

Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов
(Пенза – Самара)

КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ИГЛООБРАЗНОГО ЖЕСТКОГО ГРАДИЕНТНОГО ЭНДОСКОПА*

Изложена методика сопряжения иглообразной части жесткого эндоскопа, включающей градиентные объектив и транслятор, с цветной видеокамерой. Показано, что хроматизм положения и увеличения легко устраняется путем введения в систему однородной плосковыпуклой линзы, а aberrации тонких пучков минимизируются дополнительным однородным мениском.

Введение. При сопряжении иглообразной части эндоскопа с цветной видеокамерой характеристики иглообразной части должны удовлетворять следующим требованиям. Фокусное расстояние выбирается из условия соизмеримости двойной высоты изображения $2l$, соответствующей угловому полю зрения в пространстве предметов 2θ , и размера ПЗС-матрицы видеокамеры. В частности, при $2\theta = 60^\circ$ и использовании ПЗС-матрицы формата 1/2 фокусное расстояние $|f| = 4$ мм. Задний фокальный отрезок, определяемый конструкцией видеокамеры, $s_F = 7$ мм.

Разрешающие способности иглообразной части эндоскопа и ПЗС-матрицы должны быть согласованы. Разрешение ПЗС-матрицы характеризуется ее частотой Найквиста [1]

$$N_N = 1/2 \cdot \Delta, \quad (1)$$

где Δ – размер квадратного элемента матрицы. Что же касается иглообразной части эндоскопа, то разрешаемыми будем считать те пространственные частоты, на которых значения дифракционной частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) для всего поля зрения удовлетворяют условию $T(N) = 0,2$. При этом согласование разрешающих способностей предполагает, что половина частоты Найквиста ($N_N/2$) ПЗС-матрицы должна быть равна пространственной частоте N_m , для которой $T(N_m) = 0,2$.

В работах [2, 3] анализировались характеристики иглообразных частей жестких эндоскопов, включающих радиально-градиентные объектив и транслятор. Было показано, что из ассортимента неоднородных оптических материалов, выпускаемых в настоящее время отечественными и зарубеж-

* Работа выполнена при поддержке ТОО «ВНИИМП-ОПТИМЕД» (Москва), Министерства образования РФ (грант № Т02-08.0-277) и российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование (BRHE)».

Т а б л и ц а 1

Марка стекла	n_0	$n_1, \text{мм}^{-2}$	0	1
SLW-1.0	1,61038	-0,30015	39,26	17,41
ARS20	1,53954	-0,00324	52,86	822,16

ми производителями, наиболее подходящими для объектива и транслятора являются стекла марок SLW-1.0 и ARS20 соответственно. Производитель стекла SLW-1.0 – фирма “Nippon Sheet Glass Co., Ltd.” (Япония), а стекла ARS20 – фирма “Gradient Lens Corporation” (США). Основные характеристики этих стекол приведены в табл. 1 для спектрального диапазона, ограниченного синей F- и красной C-линиями водорода ($\lambda_F = 486,13$ нм и $\lambda_C = 656,26$ нм). В качестве средней длины волны принята желтая d-линия гелия ($\lambda_d = 587,56$ нм). В таблице n_0 – базовый показатель преломления стекла; n_1 – первый коэффициент его радиального градиента; $n_0 - 1$ и n_1 / n_0 – числа Аббе для базового показателя преломления и первого коэффициента радиального градиента соответственно; $n_i(\lambda_d)$ и $n_i(\lambda_F)$ и $n_i(\lambda_C)$.

В работах [2, 3] было также показано, что при использовании этих стекол угловое поле зрения $2\theta = 60^\circ$ при приемлемом виньетировании обеспечивается световым диаметром цилиндрической оболочки градан-транслятора $D_T = 1,5$ мм. Причем если длина транслятора, определяющая длину иглообразной части эндоскопа, порядка 200 мм и более, то устранение хроматических aberrаций возможно только с помощью дополнительного элемента, установленного между выходным торцом транслятора и плоскостью изображения. Такой элемент может представлять собой дифракционную, градиентную или однородную линзу [2]. Однако, как показали предварительные исследования, при фокусных расстояниях иглообразной части эндоскопа порядка 4 мм и более указанный корректор хроматизма целесообразно выполнить в виде однородной плосковыпуклой линзы, которая приклеивается к выходному торцу транслятора. Этот выбор обусловлен тем, что в настоящее время диапазон значений дисперсии в ассортименте марок однородного стекла существенно шире, чем градиентного.

Коррекция хроматизма. Конструктивные параметры плосковыпуклой линзы, дисперсия ее стекла и варьируемая в пределах нескольких миллиметров составляющая общей длины транслятора могут быть получены путем решения системы уравнений, обеспечивающих требуемое фокусное расстояние иглообразной части эндоскопа, устранение хроматизма положения и увеличения. Поясним, что незначительное в процентном отношении изменение длины транслятора существенно влияет на хроматизм благодаря изменению положений плоскости изображения и выходного зрачка градиентной части оптической системы, включающей объектив и транслятор.

В табл. 2 приведены конструктивные параметры оптической системы с однородно-линзовым корректором хроматизма, полученные в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. Фокусное расстояние системы $f = 4,08$ мм выбрано с учетом ее дисторсии так, что угловому полю в пространстве предметов $2\theta = 60^\circ$ соответствует в плоскости изображения линейное поле $2y = 4$ мм. Задний фокальный отрезок системы $s_F = 31,88$ мм.

Т а б л и ц а 2

r , мм	d , мм	Параметры среды	
		n_d	
	2,57	SLW-1.0	
	205,98	ARS20	
	2	1,95250	20,36
-8,07			

Исследование этой системы методом расчета хода лучей в видимом спектральном диапазоне, ограниченном F- и C-линиями, показало, что коррекция монохроматических и хроматических aberrаций такова, что разрешение на оси системы при контрасте $T = 0,2$ составляет $N_m = 39,5 \text{ мм}^{-1}$, в то время как у этой же системы в отсутствие aberrаций контраст снижается до уровня 0,2 на частоте $N_0 = 42,5 \text{ мм}^{-1}$. На краю же поля зрения разрешение не отличается от дифракционно-ограниченного, т. е. $N_m = N_0 = 17,5 \text{ мм}^{-1}$. Снижение дифракционного предела разрешения обусловлено виньетированием, возникающим в результате ограничения наклонных пучков оболочкой градан-транслятора. Если столь резкая неравномерность разрешения по полю нежелательна, то ее можно существенно снизить, практически не ухудшая разрешение на оси, установкой специальной апертурной диафрагмы при одновременном увеличении светового диаметра цилиндрической оболочки градан-транслятора. При конструктивных параметрах системы, приведенных в табл. 2, световой диаметр цилиндрической оболочки градан-транслятора $D_T = 2,2 \text{ мм}$ обеспечивает без виньетирования угловое поле зрения в пространстве предметов $2 = 60^\circ$, если диаметры всех световых пучков ограничиваются апертурной диафрагмой диаметра $D_{AS} = 1,47 \text{ мм}$, устанавливаемой на расстоянии $s_{AS} = 24,19 \text{ мм}$ от переднего торца транслятора.

Исследование оптической системы в таком варианте показало, что в плоскости наилучшей установки ($s = 31,35 \text{ мм}$), обеспечивающей равенство разрешений в центре и на краю поля, разрешение при контрасте $T = 0,2$ не опускается ниже $N_m = 33 \text{ мм}^{-1}$. Разрешение в основном ограничено монохроматическими aberrациями и, прежде всего, aberrациями тонких пучков, превалирующей из которых является кривизна поля. С учетом вышеизложенного исследовалась возможность минимизации aberrаций тонких пучков без нарушения коррекции хроматизма путем введения в систему дополнительных однородных элементов.

Минимизация aberrаций тонких пучков. Сумму Петцваля, обращение которой в нуль является необходимым условием одновременного устранения кривизны поля и астигматизма третьего порядка [4], для оптической системы, содержащей преломляющие поверхности и радиально-градиент-

ные среды, можно представить, используя результаты работ [5, 6], в виде

$$P = P_S + P_M,$$

где

$$P_S = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \frac{1}{r_k} \frac{1}{n_0^{(k)}} - \frac{1}{n_0^{(k-1)}}; \quad P_M = \sum_{k=1}^K \frac{n_1^{(k)} d_k}{[n_0^{(k)}]^2}.$$

Здесь P_S и P_M – вклады в сумму поверхностей и сред соответственно; k – текущий номер преломляющей поверхности и следующей за ней неоднородной среды; r_k – радиус кривизны k -й сферической преломляющей поверхности; $n_0^{(k-1)}$ и $n_0^{(k)}$ – базовые показатели преломления сред до и после k -й преломляющей поверхности; $n_1^{(k)}$ и d_k – первый коэффициент радиального градиента и толщина k -й среды соответственно.

У исходной системы с однородно-линзовым корректором хроматизма вклад в сумму Петцваля радиально-градиентных сред объектива и транслятора $P_M = 0,58 \text{ мм}^{-1}$, а вклад единственной сферической поверхности (задней поверхности корректора хроматизма) имеет тот же самый знак, но существенно отличается по модулю и составляет $P_S = 0,06 \text{ мм}^{-1}$. Очевидно, что для выполнения условия $P = 0$ необходимо, чтобы суммарный вклад, вносимый в сумму Петцваля поверхностями дополнительных однородных линз, был противоположен по знаку суммарному вкладу неоднородных сред и, по крайней мере, сопоставим с ним по модулю. Последнее практически не реализуемо, так как требует такой большой кривизны поверхностей, при которой абберации высших порядков сведут на нет все усилия по повышению разрешения. Причем с увеличением числа поверхностей (количества дополнительных коррекционных линз) ситуация почти не меняется. Поэтому далее рассматривается возможность повышения разрешения за счет введения в исходную систему только одной дополнительной линзы, используя ее для максимально возможного уменьшения суммы Петцваля и достижения оптимального (с точки зрения влияния на ЧКХ) соотношения между кривизной поля и астигматизмом системы в целом.

Оптическая сила дополнительной однородной линзы в принципе может быть как отрицательной, так и положительной. В любом случае, подбирая соотношение между дисперсиями плосковыпуклой и дополнительной линз, а также варьируя длину транслятора, можно полностью восстановить коррекцию хроматизма.

Астигматизм исходной схемы останется гарантированно небольшим, если дополнительная линза будет положительной, и для поддержания неизменного фокусного расстояния системы потребуется уменьшить кривизну поверхности плосковыпуклой линзы. В этом случае конструктивные параметры дополнительной линзы и толщину воздушного промежутка между ней и плосковыпуклой линзой можно получить, потребовав, чтобы поверхности дополнительной линзы вносили нулевой астигматизм, но при этом суммарный вклад поверхностей в сумму Петцваля был нужного знака, т. е. соответствовал вкладу отрицательной линзы. Очевидно, что в таком случае дополнительная линза будет представлять собой мениск с изопланатической и апланатической поверхностями, положительная оптическая сила которого обеспечивается за счет его толщины. Наконец, отступая от строгой изоплана-

Т а б л и ц а 3

r , мм	d , мм	Стекло	
		n_d	
	2,57	SLW-1.0	
	208,69	ARS20	
	2,0	1,95250	20,36
-42,00			
	0,075	1,0	
4,925			
	10,5	1,75084	27,69
2,820			

точности и апланатичности поверхностей, можно получить оптимальное соотношение между кривизной поля и астигматизмом.

Конструктивные параметры системы с дополнительным мениском, передняя поверхность которого близка к изопланатической, а задняя – к апланатической, представлены в табл. 3. Фокусное расстояние иглообразной части в целом $f = 4,078$ мм, а задний фокальный отрезок $s_f = 11,505$ мм. Принципиальная оптическая схема этой системы приведена на рис. 1.

Сопоставляя коэффициенты астигматизма B_{010}, B_{110} и кривизны поля A_{100}, A_{200} третьего и пятого порядков соответственно [7], а также суммы Петцваля P исходной системы ($B_{010} = 0,4008, B_{110} = 1,2024, A_{100} = 2,2861, A_{200} = 2,5899, P = 0,61073 \text{ мм}^{-1}$) и системы, параметры которой приведены в табл. 3 ($B_{010} = 1,4200, B_{110} = 1,1283, A_{100} = 1,5636, A_{200} = 1,1881, P = 0,5575 \text{ мм}^{-1}$), нетрудно видеть, что, действительно, благодаря некоторому уменьшению суммы Петцваля и выбранному вкладу мениска в астигматизм, удалось существенно снизить кривизну поля изображения системы в целом. При этом если у исходной схемы только коэффициенты кривизны поля третьего и пятого порядков имели противоположные знаки, то у системы с дополнительным мениском противоположные знаки имеют и коэффициенты астигматизма. Такое соотношение между коэффициентами приводит

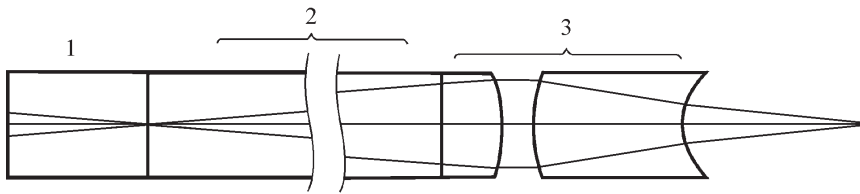


Рис. 1. Оптическая схема иглообразной части жесткого эндоскопа, включающей градан-объектив (1), градан-транслятор (2) и двухлинзовый корректор аберраций (3)

к взаимной балансировке составляющих aberrаций тонких пучков различных порядков малости.

Хроматизм положения и увеличения этой оптической системы устранен практически полностью. В результате полихроматическое разрешение при контрасте $T = 0,2$ в плоскости наилучшей установки ($s = 10,78$ мм), обеспечивающей равенство разрешений в центре и на краю поля, возросло до $N_m = 39$ мм⁻¹, притом что дифракционно-ограниченное разрешение оптической системы в этой же плоскости составляет $N_0 = 45$ мм⁻¹. Заметим, что при переходе к монохроматическому освещению на длине волны λ_d разрешение оптической системы в плоскости наилучшей установки ($s = 10,13$ мм) при том же контрасте увеличивается до $N_m = 43$ мм⁻¹, в то время как дифракционно-ограниченное разрешение оптической системы в этой плоскости составляет $N_0 = 46,2$ мм⁻¹. Сравнивая монохроматическое и полихроматическое разрешения с соответствующими дифракционными пределами, нетрудно видеть, что преобладающей aberrацией, ограничивающей полихроматическое разрешение оптической системы, является вторичный спектр, для коррекции которого никаких специальных мер не принималось.

На рис. 2, 3 приведены кривые остаточных aberrаций данной оптической системы. При этом монохроматические aberrации вычислялись на центральной длине волны λ_d , а хроматические – в спектральном диапазоне,

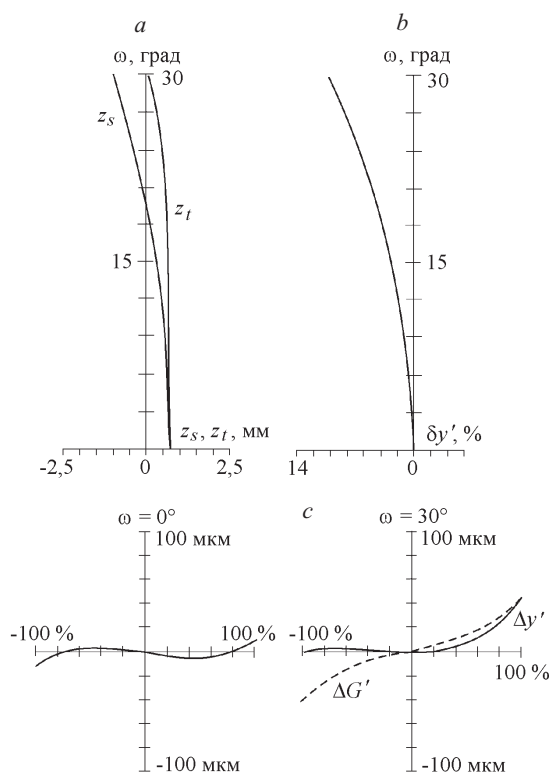


Рис. 2. Кривые остаточных монохроматических aberrаций: астигматизм и кривизна поля (а); дисторсия (b); aberrации широких наклонных пучков (y для меридиональной плоскости, G для сагиттальной плоскости) (с)

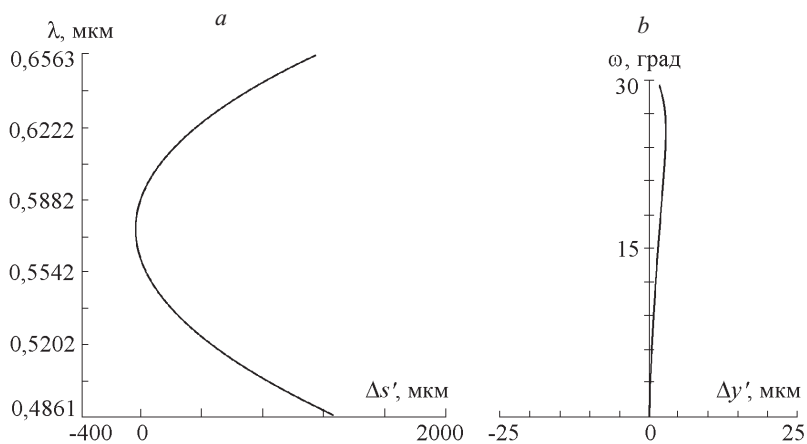


Рис. 3. Кривые остаточных хроматических aberrаций: хроматизм положения (а), хроматизм увеличения (б)

ограниченном F- и C-линиями. На рис. 4 представлены кривые дифракционной полихроматической ЧКХ системы, построенные для центра и края поля. Они показывают, что для сопряжения с этой оптической системой целесообразно использовать видеокамеру, квадратные элементы матрицы которой имеют размеры не более $6,4 \times 6,4$ мкм, а частоту Найквиста, как следует из формулы (1), не ниже $N_N = 78 \text{ мм}^{-1}$. Из графика ЧКХ также видно, что на частоте $N = 0,5N_m$ контраст в центре и на краю поля зрения не опускается ниже 0,5. Это выполняется для всех полевых углов.

Оценка качества изображения, формируемого данной оптической системой, производилась также по полихроматическому числу Штреля S [8]. Его значение для всех полевых углов не опускалось ниже 0,66. По качеству формируемого изображения оптические системы, у которых число Штреля

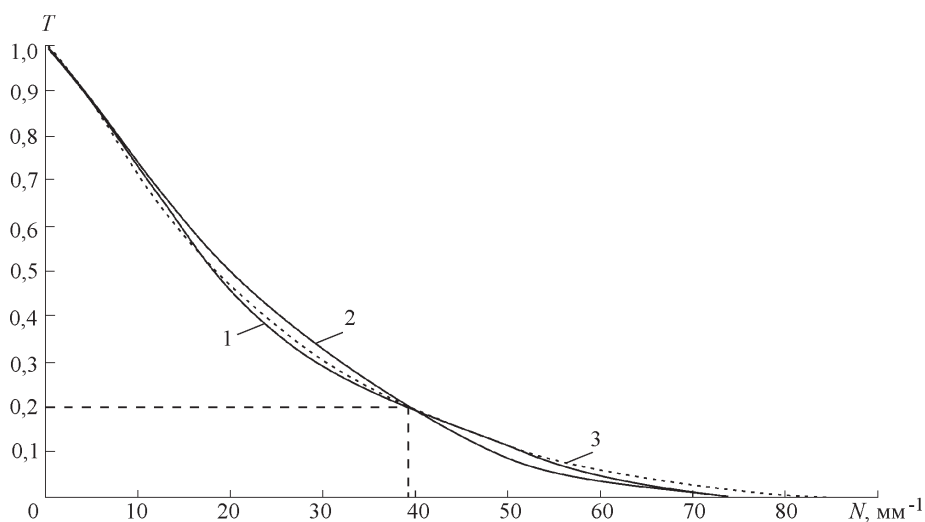


Рис. 4. Дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика: при $N = 0$ (кривая 1); при $N = 30$ для меридиональной (2) и сагиттальной (3) плоскостей

0,6 $S = 0,7$, а контраст 0,5 $T = 0,75$ на частоте, равной половине максимальной частоты, воспринимаемой приемником, считаются вполне удовлетворительными [8, 9].

Приведенные данные относятся к системе с дополнительно установленной апертурной диафрагмой, устраняющей виньетирование наклонных пучков и уменьшающей при этом апертуру осевого пучка. Если же эту диафрагму исключить, передав ее функции оболочке транслятора, то ценой отказа от постоянства разрешения по полю увеличится освещенность. В этом случае при световом диаметре графан-транслятора $D_T = 2,2$ мм в новой плоскости наилучшей установки ($s = 10,55$ мм) полихроматическое разрешение в центре при контрасте $T = 0,2$ составит $N_m = 41$ мм⁻¹, а на краю поля снизится до $N_m = 36$ мм⁻¹.

Заключение. Исследование абберационных свойств иглообразной части жесткого эндоскопа, сопрягаемой с цветной видеокамерой и включающей градиентные объектив и транслятор, показало, что хроматизм положения и увеличения легко устраняется путем введения в систему однородной плосковыпуклой линзы, выполненной из стекла с нормальной дисперсией. Превалирующими монохроматическими абберациями являются абберации тонких пучков. Их коррекция представляет серьезную проблему, так как невозможно обнулить сумму Петцваля, что является необходимым условием одновременного устранения кривизны поля и астигматизма. Включение в систему помимо плосковыпуклой линзы дополнительного однородного мениска, положительная оптическая сила которого обеспечивается за счет его толщины, позволяет при небольшом уменьшении суммы Петцваля добиться взаимной балансировки составляющих аббераций тонких пучков различных порядков малости. Нарушенную (при вводе в систему дополнительного мениска) коррекцию двух хроматических аббераций нетрудно восстановить подбором дисперсий однородных линз и варьированием в пределах нескольких миллиметров длиной транслятора. Реализация методики, предложенной в данной работе, позволяет выполнить сопряжение градиентной части жесткого эндоскопа с цветной видеокамерой, максимально используя ее возможности.

Коэффициенты астигматизма и кривизны поля третьего и пятого порядков были получены с использованием разработанной авторами программы вычисления абберационных коэффициентов по диаграмме рассеяния псевдолучей. Ход этих лучей через оптическую систему, которая в общем случае может включать элементы различных типов (традиционные, дифракционные, градиентные), рассчитывается в приближении заданного порядка малости [10]. Расчет хода реальных лучей, вычисление на его основе аббераций, числа Штреля и ЧКХ выполнялись также с использованием авторского программного обеспечения. Подчеркнем, что практически совпадающие результаты могут быть получены с использованием и других программ расчета оптических систем, позволяющих осуществлять прогон реальных лучей через элементы различных типов, например программы «ОПАЛ» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики или программы оптического проектирования «ZEMAX» компании «Focus Software, Inc.» (США).

Авторы выражают благодарность С. Ю. Дьяконову за инициирование данной работы и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике: Пер. с англ. М.: Мир, 1971.
2. Грейсух Г. И., Степанов С. А., Ежов Е. Г. Дифракционные и однородно-линзовые компенсаторы для коррекции aberrаций градиентного эндоскопа // Компьютерная оптика. 2003. Вып. 25. С. 54.
3. Ежов Е. Г., Степанов С. А., Грейсух Г. И. Коррекция aberrаций жесткого градиентного эндоскопа // Автометрия. 2004. 40, № 3. С. 100.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1973.
5. Sands P. J. Third-order aberrations of inhomogeneous lenses // Journ. Opt. Soc. Amer. 1970. 60, N 11. P. 1436.
6. Moore D. T. Design of singlets with continuously varying indices of refraction // Journ. Opt. Soc. Amer. 1971. 61, N 7. P. 886.
7. Greisukh G. I., Bobrov S. T., Stepanov S. A. Optics of Diffractive and Gradient-index Elements and Systems. Bellingham: SPIE Press, 1997.
8. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989.
9. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971.
10. Степанов С. А., Грейсух Г. И. Расчет хода псевдолучей через оптические системы, включающие градиентные и дифракционные линзы // Оптика и спектроскопия. 1996. 81, № 4. С. 698.

Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства,
Самарский государственный
аэрокосмический университет,
E-mail: grey@gasa.penza.com.ru

Поступила в редакцию
19 апреля 2004 г.