

## ГРАДИЕНТНАЯ ЛИНЗА С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ ПОЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СХЕМАХ ОБЪЕКТИВА ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА И ОБЪЕКТИВА PIN HOLE

А. Л. СУШКОВ

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
105005, Москва, Россия  
E-mail: ale-sushkov@yandex.ru*

Представлены результаты исследования конструкции линзы и градиента показателя преломления, позволяющие получить нетипичную коррекцию кривизны поля изображения в положительной линзе. Полученные результаты использованы при конструировании оптических схем объектива эндоскопического типа и объектива Pin Hole.

**Ключевые слова:** линза, объектив, радиальный градиент показателя преломления, кривизна поля изображения

Согласно теории aberrаций оптических систем (ОС) [1, 2] плоский предмет, перпендикулярный к оптической оси, изображается ОС в виде кривой поверхности вследствие наличия aberrации кривизна поля изображения. При малых углах поля поверхность изображения является сфероидом, радиус кривизны которого можно определить по известной формуле [2]  $R_P = -1/S_{IVE}$ , где  $S_{IVE}$  — коэффициент aberrации кривизна поля изображения согласно теории aberrаций Зейделя.

При равенстве нулю коэффициента  $S_{IV}$  изображение будет плоским. Положительные линзы, как правило, имеют отрицательную меридиональную и сагитальную кривизну поля изображения, а отрицательные линзы — положительную. При определенном сочетании положительных и отрицательных линз в оптической системе можно получить плоское поле изображения. Однако принято считать, что в простейших оптических системах, состоящих из одиночной линзы в воздухе или склеенного из двух одиночных линз блока, эта aberrация неисправима.

Современными требованиями к оптическим приборам предписывается минимизация их массогабаритных параметров, что, как следствие, приводит к необходимости уменьшения числа линз, входящих в оптическую систему.

Представляется, что один из путей реализации этой концепции — применение при конструировании оптических систем радиально-градиентных линз.

В работе [3] показано, что, воспользовавшись формулами для коэффициентов aberrаций третьего порядка градиентных оптических систем на начальном этапе синтеза, можно получить значение коэффициента  $S_{IVE}$  (естественная нормировка параметров вспомогательных лучей), близкое к нулю, т.е. изображение в первом приближении будет плоским. Однако представляет интерес конструкция линзы, в которой кривизна поля изображения имеет положительное значение. У одиночных положительных однородных тонких линз кривизна поля изображения отрицательная, поэтому получение положительной кривизны является новой задачей в прикладной оптике, которая до сих пор не была исследована.

Одиночную линзу с радиальной неоднородностью показателя преломления (ПП) можно представить в виде эквивалентного по фокусному расстоянию компонента, состоящего из двух линз в воздухе [3]; первая линза такого компонента — однородная с радиусами кривиз-

ны  $r_1$ ,  $r_2$  и толщиной  $d$ , вторая — плоскопараллельная пластинка той же толщины с градиентным показателем преломления (линза Вуда), в которой распределение показателя преломления (РПП) задается одной из двух функций:

$$\begin{aligned} n(y) &= n_{00} + n_{10}y^2 + n_{20}y^4 + \dots, \\ n^2(y) &= n_{00}^2 (1 - g^2 y^2 + h_4 g^4 y^4 + h_6 g^6 y^6 + \dots). \end{aligned} \quad (1)$$

Оптическая сила такой линзы равна сумме оптических сил, обусловленных кривизной поверхностей однородной линзы, и оптической силы, обусловленной неоднородностью показателя преломления:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi}. \quad (2)$$

Если градиентная среда является фокусирующей, т.е.  $n_{10} < 0$  и  $\tilde{\Phi} > 0$ , то для исправления кривизны поля оптическая сила однородной линзы должна быть отрицательной [3].

Для линзы малой, но конечной толщины известно соотношение [3], связывающее фокусное расстояние  $f'$ , толщину  $d$ , радиус кривизны первой поверхности линзы  $r_1$  и величину коэффициента  $n_{10}$ , при котором линза имеет заданное значение коэффициента  $S_{IVк}$  (каноническая нормировка):

$$n_{10} = \frac{\frac{(n_{00} - 1)}{r_1^2 n_{00}} - \frac{1/f'}{d(n_{00} - 1)} - \frac{S_{IVк}}{f'} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{n_{00}}{d(n_{00} - 1)} \right)}{\frac{2}{n_{00}} + \frac{2d}{r_1 n_{00}^2}}, \quad (3)$$

где  $n_{00}$  — показатель преломления на оси линзы.

Формула (3) дает первое приближение для расчета требуемого значения коэффициента  $S_{IVк}$ , точность ее увеличивается с уменьшением толщины линзы.

В табл. 1 приведены результаты расчета по формуле (3) параметров радиально-градиентной линзы по заданным значениям  $n_{00}$ ,  $r_1$ ,  $d$ ,  $S_{IVк}$  и  $f'$ . В таблице приняты следующие обозначения:  $f'_G$ ,  $f'_H$  — фокусные расстояния линзы при наличии и отсутствии градиента ПП;  $t$  — константа распределения показателя преломления радиально-градиентной среды ( $t = (-2n_{10}/n_{00})^{0,5}$ , мм<sup>-1</sup>);  $s_p$  — удаление входного зрачка,  $y'$  — диагональ изображения,  $Z'_m$ ,  $Z'_s$  — астигматические отрезки,  $S_{IVк}$  — коэффициент кривизны поля линзы с однородным ПП в канонической нормировке параметров вспомогательных лучей.

Таблица 1

№ П/П	$S_{IVк}$	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$d$ , мм	$f'_G$ , мм	$n_{10}$ , мм	$t$ , мм <sup>-1</sup>	$s_p$ , мм	$y'$ , мм	$Z'_m$ , мм	$Z'_s$ , мм	$S_{IVк}$	$f'_H$ , мм
<b><math>n_{00} = 1,7849, f' = 30,0</math> мм, <math>\omega = 12^\circ</math></b>													
1	-0,4	-4,356	-7,5169	1,55	28,666	-0,02992	0,183114	-2,0	-6,350	-0,740	-0,081	0,714	-16,83
2	-0,3	“	-6,469	“	29,222	-0,02362	0,162687	“	“	1,05	0,477	0,826	-25,07
3	-0,2	“	-5,6788	“	29,64	-0,01732	0,139295	“	“	2,226	0,807	1,155	-49,15
4	-0,1	“	-5,060	“	29,95	-0,01101	0,111082	“	“	2,580	0,873	16,95	-1205,6
5	0,0	“	-4,563	“	30,06	-0,0047079	0,072631	“	“	2,03	0,650	-0,245	53,46
6	0,1	“	-4,1548	“	29,967	0,00159625	0,042292	“	“	0,535	0,120	0,127	26,119
7	0,2	“	-3,8137	“	29,730	0,0079004	0,094088	“	“	-1,762	-0,721	0,248	17,293
8	0,3	“	-3,5244	“	29,334	0,0142046	0,12616	“	“	-4,637	-1,866	0,266	15,944
<b><math>n_{00} = 1,6000, f' = 20,0</math> мм, <math>\omega = 18^\circ</math></b>													
9	0,5	-6,3736	-4,1059	2,0	19,756	0,0047970	0,077436	-4,6	-6,156	-9,717	-4,558	0,64	14,453
10	0,4	“	-5,017	“	20,088	-0,0026181	0,057206	“	“	0,282	-0,157	0,402	25,298
11	0,3	“	-6,4478	“	20,160	-0,0100300	0,111971	“	“	5,422	1,341	-0,068	101,35
12	0,2	“	-9,020	“	19,971	-0,0174500	0,147690	“	“	0,931	0,154	0,872	-50,52
13	0,1	“	-15,008	“	19,536	-0,0248637	0,176294	“	“	-6,732	-2,949	0,684	-20,22
14	0,5	6,3736	10,136	“	20,080	-0,00202286	0,050285	4,6	“	-0,458	-0,463	0,521	23,858
15	0,3	“	6,3246	2,0	20,160	-0,00989120	0,111193	4,6	“	1,663	0,271	-0,043	95,84

Продолжение табл. 1

№ П/П	$S_{IVK}$	$r_1$ , мм	$r_2$ , мм	$d$ , мм	$f'_G$ , мм	$n_{10}$ , мм	$t$ , мм <sup>-1</sup>	$S_p$ , мм	$y'$ , мм	$Z'_m$ , мм	$Z'_s$ , мм	$S_{IVK}$	$f'_H$ , мм
16	0,1	“	4,5964	“	19,860	-0,01775954	0,148994	8,6	“	11,187	2,474	1,081	-47,53
17	“	“	“	“	“	“	“	4,6	“	1,998	0,488	“	“
18	“	“	“	“	“	“	“	3,6	“	0,741	0,135	“	“
19	0,0	“	4,044	“	19,594	-0,02169	0,164658	“	“	0,599	0,157	0,9217	-27,19
20	-0,1	“	3,6099	“	19,240	-0,02562788	0,178982	“	“	0,279	0,122	0,858	-19,04
21	-0,2	“	3,2601	“	18,817	-0,029562	0,19223	“	“	-0,172	0,042	0,823	-14,65
<b><math>n_{00}=1,6000, f'=10,0</math> мм, <math>\omega=19^\circ</math></b>													
22	-0,20	-2,00	-4,687	2,0	9,008	-0,056000	0,264575	-2,0	-3,0	1,484	0,489	0,866	-8,064
23	-0,10	“	-2,481	“	9,970	-0,0168889	0,145297	“	-3,0	5,992	1,643	-1,121	30,819
24	-0,05	“	-2,009	“	9,978	0,00266667	0,057735	“	“	-8,259	-3,942	-0,0075	9,035
<b><math>n_{00}=1,6000, f'=3,0</math> мм, <math>\omega=21^\circ</math></b>													
25	0,20	-1,800	-4,9554	1,4	2,947	-0,1822394	0,477283	-0,5	-1,2	-0,039	-0,045	0,749	-5,651
26	0,26	“	-2,0896	“	3,096	-0,105637	0,36338	“	“	0,683	0,159	-0,769	26,63
27	0,27	“	-1,9059	“	3,104	-0,09287	0,34071	“	“	0,700	0,162	-0,158	13,642
28	0,28	“	-1,7519	“	3,106	-0,080103	0,31643	“	“	0,666	0,150	0,052	9,170
29	0,30	“	-1,5082	“	3,095	-0,0545689	0,26117	-0,5	“	0,414	0,075	0,223	5,539

Цель исследования — выявление типа конфигурации поверхностей линзы и ее параксиальных характеристик, а также определение градиента ПП (коэффициента  $n_{10}$ ), при которых радиально-градиентная линза имеет заданное фокусное расстояние и положительную кривизну изображения.

Рассмотрены линзы с фокусными расстояниями 30, 20, 10 и 3,0 мм с вогнутой и выпуклой поверхностями со стороны предмета. При анализе результатов синтеза особое внимание было обращено на минимальное отклонение фокусного расстояния синтезированной линзы от заданного, фокусирующий тип градиента ПП ( $n_{10} < 0$ ) и положительные величины астигматических отрезков  $Z'_m, Z'_s$ .

Анализ табл. 1 показывает, что при синтезе положительной тонкой линзы с фокусным расстоянием  $f' = 30$  мм с вогнутой передней поверхностью и входным зрачком, расположенным перед линзой, диапазон значений коэффициента  $S_{IVK}$ , при котором отклонения значения фокусного расстояния от заданного не превышают  $\pm 5\%$  и астигматические отрезки положительны, составляет  $-0,3 \dots 0,1$ . При  $f' = 20$  мм рассмотрены две конфигурации передней поверхности линзы: вогнутая и выпуклая. При вогнутой фронтальной поверхности (входной зрачок перед ней) коэффициент  $S_{IVK}$  находится в диапазоне  $0,2 \dots 0,4$ , при выпуклой фронтальной поверхности — в диапазоне  $0,1 \dots 0,3$ . При  $f' = 10,0$  мм и вогнутой передней поверхности с радиусом кривизны  $r_1 = -2,0$  мм имеем положительную кривизну поля при  $S_{IVK}$  в диапазоне около  $-0,20 \dots -0,05$ . Короткофокусная линза с  $f' = 3,0$  мм с передним радиусом кривизны  $r_1 = -1,8$  мм имеет положительную кривизну поля изображения при  $S_{IVK}$  в диапазоне  $0,3 \dots 0,26$ .

Еще одной особенностью синтеза радиально-градиентной линзы является вычисление требуемого фокусного расстояния при значениях ее конструктивных параметров, существенно отличающихся от полученных при отсутствии неоднородности ПП, что видно из сравнения граф таблицы, в которых приведены рассчитанные значения фокусных расстояний градиентной  $f'_G$  и однородной  $f'_H$  линзы. Таким образом, положительные значения астигматических отрезков  $Z'_m, Z'_s$  получают, когда  $r_1$  и  $r_2$  одного знака и близки по значению; при этом существует параметрическое поле  $r_1, r_2, n_{10}$ , в пределах которого  $Z'_m, Z'_s > 0$ .

**Пример 1. Оптическая схема эндоскопа.** Градиентная линза с положительной кривизной изображения использована при проектировании оптической схемы эндоскопа. Как было отмечено ранее, трудноисправимой aberrацией в оптической схеме эндоскопа с увеличенной

длиной является кривизна поля изображения, что связано с наличием в схеме эндоскопа значительного количества положительных линзовых или градановых компонентов [4].

Для минимизации кривизны поля изображения необходимо включить в оптическую схему эндоскопа один или несколько компонентов с положительной кривизной поля изображения. Это может быть головной объектив специальной конструкции, а также градиентный компонент с положительной кривизной поля, входящий в оптическую систему переноса изображения (градан — транслятор). Ниже приведены предварительные результаты проектирования оптической схемы эндоскопа, в котором градиентными линзами с положительной кривизной поля изображения являются объектив (поз. 26 в табл. 1) и последний компонент градановой оптической системы переноса изображения. Параметры градиентной среды градана — транслятора: показатель преломления на оси  $n_{00} = 1,6$ , константа распределения  $g=0,0628318 \text{ мм}^{-1}$ , абберационный коэффициент  $h_4=0,00$ . Следует отметить, что данное значение коэффициента  $h_4$  обеспечивает при телецентрическом ходе второго вспомогательного луча отсутствие в градане астигматической разности третьего порядка, присутствует только кривизна поля изображения Петцваля.

Конструктивные параметры дистальной части эндоскопа приведены в табл. 2.

Таблица 2

$r$ , мм	$d$ , мм	$n_{00}$	$n_{10}, g, \text{мм}^{-1}, h_4$
$r_1 = -1,800$	1,4	1,6000	$n_{10} = -0,105637$
$r_2 = -2,089$	3,5	1	—
$r_3 = 0,000$	25,0	1,6000	$g=0,0628318, h_4=0,0$
$r_4 = 0,0$	0,0	1	—
$r_5 = 0,000$	100,0	1,6000	$g=0,0628318, h_4=0,0$
$r_6 = 0,000$	2,0	1,0	—
$r_7 = 3,186$	1,0	1,6000	$n_{10} = -0,071038$
$r_8 = 2,298$	8,413	1	—

Использование линзы с положительной кривизной поля изображения в качестве головного объектива позволило получить следующие характеристики эндоскопического объектива (ЭО, вариант 1): фокусное расстояние  $f' = 3,11 \text{ мм}$ , задний фокальный отрезок  $s'_{F'} = 8,413 \text{ мм}$ , удаление входного зрачка  $s_p = -2,0 \text{ мм}$ , угловое поле  $2\omega = 40^\circ$ , диагональ изображения  $2y' = 2,2 \text{ мм}$ , дисторсия 9,32 %; сферическая абберация для края входного зрачка с координатой  $m_{\text{зр}} = 0,4 \text{ мм}$  равна  $\Delta s' = -0,156 \text{ мм}$ , астигматические отрезки на краю поля:  $Z'_m = 0,346 \text{ мм}$ ,  $Z'_s = -0,153 \text{ мм}$ .

При использовании в качестве головного объектива градиентной линзы с малой отрицательной кривизной изображения (поз. 25 в табл. 1, ЭО, вариант 2) имеем большие значения астигматических отрезков: на краю поля  $Z'_m = -1,47 \text{ мм}$ ,  $Z'_s = -0,75 \text{ мм}$ , при этом фокусное расстояние и фокальный отрезок незначительно отличаются от этих параметров ЭО, вариант 1.

Значения контраста изображения ( $K$ ) в функции пространственной частоты в центре и по полю изображения для 1-го и 2-го вариантов эндоскопического объектива приведены в табл. 3 ( $y'$  в мм).

Таблица 3

Параметр	Вариант 1				Вариант 2			
	$y' = 0$	$y' = 0,5y'_{\text{max}}$	$y' = 0,7y'_{\text{max}}$	$y'_{\text{max}}$	$y' = 0$	$y' = 0,5y'_{\text{max}}$	$y' = 0,7y'_{\text{max}}$	$y'_{\text{max}}$
$N, \text{мм}^{-1}$	50	50	35	15	50	50	35	15
$K$	0,27	0,34	0,20	0,15	0,32	0,07	0,1	0,07

Как видно из табл. 3, разрешающая способность ( $N$ ) ЭО (вариант 1) плавно изменяется от  $50 \text{ мм}^{-1}$  в центре до  $15 \text{ мм}^{-1}$  на краю поля; в ЭО, вариант 2, в центре поля изображения  $N \approx 50 \text{ мм}^{-1}$ , а на краю поля  $N \ll 15 \text{ мм}^{-1}$ , что вызвано резким падением контраста изображения до 0,1.

**Пример 2.** Проектирование объектива *Pin Hole*. Необычные свойства линзы с радиальным градиентом ПП продемонстрировали возможность создания объектива *Pin Hole* с высокой разрешающей способностью по всему полю изображения. Конструктивные параметры объектива приведены в табл. 4.

Таблица 4

$r$ , мм	$d$ , мм	$n_{00}$	$n_{10}$ , мм <sup>-2</sup>
$r_1 = -2,421$	0,99	1,66	0,0
$r_2 = -1,294$	0,25	1,0	—
$r_3 = -1,117$	0,67	1,65	0,0
$r_4 = -3,02$	0,08	1,0	—
$r_5 \Rightarrow \infty$	1,2	1,44	0,0
$r_6 = -2,429$	0,08	1,0	—
$r_7 = 4,446$	1,69	1,55	0,0
$r_8 = 2,168$	1,23	1,66	0,0
$r_9 = 6,400$	—	1,0	—

Параметры объектива:  $f' = 3,18$  мм,  $s'_{F'} = 1,89$  мм,  $s_p = -0,6$  мм,  $D_{зр} = 0,7$  мм,  $2\omega = 79^\circ$ , дисторсия  $-30,7\%$ ,  $2y' = 3,64$  мм. Разрешающая способность по полю изображения: в центре поля более  $60$  мм<sup>-1</sup>, в зоне поля  $45$  мм<sup>-1</sup>, на краю поля  $25$  мм<sup>-1</sup>. Как видно, разрешающая способность объектива на краю поля существенно уменьшается по сравнению с центром.

С целью изучения коррекционного потенциала оптической схемы при использовании градиентных линз первая однородная линза была заменена на радиально-градиентную (поз. 29 в табл. 1).

Конструктивные параметры объектива для этого варианта приведены в табл. 5.

Таблица 5

$r$ , мм	$d$ , мм	$n_{00}$	$n_{10}$ , мм <sup>-2</sup>
$r_1 = -1,878$	1,4	1,6	$-0,0545689$
$r_2 = -3,284$	0,25	1	—
$r_3 = 2,175$	0,67	1,65	0,0
$r_4 = -2,965$	0,08	1	—
$r_5 = 23,217$	1,2	1,44	0,0
$r_6 = -3,617$	0,08	1,0	—
$r_7 = 3,839$	1,69	1,55	0,0
$r_8 = 2,533$	1,23	1,66	0,0
$r_9 = 4,520$	—	1,0	—

Параметры объектива:  $f' = 3,14$  мм,  $s'_{F'} = 1,80$  мм,  $s_p = -0,6$  мм,  $D_{зр} = 0,7$  мм,  $2\omega = 90^\circ$ , дисторсия  $-37,3\%$ ,  $2y' = 4,0$  мм.

Применение градиентной линзы позволило существенно исправить кривизну поля изображения даже при несколько увеличенном поле. Разрешающая способность в пределах всего поля изображения не менее  $150$  мм<sup>-1</sup>.

Согласно результатам исследования при необходимом радиальном градиенте ПП при менисковой поверхности линзы можно получить требуемое фокусное расстояние. Тонкие линзы с такими характеристиками не могут быть реализованы на основе однородных оптических стекол.

Основываясь на приведенных примерах, можно утверждать, что представляется перспективным применение радиально-градиентных линз в схемах жестких эндоскопов с целью коррекции кривизны поля при значительной длине дистальной части эндоскопа, а также в схемах малогабаритных фото- и ТВ-объективов с повышенным качеством изображения по всему полю.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. М.: Машиностроение, 1969. 550 с.

2. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. Л.: Искусство, 1972. 650 с.
3. Сушков А. Л. Коррекция кривизны поля изображения линзы с радиальной неоднородностью показателя преломления // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 60—65.
4. Сушков А. Л. Монохроматические аберрации градиентов как базовых элементов жестких эндоскопов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 44 с.

**Сведения об авторе****Александр Леонидович Сушков**

— канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана; кафедра лазерных и оптико-электронных систем; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерных и оптико-электронных системПоступила в редакцию  
24.04.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Сушков А. Л. Градиентная линза с положительной кривизной поля изображения в схемах объектива эндоскопического типа и объектива Pin Hole // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11. С. 1054—1059.

**GRADIENT LENS WITH A POSITIVE IMAGE CURVATURE IN OPTICAL SCHEMES OF ENDOSCOPIC TYPE AND PIN HOLE LENSES****A. L. Sushkov***Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia  
E-mail: ale-sushkov@yandex.ru*

Analysis of refractive index gradient and design of a positive lens providing atypical correction of image field curvature is presented. The results are employed in design of optical schemes of endoscopic type and Pin Hole lenses.

**Keywords:** lens, radial gradient of the refractive index, image field curvature

**Data on author**

**Aleksander L. Sushkov** — PhD, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Department of Laser and Optoelectronic systems; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

**For citation:** Sushkov A. L. Gradient lens with a positive image curvature in optical schemes of endoscopic type and Pin Hole lenses. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 11. P. 1054—1059 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1054-1059