительных частных  $p$  и средних  $v$  дисперсий определялись для российских марок стекол в диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм, показатели преломления рассчитывались по дисперсионной формуле. Выбранный спектральный диапазон работы соответствует области чувствительности современных поколений ЭОП.

Далее по формулам (1) и (2) определялись параметры линз, комбинация которых позволяет скорректировать в двухлинзовом базовом компоненте хроматизм положения и сферическую aberrацию. Общее число исследованных сочетаний марок стекол — более пятисот. Исследованные комбинации разбиты на пять групп (см. рисунок), для каждой из которых на втором этапе работы методом оптимизации в соответствии с принятым выше критерием определены наибольшие величины относительного отверстия. Диаграмма распределения исследованных двухлинзовых базовых компонентов по группам в зависимости от соотношения средних и частных дисперсий материалов представлена на рисунке. Оценка качества изображения проводилась для осевой точки изображения и в пределах малых угловых полей — до 2,5°.



К группе I относятся пары оптических материалов, обладающие малой разностью относительных частных дисперсий  $\Delta p$ , что позволяет существенно уменьшать вторичный спектр при разработке базового компонента. В эту группу включены 22 пары, составленные из следующих оптических материалов: ОК1–БФ16, ОК2–БФ27, ОК1–БФ8, ОК1–БФ25, ОК1–ЛФ11, ОК1–БФ32, ОК1–ОФ7, ОК1–ЛФ10, ОК2–ОФ3, ОК2–ОФ8, ОК2–ОФ4, ОК1–ЛФ12, ОК2–ЛФ5, ОК2–ЛФ7, ОК2–ОФ5, ОК1–ТБФ9, ОК1–ОФ3, ОК1–ОФ8, ОК1–ОФ4, ОК1–ЛФ5, ОК2–ЛФ5 и ОК1–ОФ5. Значение разности средних дисперсий  $\Delta v$  в этой группе материалов находится

в довольно узком промежутке от 30,1 до 37,9, что вызывает некоторые трудности при расчетах двухлинзовых базовых компонентов с увеличенным относительным отверстием.

Оптические пары группы V обладают весьма большой разностью коэффициентов средней дисперсии  $\Delta v$ , что способствует уменьшению кривизны преломляющих поверхностей в двухлинзовом компоненте, а следовательно, и увеличению его относительного отверстия. В эту группу входит всего пять комбинаций оптических материалов: ОК1–СТФ11, ОК1–СТФ3, ОК2–СТФ11, ОК2–СТФ3 и ОК1–СТФ2. Значительная разность относительных частных дисперсий  $\Delta p$  в указанных комбинациях материалов ограничивает величину вторичного спектра в двухлинзовом склеенном объективе, и лишь введение дополнительного коррекционного параметра — радиуса кривизны преломляющей поверхности — позволяет улучшить абберационную коррекцию в расклеенном двухлинзовом компоненте.

Наиболее многочисленны комбинации оптических материалов отнесены к группам II–IV. В качестве примеров приведем по десять характерных комбинаций марок стекол из указанных групп: II группа — ОК2–ТФ12, ОК1–ТФ3, ОК1–ТФ8, ОК2–ТФ4, ОК1–ТФ11, ОК2–ТФ14, ОК1–ТФ2, ОК2–ТФ3, ОК1–ТБФ10, ОК1–ТФ1; III группа — ЛК3–СТФ11, ЛК6–СТФ3, К1–СТФ11, ЛК8–СТФ2, ЛК6–СТФ2, ЛК4–СТФ2, ЛК8–ТБФ14, ЛК4–ТБФ14, ЛК5–ТФ10, ЛК5–ТФ13; IV группа — ОК1–Ф13, ОК1–ТБФ25, ОК1–ЛФ9, ОК2–Ф13, ОК2–БФ24, ОК1–ЛФ5, ОК2–БФ26, ОК2–БФ21, ОК2–ЛФ7, ТК9–ТФ10. Оптические пары из этих групп могут иметь при большой разности частных относительных дисперсий  $\Delta p$  достаточно большую разность средних дисперсий  $\Delta v$ , что позволяет одновременно с уменьшением вторичного спектра повысить величину относительного отверстия  $D:f'$  в двухлинзовом базовом компоненте. В системах с большим значением  $\Delta v$  (от 40 до 64) применяемых материалов оправдано введение воздушного промежутка между компонентами. При малых значениях  $\Delta v$  увеличиваются оптические силы линз и соответственно уменьшаются радиусы кривизны преломляющих поверхностей.

В табл. 2 приведены некоторые варианты исследованных двухлинзовых компонентов, обеспечивающие в спектральном диапазоне от 0,6 до 0,9 мкм высокие значения коэффициентов передачи контраста при относительных отверстиях вплоть до 1:3—1:2,5.

Таблица 2

Конструктивные параметры			$D:f'$	ЧКХ	
<b>I группа</b>					
1	2	3	4	5	6
$r_1 = 58,22$	$d_1 = 7,5$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -39,4$	$d_2 = 0,2$			15	0,93
$r_3 = -39,4$	$d_3 = 2,5$	ОФ5		30	0,81
$r_4 = -144,54$	$d_4 = 94,2$			50	0,64
$r_1 = 54,22$	$d_1 = 7,5$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -32,2$	$d_2 = 0,2$			15	0,91
$r_3 = -32,2$	$d_3 = 2,5$	ЛФ11		30	0,76
$r_4 = -322,1$	$d_4 = 93,4$			50	0,53
$r_1 = 60,55$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -41,1$	$d_2 = 0$			15	0,89
$r_3 = -41,1$	$d_3 = 2$	БФ16		30	0,73
$r_4 = -135,97$	$d_4 = 94,2$			50	0,56
$r_1 = 46,7$	$d_1 = 10,5$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -51,5$	$d_2 = 2,1$			15	0,9
$r_3 = -44,3$	$d_3 = 2$	ЛФ5		30	0,73
$r_4 = \infty$	$d_4 = 86,05$			50	0,52
$r_1 = 58,35$	$d_1 = 12$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -35,9$	$d_2 = 0$			15	0,69
$r_3 = -35,9$	$d_3 = 2$	ОФ3		30	0,52
$r_4 = -263,8$	$d_4 = 91,6$			50	0,49

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
<b>II группа</b>					
$r_1 = 60,33$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -46,55$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -46,55$	$d_3 = 2$	ТБФ8		30	0,85
$r_4 = -102,35$	$d_4 = 94,03$			50	0,72
$r_1 = 60,4$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -40,6$	$d_2 = 0$			15	0,89
$r_3 = -40,6$	$d_3 = 2$	ТФ2		30	0,74
$r_4 = -134,7$	$d_4 = 93,6$			50	0,56
$r_1 = 60,5$	$d_1 = 10,0$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -41,3$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -41,3$	$d_3 = 2$	ТФ8		30	0,77
$r_4 = -129,4$	$d_4 = 93,7$			50	0,6
$r_1 = 62,2$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -43,5$	$d_2 = 0$			15	0,93
$r_3 = -43,5$	$d_3 = 2$	ТФ3		30	0,82
$r_4 = -145,02$	$d_4 = 93,6$			50	0,67
$r_1 = 62,1$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -42,2$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -42,2$	$d_3 = 2$	ТФ14		30	0,79
$r_4 = -154,9$	$d_4 = 93,5$			50	0,62
<b>III группа</b>					
$r_1 = 57,3$	$d_1 = 10$	ЛК3	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -45,9$	$d_2 = 0$			15	0,93
$r_3 = -45,9$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,82
$r_4 = -77,4$	$d_4 = 94,5$			50	0,67
$r_1 = 57,5$	$d_1 = 10$	ЛК5	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -43,0$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -43,0$	$d_3 = 2$	ТФ10		30	0,77
$r_4 = -88,02$	$d_4 = 94,2$			50	0,59
$r_1 = 56,5$	$d_1 = 10$	ЛК8	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -44,02$	$d_2 = 0$			15	0,91
$r_3 = -44,02$	$d_3 = 2$	ТБФ14		30	0,78
$r_4 = -76,9$	$d_4 = 94,5$			50	0,60
$r_1 = 58,03$	$d_1 = 10$	К1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -45,4$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -45,4$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,84
$r_4 = -80,7$	$d_4 = 94,5$			50	0,70
$r_1 = 57,1$	$d_1 = 10$	ЛК6	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -44,5$	$d_2 = 0$			15	0,92
$r_3 = -44,5$	$d_3 = 2$	СТФ2		30	0,79
$r_4 = -79,5$	$d_4 = 94,4$			50	0,63
<b>IV группа</b>					
$r_1 = 60,4$	$d_1 = 10$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -45,7$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -45,7$	$d_3 = 2$	ТБФ25		30	0,84
$r_4 = -107,65$	$d_4 = 93,9$			50	0,70
$r_1 = 60,52$	$d_1 = 8$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -31,8$	$d_2 = 0$			15	0,94
$r_3 = -31,8$	$d_3 = 2$	ЛФ9		30	0,86
$r_4 = -180,9$	$d_4 = 94,5$			50	0,76

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
$r_1 = 61,2$	$d_1 = 8$	ОК1	1:3	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -35,4$	$d_2 = 0$			15	0,96
$r_3 = -35,4$	$d_3 = 2$	Ф13		30	0,9
$r_4 = -149,0$	$d_4 = 94,7$			50	0,83
$r_1 = 61,1$	$d_1 = 12$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -38,8$	$d_2 = 0$			15	0,86
$r_3 = -38,8$	$d_3 = 2$	БФ26		30	0,68
$r_4 = -181,7$	$d_4 = 92,1$			50	0,52
$r_1 = 62,2$	$d_1 = 10$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -45,9$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -45,9$	$d_3 = 2$	ТБФ9		30	0,86
$r_4 = -124,1$	$d_4 = 93,8$			50	0,74
<b>V группа</b>					
$r_1 = 59,3$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -49,4$	$d_2 = 0,05$			15	0,95
$r_3 = -49,4$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,87
$r_4 = -89,55$	$d_4 = 94,7$			50	0,75
$r_1 = 59,5$	$d_1 = 9$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -49,5$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -49,5$	$d_3 = 2,5$	СТФ3		30	0,87
$r_4 = -83,48$	$d_4 = 95,2$			50	0,75
$r_1 = 61,4$	$d_1 = 9$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -51,5$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -51,5$	$d_3 = 2$	СТФ11		30	0,87
$r_4 = -99,16$	$d_4 = 94,8$			50	0,75
$r_1 = 60,98$	$d_1 = 9$	ОК2	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -52,3$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -52,3$	$d_3 = 2$	СТФ3		30	0,87
$r_4 = -93,1$	$d_4 = 94,9$			50	0,75
$r_1 = 60,15$	$d_1 = 9,0$	ОК1	1:2,5	$v, \text{мм}^{-1}$	$T$
$r_2 = -48,1$	$d_2 = 0$			15	0,95
$r_3 = -48,1$	$d_3 = 2,0$	СТФ2		30	0,87
$r_4 = -95,4$	$d_4 = 94,8$			50	0,75

Исходя из целей исследования было выявлено следующее: наилучшие результаты получаются при компоновке объектива по схеме „положительный крон—отрицательный флинтовый мениск“; первый элемент выполняет силовую функцию и в большей степени определяет фокусное расстояние объектива; толщина по оси коррекционно-силового мениска является мощным коррекционным параметром; выбор марок стекла имеет важное значение для проектирования форсированных по светосиле объективов, при этом отсутствие необходимых оптических материалов можно, до определенной степени, компенсировать за счет изменения величины воздушного промежутка между компонентами.

Одновременное использование при расчете объективов ПНВ двух базовых двухлинзовых компонентов из числа приведенных в табл. 2 позволяет увеличивать относительные отверстия до 1:1,5 и выше, а включение дополнительных коррекционных компонентов — развить угловое поле [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. 431 с.

2. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 671 с.

3. Патент РФ № 2239855. Линзовый объектив / Т. Н. Хацевич, С. В. Олейник. 2004.

***Сведения об авторах***

- Сергей Викторович Олейник*** — аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: sol2000@ngs.ru
- Татьяна Николаевна Хацевич*** — канд. техн. наук, доцент; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра оптических приборов, Новосибирск; E-mail: shafrai@risp.ru

Поступила в редакцию  
12.01.09 г.