

КОМПОЗИЦИЯ И РАСЧЕТ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ГРАДИЕНТНЫМИ И ДИФРАКЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Г. И. Грейсх¹, Е. Г. Ежов², С. А. Степанов¹

¹Государственная архитектурно-строительная академия, e-mail: postmaster@pgasa.penza.com.ru

²Институт систем обработки изображений РАН

Излагаются принципы композиции, методы расчета и оптимизации высокоразрешающих оптических систем, выполненных на основе градиентных и дифракционных элементов. Приведен пример их использования при проектировании гибридного объектива-монохромата.

1. Введение

Аберрационные свойства и коррекционные возможности градиентных и дифракционных элементов хорошо изучены [1-3]. Это позволяет при компоновке исходной схемы оптической системы из таких элементов использовать подход, при котором в нее включают лишь те элементы, свойства и возможности которых необходимы, а количество достаточно для удовлетворения требований, предъявляемых к разрабатываемой системе. Эффективность подхода и относительная простота его реализации обусловлены спецификой аберрационных свойств градиентных и дифракционных элементов. Во-первых, сходимость аберрационного разложения чисто градиентной, дифракционной или гибридной градиентно-дифракционной системы, выбранной в соответствии с вышеизложенным подходом в качестве исходной, такова, что устранение аберраций каждого последующего порядка приводит к ощутимому улучшению оптических характеристик. Во-вторых, градиентные и дифракционные линзы позволяют осуществлять селективную коррекцию аберраций различных порядков, что достигается с помощью коэффициентов рядов, описывающих законы изменения показателей преломления материалов градиентных линз и пространственных частот микроструктур дифракционных линз.

Здесь предполагается, что распределения показателя преломления градиентной линзы и пространственной частоты дифракционной линзы описываются выражениями вида

$$n(\rho) = \sum_{p=0} n_p \rho^{2p}, \quad (1)$$

$$\Omega(\rho) = \frac{1}{\lambda_0} \left[\Phi_{DL} \rho - 2 \sum_{p=0} (p+2) b_{2p+3} \rho^{2p+3} \right]. \quad (2)$$

В этих выражениях ρ - расстояние от оптической оси; n_p при $p=0$ - базовый показатель преломления; n_p при $p=1, 2, \dots$ - коэффициенты радиального градиента; $\Phi_{DL} = 1/f'_{DL}$ - оптическая сила дифракционной линзы; λ_0 - длина волны записи; b_{2p+3} - коэффициенты асферической деформации эйконала записи [1-3].

2. Компоновка исходных схем

Из изложенного во введении следует, что требования к разрабатываемой системе целесообразно выражать через аберрации, подлежащие устранению. Например, если у системы потребовать полное и одновременное устранение всех монохроматических аберраций третьего порядка, то почти автоматически при-

ходим к следующим возможным схемным решениям: двухлинзовый дифракционный объектив [1]; объектив, состоящий из дифракционной и градиентной линз [2,3]; склеенная линза Вуда (т.е. оптический элемент, имеющий плоские внешние преломляющие поверхности и изготовленный из двух неоднородных материалов, разделенных сферической поверхностью склейки) [4] и компонент, состоящий из трех склеенных плоскопараллельных пластин, выполненных из двух неоднородных материалов [5].

Поставив задачу одновременного устранения у системы монохроматических аберраций третьего и пятого порядков, приходим к триплету, склеенному из неоднородных линз, ограниченных сферическими преломляющими поверхностями [6,7]; компоненту, состоящему из четырех склеенных неоднородных плоскопараллельных пластин [8]; склеенной линзе Вуда, у которой на плоских внешних поверхностях размещаются кольцевые микроструктуры дифракционных линз и к объективу, состоящему из трех плоских дифракционных линз, разделенных двумя неоднородными материалами.

3. Определение исходных конструктивных параметров

Конкретные значения конструктивных параметров всех вышепересмотренных схем можно получить, решив систему, включающую соответствующие параксиальные и компенсационные уравнения. При этом, как правило, количество параметров превышает число решаемых уравнений и, следовательно, имеется определенная свобода выбора значений некоторых конструктивных параметров. Они могут выбираться исходя, например, из требований и ограничений, априори накладываемых на задний фокальный отрезок системы, перепады показателей преломления неоднородных материалов, максимальные значения пространственных частот структур дифракционных линз, кривизны сферических преломляющих поверхностей, толщины линз и т.д. Однако если, в конечном счете, требуется получить оптическую систему с предельными для выбранного количества используемых элементов полевыми характеристиками, то набор значений вышеуказанных свободных параметров должен обеспечить исходной схеме минимально возможный уровень остаточных аберраций высших порядков.

Поиск такого набора целесообразно производить в два этапа. На первом этапе определяются границы начальной зоны поиска, исходя из известных ограничений на значения свободных параметров, и

выбирается шаг для каждого из свободных параметров, что должно обеспечить оптимальный баланс между временем и точностью поиска. Результатом этого этапа поиска явится база начальных решений. На втором этапе, по результатам лучевого расчета, выделяются решения, обеспечивающие при выбранной числовой апертуре и в пределах заданного полевого угла наименьший уровень остаточных aberrаций высших порядков.

4. Оптимизация

Выделенные решения используются в качестве исходных при последующей лучевой оптимизации. В общем случае ее осуществляют по положению входного зрачка, коэффициентам радиального градиента всех неоднородных материалов и по коэффициентам рядов, описывающих законы изменения пространственных частот микроструктур дифракционных линз. При этом оптимизация производится по коэффициентам рядов, влияющим на aberrации, начиная с того порядка малости в aberrационном разложении, который не учитывался при составлении компенсационных уравнений.

Оптимизацию, как показала практика расчетов, целесообразно осуществлять специально адаптированным методом Ньютона с использованием двух лучевых функций оценки качества точечного изображения Q_1 и Q_4 , вычисляемых для ряда полевых углов, число которых равно числу оптимизируемых параметров. Функция Q_1 , представляющая собой нормированный на рэлеевское разрешение объектива δ_R средний радиус пятна рассеяния лучей и монотонно убывающая с уменьшением уровня остаточных aberrаций, используется для построения целевой функции, а функция, на которой базируется наиболее достоверный из лучевых критериев оценки качества $Q_4 \geq 0,7$, - для выработки команды завершения процесса оптимизации [7]. Выбор наилучшего решения и окончательная аттестация объектива, включающая оценку размера поля, в пределах которого точечное изображение близко к дифракционно-ограниченному, осуществляется по картине распределения интенсивности в дифракционном изображении точки. Для этого, в частности, используется критерий $E(\delta_R) \geq 0,73$, ограничивающий снизу относительную энергию, приходящуюся на центральный кружок дифракционного изображения радиусом δ_R , и гарантирующий, что изображение практически не отличается от дифракционно-ограниченного [1,3,9].

5. Высокоразрешающий гибридный объектив-монохромат

На рис.1 представлена оптическая схема гибридного объектива-монохромата, состоящего из градиентного элемента, имеющего плоские внешние поверхности и изготовленного из двух различных неоднородных материалов с радиальными распределениями показателей преломления, разделенных сферической поверхностью склейки, на внешние по-

верхности которого нанесены структуры дифракционных линз. Количество коррекционных параметров объектива таково, что их в принципе более чем достаточно для полного и одновременного устранения всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков. Однако, как показали предварительные исследования, aberrации высших порядков могут быть снижены до приемлемого уровня лишь в том случае, когда одна из aberrаций пятого порядка и, в частности, дисторсия остается не устраненной.

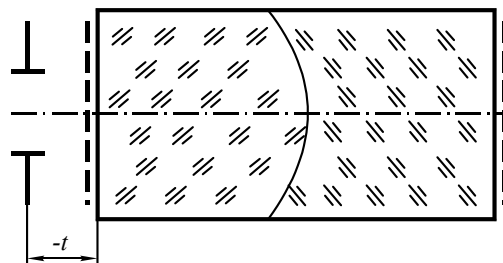


Рис. 1. Дифракционно-градиентный объектив.

При расположении предмета в бесконечности и в приближении aberrаций не выше пятого порядка, оптические характеристики этого объектива определяются 17 параметрами. В это число входят оптические силы дифракционных линз $\Phi_{DL}^{(m)} = 1/f_{DL}^{(m)}$, коэффициенты асферической деформации их эйконолов записи $b_3^{(m)}$ и $b_5^{(m)}$, радиус сферической поверхности склейки r , толщины неоднородных материалов d_m , их базовые показатели преломления $n_0^{(m)}$ и коэффициенты радиального градиента $n_p^{(m)}$ ($m=1-2, p=1-3$).

В данный набор параметров не вошло расстояние t , определяющее положение входного зрачка, поскольку, если в оптической системе все монохроматические aberrации данного порядка устранены при некотором положении зрачка, то они отсутствуют и при любом другом его положении.

Обратимся теперь к системе уравнений, которую следует решить для определения вышеперечисленных параметров. В нее входят два параксиальных уравнения для фокусного расстояния объектива и для заднего фокального отрезка, а также 13 компенсационных уравнений, обеспечивающих обнуление пяти коэффициентов монохроматических aberrаций третьего порядка и восьми из девяти коэффициентов пятого порядка. При решении системы целесообразно положить фокусное расстояние объектива $f'=1$, а задний фокальный отрезок s'_F и базовые показатели преломления неоднородных материалов $n_0^{(m)}$ считать свободными параметрами.

Явный вид уравнений, обеспечивающих единичное фокусное расстояние и заданное значение заднего фокального отрезка, легко получить, воспользовавшись аппаратом гауссовых коэффициентов [10, 11, 2]. В результате имеем

$$\begin{aligned}
& 1 - \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 \Phi_{CS} \beta_2 \Phi_{DL}^{(2)} + \\
& + \alpha_1 \Phi_{DL}^{(1)} \beta_2 \Phi_{DL}^{(2)} + \alpha_1 \Phi_{CS} \beta_2 \Phi_{DL}^{(2)} + \\
& + \alpha_2 \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 \Phi_{CS} + \alpha_2 \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 \Phi_{DL}^{(2)} - \\
& - \alpha_1 \alpha_2 \Phi_{DL}^{(1)} - \alpha_1 \alpha_2 \Phi_{CS} - \\
& - \alpha_1 \alpha_2 \Phi_{DL}^{(2)} - \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 \gamma_2 - \\
& - \beta_2 \Phi_{DL}^{(2)} \gamma_1 + \alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 \gamma_1 = 0 \quad ; \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
s'_F = & \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 \Phi_{CS} \beta_2 - \alpha_1 \Phi_{DL}^{(1)} \beta_2 - \alpha_1 \Phi_{CS} \beta_2 - \\
& - \alpha_2 \Phi_{DL}^{(1)} \beta_1 + \beta_2 \gamma_1 + \alpha_1 \alpha_2 \quad . \quad (4)
\end{aligned}$$

Здесь $\Phi_{CS} = (n_0^{(2)} - n_0^{(1)})/r$ - оптическая сила поверхности склейки; $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$ - гауссовы коэффициенты m -ого неоднородного материала:

$$\left. \begin{aligned}
\alpha_m &= F_1^{(m)} \left(d_m \sqrt{|\bar{n}_1^{(m)}|} \right) \\
\beta_m &= \frac{F_2^{(m)} \left(d_m \sqrt{|\bar{n}_1^{(m)}|} \right)}{n_0^{(m)}} \\
\gamma_m &= 2n_0^{(m)} n_1^{(m)} \beta_m
\end{aligned} \right\} , \quad (5)$$

где $F_1(\dots)$ и $F_2(\dots)$ - функции вида

$$\left. \begin{aligned}
F_1(d\sqrt{|\bar{n}_1|}) &= \begin{cases} \cos(d\sqrt{-\bar{n}_1}), (n_1 \leq 0) \\ \text{ch}(d\sqrt{\bar{n}_1}), (n_1 > 0) \end{cases} \\
F_2(d\sqrt{|\bar{n}_1|}) &= \begin{cases} \frac{\sin(d\sqrt{-\bar{n}_1})}{\sqrt{-\bar{n}_1}}, (n_1 \leq 0) \\ \frac{\text{sh}(d\sqrt{\bar{n}_1})}{\sqrt{\bar{n}_1}}, (n_1 > 0) \end{cases} , \quad (6)
\end{aligned} \right.$$

$$\bar{n}_1 = 2n_1/n_0 \quad . \quad (7)$$

Из всех компенсационных уравнений третьего и пятого порядков, наиболее простой вид имеет уравнение, обеспечивающее выполнение у объектива условия Петцваля, которое, в силу автоматического выполнения этого условия у дифракционных линз, сводится к требованию его выполнения только у склеенного градиентного элемента [4]:

$$2n_0^{(1)} n_0^{(2)} \sum_{m=1}^2 \left[n_1^{(m)} d_m / (n_0^{(m)})^2 \right] - \Phi_{CS} = 0 \quad . \quad (8)$$

Оставшиеся четыре компенсационных уравнения, определяющие условия устранения у объектива сферической aberrации, комы, астигматизма и дисторсии третьего порядка, а также уравнения, обеспечивающие устранение любых четырех aberrаций пятого порядка, имеют следующую структуру:

$$\begin{aligned}
& B_0 \left(c, d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)} \right) + \\
& + \sum_{m=1}^2 n_2^{(m)} B_m \left(d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)} \right) = 0, \\
& + \sum_{m=1}^2 n_2^{(m)} C_m \left(\Phi_{DL}^{(m)}, r, d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)} \right) = 0 \quad (9)
\end{aligned}$$

для третьего порядка и

$$\begin{aligned}
& U \left(\Phi_{DL}^{(m)}, b_3^{(m)}, r, d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)}, n_2^{(m)} \right) + \\
& \sum_{m=1}^2 b_5^{(m)} V_m \left(\Phi_{DL}^{(m)}, b_3^{(m)}, r, d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)}, n_2^{(m)} \right) + \\
& + \sum_{m=1}^2 n_3^{(m)} W_m \left(\Phi_{DL}^{(m)}, b_3^{(m)}, r, d_m, n_0^{(m)}, n_1^{(m)}, n_2^{(m)} \right) = 0 \quad (10)
\end{aligned}$$

для пятого порядка, т.е. aberrационные коэффициенты третьего порядка линейны относительно коэффициентов $b_3^{(m)}$ и $n_2^{(m)}$, а коэффициенты пятого порядка - относительно $b_5^{(m)}$ и $n_3^{(m)}$ [12, 3]. В результате 11 из 15 уравнений вышеописанной системы линейны, что существенно упрощает процесс ее решения.

Поиск и исследование областей существования физически реализуемых решений рассматриваемой системы уравнений показал, что при базовых показателях преломления неоднородных материалов, удовлетворяющих условию $1,5 \leq n_0^{(m)} \leq 2$, решения существуют в широком диапазоне длин заднего фокального отрезка объектива $0,15f' < s'_F < 0,7f'$. В результате была поставлена задача локализовать в ограниченной области трехмерного пространства $(n_0^{(1)}, n_0^{(2)}, s'_F)$ зону, которой при заданной числовой апертуре объектива $NA=0,27$ и в пределах углового поля в пространстве предметов $2\omega \leq (15^\circ - 20^\circ)$ соответствуют решения, обеспечивающие наименьший уровень всех остаточных aberrаций (за исключением дисторсии). В итоге было выделено несколько решений, из которых уже по результатам оптимизации было выбрано одно, приводящее к наилучшей исходной схеме гибридного объектива. Это решение представлено в табл.1.

Результаты исследования исходной схемы и ее оптимизации приведены в табл. 2. Первый раздел этой таблицы содержит конструктивные параметры и полевые характеристики, полученные непосредственно из расчета в области aberrаций третьего и пятого порядков, а второй раздел - полученные в результате оптимизации. Все данные получены при фокусном расстоянии $f'=25$ мм и числовой апертуре $NA=0,27$, обеспечивающей на длине волны He-Cd лазера $\lambda=0,4416$ мкм рэлеевский предел разрешения $\delta_R=1$ мкм.

В табл.2 приведены: конструктивные параметры b_7, b_9, n_1, n_5 , использовавшиеся для минимизации остаточных aberrаций высших порядков; параметр t , который использовался как для минимизации aberrаций, так и для уменьшения перепадов показателей преломления; световые диаметры D дифракционных линз и неоднородных материалов, минимальные периоды Λ_{\min} структур дифракционных линз и перепады показателей преломления Δ_n неоднородных материалов.

Таблица 1

Конструктивные параметры объектива, свободного от всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков за исключением дисторсии пятого порядка

r/f'	d/f'	$n_0^{(2)}$	$n_1 f'^2$	$n_2 f'^4$	$n_3 f'^6$
∞^*					
	1,3598	1,94	-0,5689	0,1735	0,1997
5,612					
	0,7161	1,55	0,6508	-0,8515	-1,6612
∞^{**}					
$s'_F = 0,58 f'$					
* $\Phi_{DL} = -0,5920/f', b_3 = -0,13274/f'^3, b_5 = -0,96990/f'^5$					
** $\Phi_{DL} = 1,2391/f', b_3 = 2,22633/f'^3, b_5 = 5,63116/f'^5$					

Таблица 2

Дополнительные конструктивные параметры и полевые характеристики объектива до и после оптимизации

($f' = 24$ мм; $NA = 0,27$; $\lambda = 0,4416$ мкм)

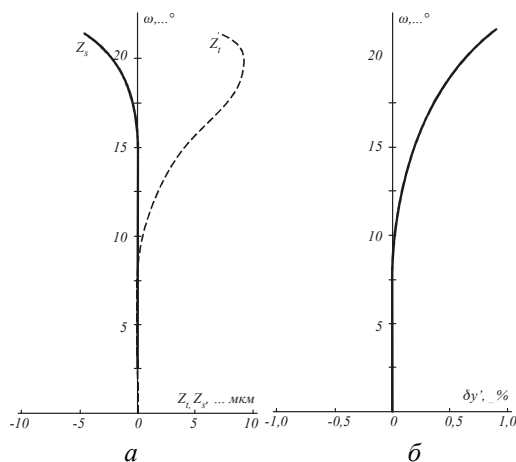
№№ раз-делов	№№ строк	Конструктивные параметры								Полевые характеристики			
		$b_7 f'^7$	$b_9 f'^9$	D , мм	Λ_{min} , мкм	$n_4 f'^8$	$n_5 f'^{10}$	$-\Delta n$	t/f'	δ_R , мкм	2ω , °	$2y'$, мм	$\delta y'$, %
1	1	0	0	13,6	2,71				0,02	1	21,2	9,0	0,05
	2			17,7		0	0	-0,074					
	3			16,9		0	0	0,065					
	4	0	0	16,1	1,46								
2	1	-1,6849	14,829	19,0	2,04				0,3	1	42,5	18,8	0,89
	2			19,0		0,5115	-4,008	-0,084					
	3			20,05		-1,9072	10,98	0,079					
	4	13,34	-107,88	20,05	1,46								

Первая и четвертая строки каждого раздела этой таблицы содержат конструктивные параметры, относящиеся к первой и второй дифракционным линзам, а вторая и третья строки – параметры, относящиеся к фронтальной и последующей частям склеенного градиентного элемента, соответственно.

Представленные в таблице полевые характеристики объектива включают: диаметр поля высококачественного изображения $2y'$, соответствующее ему угловое поле в пространстве предметов 2ω и дисторсию $\delta y'$. Граница поля высококачественного изображения определялась по критерию $E(\delta_R) \geq 0,73$.

Чтобы дать читателю более полную информацию о коррекционных возможностях рассматриваемого объектива на рис. 2 приведены графики его остаточных aberrаций. Они относятся к оптимизированному варианту, параметры которого представлены во втором разделе табл. 2. Кроме того, на рис. 3 для этого же варианта объектива представлена картина распределения волновой aberrации по плоскости выходного зрачка для края поля, т.е. при полевом угле $\omega = 21,25^\circ$. Максимальное значение волно-

вой aberrации на краю зрачка составляет $0,42\lambda$. Наконец, на рис. 4 представлена картина распределения интенсивности в дифракционном изображении точки при том же самом полевом угле. Интенсивность Штреля в этом изображении равна 0,825, а $E(\delta_R) = 0,734$.



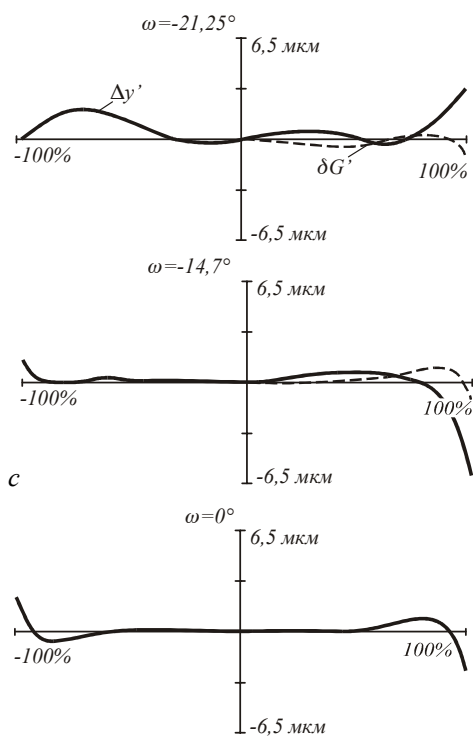


Рис. 2. Графики остаточных aberrаций: а - астигматизм и кривизна поля; б - дисторсия; в - aberrации широких наклонных пучков ($\Delta y'$ - для меридиональной плоскости; $\delta G'$ - для сагиттальной плоскости)

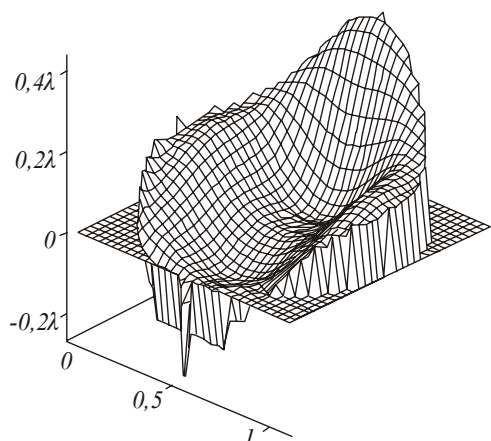


Рис. 3. Волновая aberrация в выходном зрачке при полевом угле $\omega = 21,25^\circ$.

6. Заключение

Представленные в данной статье принципы построения и методы расчета оптических систем с градиентными и дифракционными элементами позволили авторам, как следует из табл. 2, получить гибридный объектив-монокромат, который по полевым характеристикам превосходит все известные объективы, содержащие дифракционные и градиентные элементы [1-8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ (межвузовская научно-техническая программа "Плазменные, ионные и электронные упрочняющие технологии").

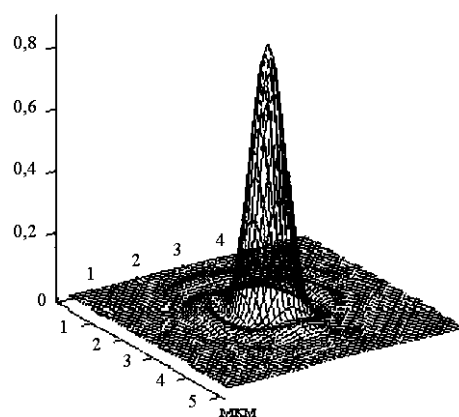


Рис. 4. Распределение интенсивности в дифракционном изображении точки при полевом угле $\omega = 21,25^\circ$.

Литература

1. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем. - Л.: Машиностроение, 1986. - 223 с.
2. Грейсух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А. Оптика градиентных и дифракционных элементов. М.: Радио и связь, 1990. 136 с.
3. Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A. Optics of Diffractive and Gradient-Index Elements and Systems. - Bellingham, WA: SPIE Press, 1997. - 414p.
4. Степанов С.А., Грейсух Г.И. Абберационные свойства и коррекционные возможности склеенной линзы Вуда // Опт. и спектр. - 1999. - Т.86, № 3. - С.522-527.
5. Грейсух Г.И., Степанов С.А., Ежов Е.Г. Коррекционные возможности компонента, состоящего из трех склеенных плоскопараллельных пластин // Оптический Журнал. - 1999. - Т.66, № 2. - С.80-83.
6. Greisukh G. I., Stepanov S. A. Design of cemented radial gradient-index triplet // Applied Optics. - 1998. - Vol.37, № 13. - P.2687-2690.
7. Грейсух Г.И., Степанов С.А., Ежов Е. Г. Тройные склеенные радиально-градиентные объективы: схемные решения и полевые характеристики // Оптический Журнал. - 1999. - Т.66, № 10.
8. Грейсух Г.И., Степанов С.А., Ежов Е.Г. Коррекционные возможности объектива, склеенного из четырех радиально-градиентных плоскопараллельных пластин // Оптический Журнал. - 2000. - Т.67, № 8.
9. Бобров С.Т., Грейсух Г.И. Взаимная корреляция числовых критериев оценки качества изображения // Опт. и спектр. - 1985. - Т.58, № 5. - С. 1068-1073.
10. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. - 488 с.
11. Sands P.J. Inhomogeneous lenses, III. Paraxial optics // J. Opt. Soc. Am. - 1971. - Vol. 61, N 7. - P. 879-885.
12. Sands P.J. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses // J. Opt. Soc. Am. - 1970. - Vol. 60, N 11. - P. 1436-1443.