

Базовая сферическая линза с исправленной сферической аберрацией путем применения градиентного материала с осевым линейным распределением показателя преломления

© Т.С. Ровенская¹, А.Е. Алимов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Московский научно-исследовательский телевизионный институт (ЗАО «МНИТИ»), Москва, 105094, Россия

Проведено исследование аберрационных свойств градиентных линз с осевым линейным распределением показателя преломления с исправленной сферической аберрацией. Градиентные линзы были получены на основе однородных линз, рассчитанных на минимум сферической аберрации. Рассмотрены два варианта градиентных линз: с градиентным слоем у первой поверхности и с градиентным слоем по всей осевой толщине линзы. Изучены свойства градиентных линз с исправленной сферической аберрацией в области аберраций третьего порядка и в области реальных аберраций.

Ключевые слова: градиентная линза, однородная линза, сферическая аберрация, градиентный слой, показатель преломления, осевое распределение.

Введение. По сравнению с традиционными сферическими линзами, выполненными из материалов с пространственно постоянным значением показателя преломления (ПП), сферические линзы из градиентных оптических сред (ГОС) потенциально обладают большим числом коррекционных параметров и иными коррекционными возможностями. Такие линзы (градиентные) образуют новый класс оптических элементов, перспективный для практического применения в современных оптических системах.

Классифицируют ГОС по виду функциональной зависимости ПП n от координат точки среды: $n = n(x, y, z)$. Осевое распределение ПП (ОРПП) в прямоугольной системе координат $OXYZ$ описывается функцией вида

$$n = n(z) = n_0 + n_1z + n_2z^2 + n_3z^3 + \dots = \sum_{i=0}^k n_i z^i, \quad (1)$$

где n_0 соответствует значению ПП в начале системы координат (при $z = 0$); n_1, n_2, \dots, n_i — коэффициенты с размерностью $\text{мм}^{-1}, \text{мм}^{-2}, \dots, \text{мм}^{-i}$ соответственно, если единицей измерения z является миллиметр.

При $i = 1$ имеет место осевое линейное распределение ПП (ОЛРПП), при $i = 2$ — квадратичное и т. д.

Осевое распределение ПП может быть реализовано с помощью ряда технологий [1]. Прежде всего следует отметить уникальные успехи в производстве градиентных линз с ОРПП фирмы LightPath Technologies, организовавшей коммерческое производство оптических градиентных стекол под маркой GRADIUM® [2].

Современный этап развития автоматизированных методов расчета оптических систем связан с решением задач структурного синтеза. Одним из актуальных направлений такого синтеза являются композиционные методы расчета оптических систем, которые основаны на систематизированном знании аберрационных свойств базовых и коррекционных элементов [3–5], в том числе созданных на основе ГОС с ОРПП. Поэтому исследование свойств базовых градиентных оптических элементов (ГОЭ) с ОРПП в целях их эффективного применения при разработке современных оптических систем различного назначения является актуальной задачей.

Постановка задачи. Известно, что одним из наиболее эффективных способов применения градиентных сред с ОРПП, включая ОЛРПП, в практике расчета оптических систем является исправление сферической аберрации в одиночных линзах [6–8]. Благодаря этому такие линзы рассматривают в качестве перспективных базовых элементов апертурных оптических систем, что объясняет актуальность дополнительного изучения их аберрационных свойств.

Предметом данного исследования являются ограниченные сферическими поверхностями линзы (сферические линзы) с устраненной сферической аберрацией третьего порядка из материалов с ОЛРПП. Такое распределение ПП относится к числу реализуемых распределений, является удобным для исследований и при этом обеспечивает интересные для практики результаты.

При определении формы линзы в ней сохранено значение первого радиуса, равное аналогичному значению в однородной линзе, которую рассчитывали из условия достижения в ней минимума сферической аберрации третьего порядка; ПП линз в вершине первой поверхности также совпадают. Линзу моделировали при условии расположения ее в воздухе, а предмета — в бесконечности по отношению к линзе.

Целями исследования являются:

- 1) определение эффективного конструктивного исполнения базовой градиентной линзы с ОЛРПП путем изучения применения ГОС в двух вариантах линз: ОЛРПП используют на осевой толщине, равной стрелке сферической поверхности линзы, которая ограничивает ГОС; линзу с осевой толщиной d изготавливают из ГОС с ОЛРПП;

2) оценка эффективности применения теории аберрацией третьего порядка для качественного анализа реальных аберраций решений с ОЛРПП;

3) изучение свойств сферических базовых линз с ОЛРПП с исправленной сферической аберрацией в области аберраций третьего порядка.

Методика исследования. Выбран следующий алгоритм проведения исследования. На основе известных соотношений в теории аберраций третьего порядка сферических линз из однородных сред [9] выполнен синтез базовых сферических линз с постоянным ПП, форма которых соответствует минимуму сферической аберрации третьего порядка для случая нахождения предмета в бесконечности, а линзы — в воздухе. Исходные данные синтеза: фокусное расстояние $f' = 100$ мм, толщина по оси $d = 10$ мм, ПП n выбран из диапазона $[1,5; 2,0]$ с шагом $0,1$. Полученные конструктивные параметры соответствуют вариантам с индексом 1.

Синтез элементов с ГОС по всей толщине линзы (вариант 1б) проведен путем решения системы уравнений, описанной в [5], которую в общем виде можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{S}_1(r_1, r_2, n_0, n_1, d) = 0; \\ f'(r_1, r_2, n_0, n_1, d) = \text{const}. \end{cases} \quad (2)$$

При этом f' и d сохранены такими, как и в рассмотренном выше случае. ОРПП имело вид (1), ограниченный значением $i = 1$, т. е. соответствовало ОЛРПП. Коэффициент n_0 выбран из диапазона $[1,5; 2,0]$ с шагом $0,1$; радиусу первой поверхности r_1 дано значение, определенное для варианта 1 при $n = n_0$. Радиус кривизны второй поверхности r_2 и коэффициент n_1 в ОЛРПП определен из условий получения заданного значения фокусного расстояния и устранения сферической аберрации третьего порядка.

Синтез элементов с ГОС у ограничивающей ее сферической поверхности выполнен с применением модернизированной математической модели. При этом ГОЭ рассматривался как квазисклеенный компонент, состоящий из градиентной и однородной частей (рис. 1).

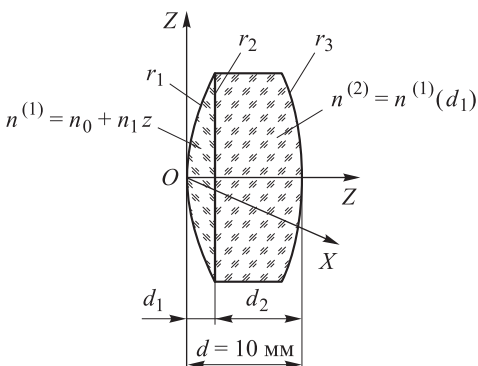


Рис. 1. Сферическая градиентная линза из градиентной с ОЛРПП и однородной частей (квазисклеенный компонент)

Градиентная часть представляла собой выпукло-плоскую линзу с «острым» краем, в которой радиус кривизны r_1 имел значение первого радиуса линз по варианту 1. ГОС с распределением ПП $n^{(1)}(z) = n_0 + n_1 z$ введена в пределах стрелки прогиба первой поверхности склеенного компонента (эта стрелка определяла осевую толщину d_1 ГОС); n_0 выбран из диапазона $[1,4; 2,0]$ с шагом 0,1. Однородная часть имела первую плоскую поверхность радиусом r_2 , а радиус r_3 второй поверхности и коэффициент n_1 в ОЛРПП определяли как результат синтеза из условий получения заданного значения фокусного расстояния линзы ($f' = 100$ мм) и устранения в ней сферической аберрации третьего порядка. ПП однородной части приравнивали к величине ПП градиентной части при $z = d_1$. Величину общей осевой толщины d склеенного компонента сохраняли равной 10 мм. Полученное решение соответствует варианту 1а.

Отметим, что при синтезе линз вариантов 1а и 1б введено ограничение на перепад показателя преломления $(\Delta n) = \pm 0,2$ с целью обеспечить технологически допустимые на сегодня параметры ГОС.

При анализе однородных и градиентных решений рассмотрены все монохроматические аберрации третьего порядка для трех положений входного зрачка $s_p = -15; 0; 15$ мм путем расчета аберраций по значениям соответствующих сумм с учетом условий нормировок [5] (положение s_p определено осевым расстоянием от первой поверхности линзы до центра входного зрачка).

Для оценки влияния осевой толщины по приведенному выше алгоритму также выполнен синтез и исследованы линзы аналогичных типов с $d = 30$ мм (варианты 2, 2а, 2б).

Расчет решений с коэффициентом $n_0 = 1,7$ в области реальных аберраций при $D/f' = 1:2$; $2\omega = 30^\circ$ проведен по программе ZEMAX. Для линз с $d = 10$ мм рассмотрены два положения входного зрачка $s_p = -15; 0$ мм, так как в приближении третьего порядка указанное изменение величины s_p оказывало заметное влияние на аберрационные коэффициенты. В представленные материалы включены также реальные аберрации, соответствующие линзам с $d = 30$ мм при расположении входного зрачка на расстоянии -15 мм. Это обеспечило возможность оценки влияния осевой толщины на значения реальных аберраций.

Конструктивные параметры синтезированных линз и связанные с ними особенности исследования. Значения конструктивных параметров линз вариантов 1 и 2, полученных в результате синтеза, представлены в [5]. В данной работе отметим некоторые особенности, необходимые для достижения сформулированных выше целей.

Стрелка прогиба первой поверхности и соответственно глубина градиентного слоя для линз вариантов 1а, 2а определены по формуле

$$s = |r_1| - \sqrt{r_1^2 - D^2/4}, \quad (3)$$

где r_1 — радиус первой поверхности однородных линз с минимумом сферической aberrации, мм; D — диаметр поверхности, мм, определенный для задаваемого относительного отверстия D/f' линзы (в данном случае при $D/f' = 1:2$). Значения стрелок приведены ниже:

n_0	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
s , мм	5,5681	5,0055	4,6189	4,3381	4,1261	3,9610

В табл. 1 представлены конструктивные параметры линз вариантов 1, 1а и 1б, полученных при $n_0 = 1,7$ и положениях входного зрачка $s_p = 0$ мм и $s_p = -15$ мм. Апертурные координаты меридиональных лучей широкого внеосевого пучка m рассчитаны с учетом наличия в линзах виньетирования k , возникающего при вынесенном в пространство предметов входном зрачке. Виньетирование связано с ограничением толщины градиентного слоя стрелкой фиксированной величины. Для сохранения в варианте 1а для широкого внеосевого пучка такого же относительного отверстия, что и указанное для осевого пучка в однородной линзе, требуется соответствующее увеличение диаметра градиентной линзы и, как следствие, глубины градиентного слоя. Таким образом, при повышении значений относительного отверстия, углового поля, выноса зрачка наблюдается тенденция трансформации варианта 1а градиентной линзы в вариант 1б.

Таблица 1

Конструктивные параметры сферической однородной линзы, рассчитанной на минимум сферической aberrации (вариант 1), и градиентных линз с ОЛРШ с исправленной сферической aberrацией (варианты 1а, 1б)

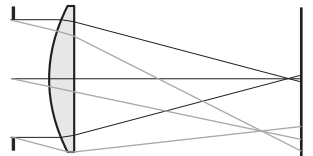
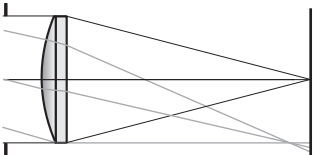
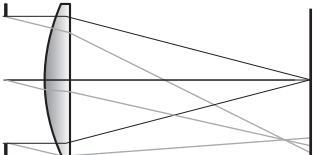
Вариант	Схема	r , мм	d , мм	n
1		69,967	10,0	1,7
		137812,519		
1а		69,967	4,62	$1,7 - 0,006z$
		∞	5,38	1,670
		131815,783		
1б		69,967	10,0	$1,7 - 0,006z$
		124901,965		

Таблица 2

Составляющие \bar{S}_I однородной линзы, рассчитанной на минимум сферической аберрации (вариант 1),
и градиентных линз с ОЛРПШ с исправленной сферической аберрацией (варианты 1а, 1б)

Составляющие \bar{S}_I	$n_0 = 1,5$			$n_0 = 1,7$			$n_0 = 1,9$		
	Вариант			Вариант			Вариант		
	1	1а	1б	1	1а	1б	1	1а	1б
$\bar{S}_I^{\text{одн}}(1)$	1,0871	1,0871	1,0871	0,7072	0,7072	0,7072	0,5294	0,5294	0,5294
$\bar{S}_I^{\text{неодн}}(1)$	-	-2,1034	-2,2113	-	-1,3217	-1,3217	-	-0,9649	-0,9837
$\bar{S}_I^{\text{одн}}(1) + \bar{S}_I^{\text{неодн}}(1)$	1,0871	-1,0163	-1,1242	0,7072	-0,6145	-0,6145	0,5294	-0,4356	-0,4543
$\bar{S}_I^{\text{одн}}(2)$	0,9966	1,0012	1,0081	0,6145	0,6022	0,5874	0,4352	0,4246	0,4088
$\bar{S}_I^{\text{неодн}}(2)$	-	-	0,0869	-	-	0,0000	-	-	0,0182
$\bar{S}_I^{\text{одн}}(2) + \bar{S}_I^{\text{неодн}}(2)$	0,9966	1,0012	1,0950	0,6145	0,6022	0,5874	0,4352	0,4246	0,4270
$\bar{S}_I^{\text{пер}}$	-	0,0151	0,0292	-	0,0123	0,0271	-	0,0110	0,0273
\bar{S}_I	2,0837	0,0000	0,0000	1,3217	0,0000	0,0000	0,9646	0,0000	0,0000

Итоговое значение первой суммы Зейделя \bar{S}_1 в линзе обеспечивается при определенном распределении отдельных составляющих этой суммы, которые при наличии градиентной среды подразделяются на однородно-поверхностные $\bar{S}_1^{\text{одн}(1)}$, $\bar{S}_1^{\text{одн}(2)}$, неоднородно-поверхностные $\bar{S}_1^{\text{неодн}(1)}$, $\bar{S}_1^{\text{неодн}(2)}$ вклады для каждой из рабочих поверхностей линзы и вклада переноса $\bar{S}_1^{\text{пер}}$ [10]. Значения этих составляющих для ряда линз вариантов 1, 1а, 1б представлены в табл. 2.

Семейство вариантов 1 (однородные линзы, рассчитанные на минимум сферической аберрации третьего порядка при $d = 10$ мм и $f' = 100$ мм) характеризуется изменением первой суммы Зейделя \bar{S}_1 в зависимости от значения ПП (рис. 2). В этом случае при возрастании n от 1,5 до 2,0 первая сумма убывает в диапазоне значений 2,0837...0,8505. Линзы имеют известную для рассматриваемого случая двояковыпуклую форму, которую при высоком различии в модулях значений радиусов кривизны поверхностей условно можно отнести к выпукло-плоской. При таких форме линз и расположении предмета в бесконечности поверхностные вклады в суммарное значение суммы \bar{S}_1 примерно одинаковы с некоторым превышением составляющей первой поверхности (см. рис. 2). При этом оптическая сила данной поверхности и ее относительное отверстие существенно превосходят соответствующие параметры второй поверхности, что послужило основанием для введения ГОС в область, прилегающую к первой, крутой и выпуклой, поверхности линзы.

Исследование составляющих суммы \bar{S}_1 для градиентных линз (см. табл. 2) показало, что в сферических линзах рассматриваемой формы определяющую роль в исправлении сферической аберрации третьего порядка (варианты 1а, 1б) играет неоднородно-поверхностный вклад; его значение в линзах сопоставляемых вариантов 1а и 1б практически одинаково. Однако здесь необходимо отметить, что в случае введения ГОС в пределах стрелки требуется меньшее изменение ПП, что является существенно положительным технологическим фактором (табл. 3).

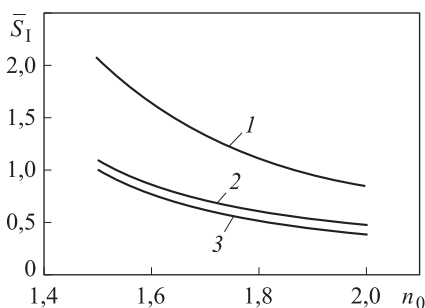


Рис. 2. Изменение первой суммы Зейделя и ее составляющих в базовой, рассчитанной на минимум сферической аберрации, однородной линзе с толщиной $0,1 f'$: 1 — S_1 линзы; 2 — S_1 на первой поверхности; 3 — S_1 на второй поверхности

Перепад показателя преломления в линзах с ОЛРПП

Коэффициент n_0	Вариант линзы		Коэффициент n_0	Вариант линзы	
	1а	1б		1а	1б
1,5	-0,040	-0,077	1,8	-0,026	-0,062
1,6	-0,034	-0,069	1,9	-0,024	-0,060
1,7	-0,030	-0,065	2,0	-0,022	-0,058

Аберрации третьего и высших порядков сферической однородной линзы, рассчитанной на минимум сферической аберрации, и базовых градиентных линз с ОЛРПП. В табл. 4 представлены монохроматические аберрации третьего порядка и реальные аберрации выбранных лучей для вариантов 1, 1а и 1б, полученных при $n_0 = 1,7$ и положениях входного зрачка $s_p = 0$ мм и $s_p = -15$ мм. В табл. 5 приведены аналогичные результаты расчета аберраций для линз вариантов 2, 2а, 2б при $s_p = 0$ мм и $s_p = -15$ мм.

Таблица 4

Аберрации линз (варианты 1, 1а, 1б) при $D/f' = 1:2$, $2\omega = 30^\circ$

Название аберрации		Порядок аберрации	Вариант линзы		
			1	1а	1б
Поперечная сферическая, мм, для $t = 25$ мм		3-й порядок	-1,0326	0	0
		Реальная	-1,1758	0,0033	0,0032
		$\partial W, \%$	12,18	-	-
Меридиональная кома, мм, для $k = 22 \%$, $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	0,2949	0,2950	0,2951
		Реальная	0,8946	0,6408	0,6407
		$\partial W, \%$	67,0	53,9	53,9
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-0,1495	0,2301	0,2302
		Реальная	-0,1543	0,2293	0,2292
		$\partial W, \%$	3,1	0,3	0,4
Астигматическая разность, мм, для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	6,5908	6,5910	6,5913
		Реальная	6,0823	6,0824	6,0825
		$\partial W, \%$	8,4	8,4	8,4
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	6,5475	6,3439	6,3441
		Реальная	5,9267	5,7453	5,7455
		$\partial W, \%$	10,5	10,4	10,4

Окончание табл. 4

Название аберрации		Порядок аберрации	Вариант линзы		
			1	1а	1б
Средняя кривизна изображения для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	-8,6066	-8,6068	-8,6071
		Реальная	-8,2433	-8,2434	-8,2436
		$\partial W, \%$	4,4	4,4	4,4
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-8,5633	-8,3596	-8,3598
		Реальная	-8,0796	-7,8883	-7,8884
		$\partial W, \%$	6,0	6,0	6,0
Дисторсия, %, для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	-0,1285	-0,1284	-0,1282
		Реальная	-0,1331	-0,1330	-0,1330
		$\partial W, \%$	3,5	3,5	3,6
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-1,8603	-1,8453	-1,8452
		Реальная	-2,0234	-2,0054	-2,0054
		$\partial W, \%$	8,1	8,0	8,0
<p>Примечания: 1. Стрелка первой поверхности в варианте 1 определена для относительного отверстия линзы $D/f' = 1:2$, что составляет 4,6189 мм. 2. В варианте 1а изменение ПП в пределах градиентного слоя равно $-0,030$. 3. В варианте 1б изменение ПП в пределах осевой толщины 10 мм равно $-0,065$.</p>					

Таблица 5

Аберрации линз (варианты 2, 2а, 2б) при $D/f'=1:2, 2\omega=30^\circ$

Название аберрации		Порядок аберрации	Вариант линзы		
			2	2а	2б
Поперечная сферическая, мм, для $t = 25$ мм		3-й порядок	-0,9710	0	0
		Реальная	-1,0999	0,0006	-0,0008
		$\partial W, \%$	11,7	-	-
Меридиональная кома, мм, для $k = 21 \%$, $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	0,1257	0,1238	0,1281
		Реальная	0,2327	0,2250	0,2257
		$\partial W, \%$	46,0	45,0	43,0
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-0,1598	0,1243	0,1281
		Реальная	-0,2054	0,1664	0,1671
		$\partial W, \%$	22,2	25,3	23,3

Название aberrации		Порядок aberrации	Вариант линзы		
			2	2а	2б
Астигматическая разность, мм, для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	5,9924	5,9943	5,9890
		Реальная	5,5043	5,5025	5,5000
		$\partial W, \%$	8,9	8,9	8,9
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	6,0153	5,8224	5,8200
		Реальная	5,4364	5,2631	5,2601
		$\partial W, \%$	10,65	10,63	10,64
Средняя кривизна изображения для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	-8,0168	-8,0194	-8,0203
		Реальная	-7,6610	-7,6603	-7,6604
		$\partial W, \%$	4,6	4,7	4,7
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-8,0340	-7,8478	-7,8513
		Реальная	-7,5847	-7,4033	-7,4060
		$\partial W, \%$	5,92	6,00	6,01
Дисторсия, %, для $\omega = -15^\circ$	$s_p = 0$ мм	3-й порядок	-0,4055	-0,4047	-0,4066
		Реальная	-0,4363	-0,4368	-0,4360
		$\partial W, \%$	7,1	7,3	6,7
	$s_p = -15$ мм	3-й порядок	-2,0753	-2,0610	-2,0600
		Реальная	-2,1863	-2,1697	-2,1691
		$\partial W, \%$	5,08	5,01	5,03
<p>Примечания: 1. Стрелка первой поверхности в варианте 2 определена для относительного отверстия линзы $D/f' = 1:2$, что составляет 4,6189 мм.</p> <p>2. В варианте 2а изменение ПП в пределах градиентного слоя равно -0,029.</p> <p>3. В варианте 2б изменение ПП в пределах осевой толщины 30 мм равно -0,19.</p>					

В табл. 4, 5 даны значения относительной доли ∂W aberrаций высших порядков, которая рассчитана по формуле

$$\partial W = \left| \frac{W_p - W_{3n}}{W_p} \right| \cdot 100, \quad (4)$$

где W_p — величина реальной aberrации; W_{3n} — величина aberrации третьего порядка. Значение ∂W можно использовать для количе-

ственной оценки влияния аберраций высших порядков на качество изображения, создаваемого линзой, и для оценки эффективности применения теории аберрацией третьего порядка для качественного анализа реальных аберраций решений с ОЛРПП.

Данные табл. 4 показывают, что в градиентных линзах с исправленной сферической аберрацией третьего порядка, полученных от исходной однородной линзы, которая рассчитана на минимум сферической аберрации третьего порядка, имеет место крайне низкий уровень сферической аберрации высших порядков. Результаты получены для достаточно высокого значения относительного отверстия ($D/f' = 1:2$), что позволяет считать ОЛРПП эффективным видом ОРПП для решения задачи устранения сферической аберрации.

Вклады аберраций высших порядков в меридиональную кому, астигматизм, среднюю кривизну и дисторсию для однородных и градиентных линз отличаются незначительно и имеют низкие значения. Исключение составляют аберрации высших порядков, уровень которых несколько больше для аберрации меридиональной комы при $s_p = 0$. Однако и в данном случае этот уровень во всех трех вариантах сохраняется достаточно постоянным и приемлемым.

Данные табл. 5 в целом подтверждают выводы, сделанные для линз толщиной 10 мм, а именно:

- 1) в градиентных линзах с исправленной сферической аберрацией третьего порядка уровень аберрации высших порядков незначителен;
- 2) высшие порядки рассматриваемых аберраций для однородных и градиентных линз мало отличаются от соответствующих аберраций третьего порядка и имеют низкие значения;
- 3) при $s_p = 0$ мм также наблюдается относительно высокая разница между меридиональной комой третьего порядка и реальным аналогом.

Сравнение данных табл. 4 и 5 позволяет сделать вывод о том, что увеличение толщины с 10 до 30 мм приводит к небольшому уменьшению реальных характеристик: сферической аберрации, меридиональной комы, астигматической разности и средней кривизны изображения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о достаточно адекватном описании аберрационных свойств градиентных линз с ОЛРПП аберрациями третьего порядка и могут служить основанием для обоснования применимости теории аберраций третьего порядка и ее методов для моделирования и анализа таких линз.

Суммы монохроматических аберраций третьего порядка рассчитанной на минимум сферической аберрации однородной линзы и базовых градиентных линз с ОЛРПП. Аберрационные свой-

ства базовых градиентных линз двояковыпуклой (близкой к выпукло-плоской) формы характеризуются представленными на рис. 3–5 графиками зависимостей их монохроматических сумм $\bar{S}_{II} - \bar{S}_{IV}$ от базового ПП n_0 , изменяемого в диапазоне значений 1,5...2,0. При указанных значениях базового ПП оптические элементы ориентированы на изготовление из оптических градиентных стекол или пластмасс. Графики $\bar{S}_j(n_0)$ при $j = II \dots V$ представлены для линз трех анализируемых вариантов с осевой толщиной $d = 0,1f'$ (семейство 1; заданная толщина соответствует условно тонкой линзе) и с осевой толщиной $d = 0,3f'$ для семейства 2 (толстые линзы). Исследованы градиентные линзы двух вариантов: с прилежащим к первой поверхности градиентным слоем («градиент на стрелке прогиба») и «градиент на всю толщину». Базой для сравнения являются значения одноименных сумм линзы с однородным ПП, рассчитанной на минимум сферической аберрации третьего порядка. Функции \bar{S}_{II} , \bar{S}_{III} и \bar{S}_{IV} рассмотрены при трех положениях входного зрачка $s_p = -15; 0; 15$ мм.

Согласно данным рис. 3–5, следует, что при расположении плоскости входного зрачка в вершине первой поверхности линзы значения $\bar{S}_j(n_0)$ у всех типов сравниваемых линз достаточно близки друг к другу. Например, в диапазоне значений коэффициента $n_0 \in [1,5; 2,0]$ изменение \bar{S}_{II} лежит в диапазоне:

- [0,1003; 0,1251] для линз варианта 1;
- [0,1012; 0,1251] для линз варианта 1а;
- [0,1031; 0,1227] для линз варианта 1б.

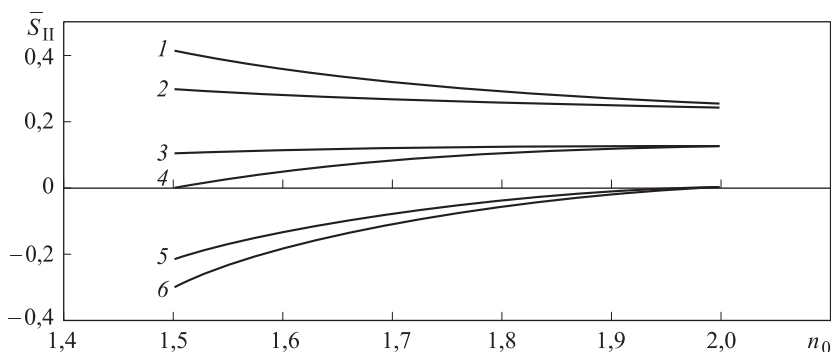


Рис. 3. Изменение второй суммы Зейделя линз семейств 1 и 2 в зависимости от s_p :

- 1 — однородная линза при $s_p = 15$ мм, $d = 10$ мм; 2 — однородная линза при $s_p = 15$ мм, $d = 30$ мм; 3 — градиентные и однородные линзы при $s_p = -15; 0; 15$ мм, $d = 10$ мм; 4 — градиентные и однородные линзы при $s_p = -15; 0; 15$ мм, $d = 30$ мм; 5 — однородная линза при $s_p = -15$ мм, $d = 10$ мм; 6 — однородная линза при $s_p = -15$ мм, $d = 30$ мм

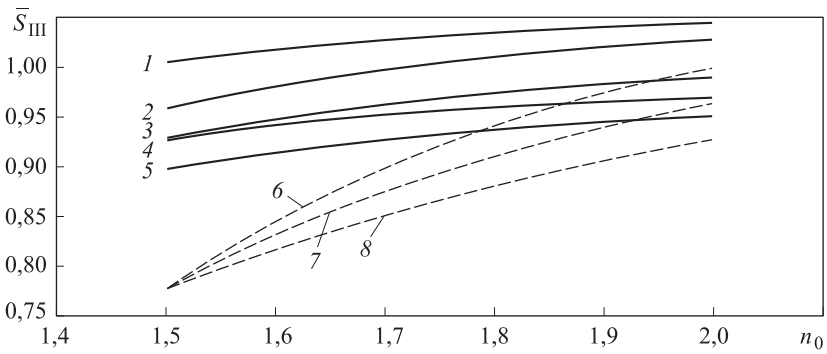


Рис. 4. Изменение третьей суммы Зейделя линз семейств 1 и 2 в зависимости от s_p :

1 — однородная линза при $s_p = 15$ мм, $d = 10$ мм; 2 — градиентные линзы при $s_p = 15$ мм, $d = 10$ мм; 3 — однородная и градиентные линзы при $s_p = 0$ мм, $d = 10$ мм; 4 — однородная линза при $s_p = -15$ мм, $d = 10$ мм; 5 — градиентные линзы при $s_p = -15$ мм, $d = 10$ мм; 6 — градиентные линзы при $s_p = 15$ мм, $d = 30$ мм; 7 — однородная и градиентные линзы при $s_p = 0$ мм, $d = 30$ мм; 8 — градиентные линзы при $s_p = -15$ мм, $d = 30$ мм

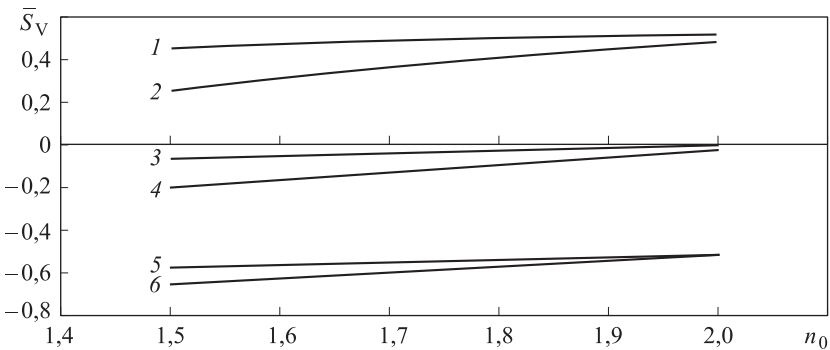


Рис. 5. Изменение пятой суммы Зейделя линз семейств 1 и 2 в зависимости от s_p :

1 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = 15$ мм, $d = 10$ мм; 2 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = 15$ мм, $d = 30$ мм; 3 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = 0$ мм, $d = 10$ мм; 4 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = 0$ мм, $d = 30$ мм; 5 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = -15$ мм, $d = 10$ мм; 6 — градиент на стрелке прогиба при $s_p = -15$ мм, $d = 30$ мм

Другими словами, при $s_p = 0$ градиентные с ОЛРПП линзы с исправленной сферической aberrацией в отношении комы, астигматизма, кривизны и дисторсии третьего порядка сохраняют свойства однородной линзы, рассчитанной на минимум сферической aberrации третьего порядка. При этом все рассматриваемые линзы имеют одинаковый радиус первой поверхности.

Вторая сумма градиентных линз не зависит от положения зрачка. При изменении базового ПП n_0 во всей области его допустимых зна-

чений вторая сумма тонких линз практически не изменяется и находится в диапазоне значений $0,1...0,13$. Меньшее значение соответствует меньшим значениям n_0 . Увеличение толщины линзы приводит к некоторому уменьшению положительных значений \bar{S}_{II} при усилении зависимости данной суммы от ПП в области его более низких значений. Описанный характер изменения второй суммы позволяет говорить о возможности получения в толстых градиентных линзах с ОЛРПП строгого апланатического решения в области aberrаций третьего порядка, при этом предпочтителен градиентный материал с низкими значениями n_0 (см. рис. 3).

Третья сумма тонких линз практически не зависит от n_0 и при положении плоскости входного зрачка в вершине первой поверхности линзы принимает значения в диапазоне значений $0,92...0,99$, несколько увеличиваясь с возрастанием базового ПП. Зависимость от n_0 усиливается в толстых линзах, для которых проходит общее уменьшение \bar{S}_{III} (диапазон значений $0,77...0,97$), более сильное в области низких значений n_0 . В линзах с отличным от нуля значением \bar{S}_{II} третья сумма зависит от положения входного зрачка и тем сильнее, чем больше значение второй суммы. Удаление входного зрачка вправо от линзы приводит к изменению \bar{S}_{III} в область положительных значений (см. рис. 4).

Четвертая сумма зависит от значения базового ПП, убывает при его возрастании для тонких линз в диапазоне значений $0,68...0,49$, для толстых линз — в диапазоне значений $0,69...0,47$. Конструкция градиентных линз на эту сумму не влияет.

Пятая сумма тонких линз при положении плоскости входного зрачка в вершине первой поверхности линзы принимает значения в диапазоне значений $-0,068...-0,005$, увеличиваясь по абсолютному значению с убыванием базового ПП. При смещении s_p от вершины первой поверхности между вариантами 1, 1а и 1б сохраняются небольшие различия в значениях \bar{S}_V и незначительная зависимость от n_0 (см. рис. 5). При этом при $s_p = 15$ мм дисторсия принимает положительные значения (порядка $0,50$), а при $s_p = -15$ мм — отрицательные (порядка $-0,57$). С увеличением осевой толщины зависимость \bar{S}_V от n_0 несколько усиливается. \bar{S}_V у толстых линз становится меньше при $s_p = 15$ мм и вырастает по абсолютной величине при $s_p = -15; 0$ мм.

Заключение. В результате данного исследования показана целесообразность использования ОЛРПП для исправления сферической aberrации в линзе, полученной на основе однородной линзы, которая рассчитана из условия минимальной сферической aberrации. ОЛРПП

может быть использована в пределах стрелки прогиба первой сферической поверхности или в пределах полной осевой толщины линзы. При этом с точки зрения величин аберраций оба вида градиентных линз не имеют существенных преимуществ друг перед другом. Линзы различаются по толщине градиентного слоя и величине изменения показателя преломления, т. е. по технологическим параметрам. По этим параметрам предпочтителен вариант с введением градиента ПП в пределах стрелки поверхности.

В сферической градиентной линзе с исправленной сферической аберрацией за счет применения ОЛРПП возможно получение решений с апланатической или близкой к ней коррекцией аберраций.

Осевую толщину линзы можно рассматривать в качестве коррекционного параметра преимущественно в элементах на основе материала с ОЛРПП с низкими значениями ПП. При этом обеспечивается положительный эффект получения апланатической степени коррекции и уменьшения третьей суммы Зейделя.

При моделировании градиентной линзы с ОЛРПП в области аберраций третьего порядка получают результаты, коррелированные с реальными аберрациями.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сеник Б.Н. *Технологические процессы изготовления точных градиентных и асферических элементов*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2002, 170 с.
- [2] Wade R.K., et al. Properties, specifications, and tolerances of GRADIUM® glasses. *Proc. SPIE*, 1997, vol. 3130, no. 63, pp. 63–74.
- [3] Сальников А.В., Лившиц И.Л. Классификация оптических систем, пригодная для организации базы данных. *Оптика–99: Сб. тр. МНТК*. Санкт-Петербург, 1999, с. 198–200.
- [4] Сальников А.В. *Анализ проблем формирования компьютерной элементной базы композиции оптических систем*. Дис. ... канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2008, 98 с.
- [5] Алимов А.Е. *Свойства базовых сферических линз с осевым распределением показателя преломления*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2012, 265 с.
- [6] Moore D.T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, vol. 61, no. 7, pp. 886–894.
- [7] Manhart P.K. Advantages of non-linear axial gradients in optical design. *Proc. SPIE*, 1993, vol. 2000, pp. 379–388.
- [8] Грейсх Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А. *Оптика градиентных и дифракционных элементов*. Москва, Радио и связь, 1990, 136 с.
- [9] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. *Теория оптических систем*. Москва, Машиностроение, 1992, 448 с.
- [10] Ровенская Т.С. *Методы проектирования оптических систем с градиентными элементами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994, 39 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ровенская Т.С., Алимов А.Е. Базовая сферическая линза с исправленной сферической абберацией путем применения градиентного материала с осевым линейным распределением показателя преломления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/942.html>

Ровенская Тамара Сергеевна родилась в 1947 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование оптико-электронных устройств и систем, абберационные расчеты оптических систем. e-mail: rovtvs@yandex.ru

Алимов Андрей Евгеньевич родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Канд. техн. наук, заместитель начальника оптического отдела Московского научно-исследовательского телевизионного института (ЗАО «МНИТИ»). Автор 20 научных публикаций. Область научных интересов: проектирование оптических систем с градиентными оптическими средами, разработка оптических систем различного назначения с повышенными характеристиками. e-mail: deminox@yandex.ru