

УДК 535.015

Синтез и исследование изопланатической базовой градиентной линзы с осевым распределением показателя преломления

А. Е. Алимов

Представлены результаты исследования, посвященные синтезу базовой изопланатической линзы со сферическими поверхностями из градиентного материала с линейным осевым распределением показателя преломления. Исследованы и систематизированы абберационные свойства и конструктивные параметры таких линз.

PACS: 42.15.Fr; 42.79.Ry

Ключевые слова: изопланатическая линза; абберационные свойства; градиентные оптические элементы.

Введение

Среди задач вычислительной оптики вопросы структурного синтеза, в процессе которого определяются количество, типы и последовательность оптических элементов (ОЭ), формирующих исходную оптическую систему (ОС), обладающую необходимыми габаритными, параксиальными и абберационными свойствами, являются одними из наиболее сложных и плохо поддающихся алгоритмизации. В то же время методы параметрического синтеза, в которых в качестве исходных данных используются результаты структурного синтеза, хорошо изучены и реализованы во многих программах для расчета ОС.

Основными группами методов структурного синтеза, позволяющими создавать принципиально новые схемные решения, можно считать методы, основанные на использовании теории аббераций определенных порядков, и композиционные. Выбор того или иного метода в основном зависит от характеристик разрабатываемой ОС

Особое место среди перечисленных методов занимают композиционные, важнейшая роль в разработке которых принадлежит проф. М. М. Русинову. В его работах разработана архитектура ОС, которая может служить фундаментом при разработке объективов различного назначения. Основой этой архитектуры стали простейшие базовые элементы, создающие оптическую силу и свободные от определенных аббераций и представляющие собой одиночные линзы из однородных материалов, расположенные в воздухе и гра-

ниченными двумя преломляющими сферическими поверхностями.

Строя ОС из таких элементов, можно получить всю систему также свободной от этих же аббераций.

Структурная схема проектируемой ОС существенно предопределяется выбором типа базовой линзы. Так, например, при разработке широкоугольных систем важно обеспечить устранение главных полевых аббераций — астигматизма, комы, кривизны поля изображения, при разработке светосильных систем — сферической абберации и выполнение условия синусов.

Комбинируя между собой четыре вида сферических поверхностей, свободных от астигматизма и комы, а именно апланатическую поверхность, близфокальную поверхность, поверхность, концентричную зрачку, и плоскую поверхность, М. М. Русинов получил шесть форм "тонких" и "толстых" изопланатических, т. е. свободных от астигматизма и комы, линз, которые рассматривал в качестве базовых оптических элементов для синтеза широкоугольных фотографических объективов с различными структурными схемами [1].

В настоящее время в связи с широким применением асферических, градиентных и дифракционных ОЭ возникает закономерный интерес к рассмотрению аналогичной задачи с привлечением новой элементной базы, в частности, к изучению изопланатических базовых элементов на основе градиентных оптических материалов.

Среди градиентных оптических элементов (ГОЭ) с позиции возможности промышленного производства самыми распространенными являются материалы с радиальным и осевым распределением показателя преломления (РПП). Синтезу ОС с ГОЭ с радиальным РПП посвящен цикл работ [2—5]. В них рассмотрен метод проектирования объективов с исправленной комой и астигматизмом на основе компонентов из материала с радиальным РПП, рассчитаны конструктивные

Алимов Андрей Евгеньевич, аспирант.
МГТУ им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. 5.
Тел. 8-916-800-94-71.
E-mail: deminox@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21 мая 2009 г.

параметры таких систем и выполнена оценка качества. Подобные работы по ГОЭ с осевым РПП автору неизвестны. В связи с этим объектом исследования были выбраны ГОЭ с осевым РПП.

В данной работе представлены результаты исследования, посвященные синтезу "тонкой" базовой изопланатической линзы со сферическими поверхностями из градиентного материала с линейным осевым РПП и изучению абберационных свойств таких линз.

Математическая модель синтеза градиентной изопланатической базовой линзы с осевым линейным РПП

На рис. 1 представлена одиночная линза со сферическими поверхностями из градиентного материала с линейным осевым РПП, которое задано линейной зависимостью вида $n = n_0 + n_1z$ в пределах всей осевой толщины линзы, где n_0, n_1 — коэффициенты РПП, $0 \leq z \leq d$ — расстояние вдоль оси Z (мм). Такая линза при расположении предмета в бесконечности имеет шесть параметров:

- r_1, r_2 — радиусы кривизны;
- d — толщина по оси;
- S_p — удаление входного зрачка;
- n_0, n_1 — коэффициенты РПП.

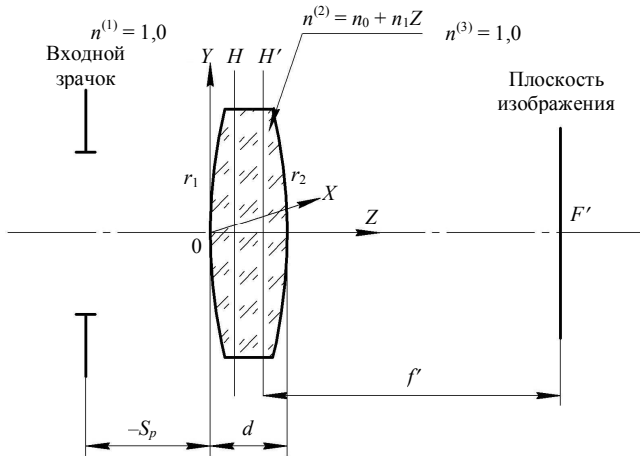


Рис. 1. Базовая линза с осевым линейным РПП

Исходными данными для синтеза были приняты коэффициенты РПП n_0, n_1 и толщина линзы по оси d ; свободными для синтеза изопланатической линзы являются радиусы кривизны r_1, r_2 и удаление входного зрачка S_p .

В рамках теории аббераций третьего порядка для выполнения условия изопланатизма необходимо обеспечить равенство нулю второго и третьего коэффициентов Зейделя. Эти абберационные условия дополнены параксиальным условием обеспечения заданного значения фокусного расстояния.

Общие выражения для второго и третьего коэффициентов Зейделя монохроматических аббераций третьего порядка ОС с ГОЭ представлены, в частности, в работах [6, 7]. Каждый из коэффициентов состоит из трех составляющих: однородно-поверхностной \bar{S}^C , неоднородно-поверхностной \bar{S}^G и переноса \bar{S}^T . Для рассматриваемой линзы эти составляющие принимают вид:

$$\bar{S}_{II}^C = \bar{h}_1 \left(\frac{1}{\partial\mu_1} \right)^2 \partial(\alpha\mu)_1 \partial\alpha_1 \partial\beta_1 + \bar{h}_2 \left(\frac{1}{\partial\mu_2} \right)^2 \partial(\alpha\mu)_2 \partial\alpha_2 \partial\beta_2;$$

$$\bar{S}_{III}^C = \bar{h}_1 \left(\frac{\partial\beta_1}{\partial\mu_1} \right)^2 \partial(\alpha\mu)_1 + \bar{h}_2 \left(\frac{\partial\beta_2}{\partial\mu_2} \right)^2 \partial(\alpha\mu)_2;$$

$$\bar{S}_{II}^G = \Gamma_1 \bar{h}_1^3 \bar{H}_1 + \Gamma_2 \bar{h}_2^3 \bar{H}_2;$$

$$\bar{S}_{III}^G = \Gamma_1 (\bar{h}_1 \bar{H}_1)^2 + \Gamma_2 (\bar{h}_2 \bar{H}_2)^2;$$

$$\bar{S}_{II}^T = n_0^3 \alpha_2^2 \beta_2 G;$$

$$\bar{S}_{III}^T = n_0^3 \alpha_2 \beta_2^2 G,$$

где $\partial\mu_1 = \frac{1}{n_0} - 1$; $\partial\mu_2 = 1 - \frac{1}{n_0 + n_1 d}$;

$$\partial\alpha_1 = \alpha_2 - \alpha_1; \quad \partial\alpha_2 = \alpha_3 - \alpha'_2;$$

$$\partial\beta_1 = \beta_2 - \beta_1; \quad \partial\beta_2 = \beta_3 - \beta'_2;$$

$$\partial(\alpha\mu)_1 = \frac{\alpha_2}{n_0} - \alpha_1; \quad \partial(\alpha\mu)_2 = \alpha_3 - \frac{\alpha'_2}{n_0 + n_1 d};$$

$$\Gamma_1 = \left(\frac{f'}{r_1} \right)^2 n_1 f'; \quad \Gamma_2 = - \left(\frac{f'}{r_2} \right)^2 n_1 f';$$

$$G = \frac{\bar{h}_2}{(n_0 + n_1 d)^2} - \frac{\bar{h}_1}{n_0^2} + \frac{\alpha_2 n_1 d}{2n_0 f' (n_0 + n_1 d)^2}.$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_2, \alpha_3, \bar{h}_1, \bar{h}_2$ — параметры первого вспомогательного луча;

$\beta_1, \beta_2, \beta'_2, \beta_3, \bar{H}_1, \bar{H}_2$ — параметры второго вспомогательного луча, зависящие от r_1, r_2 и S_p .

Условие требуемого фокусного расстояния для рассматриваемой линзы получено с применением методов матричной оптики [8]:

$$\frac{1}{f'} = - \left[(n_0 - 1) \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) - \frac{(n_0 - 1)(n_0 - 1 + n_1 d) \ln \left(\frac{n_0 + n_1 d}{n_0} \right) + \frac{n_1 d}{r_2}}{n_1 r_1 r_2} \right].$$

Таким образом, процесс синтеза сводится к поиску аналитического решения системы из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} \overline{S_{II}}(r_1, r_2, S_p) = 0; \\ \overline{S_{III}}(r_1, r_2, S_p) = 0; \\ f'(r_1, r_2) = \text{const.} \end{cases}$$

С помощью этой модели рассчитаны изопланатические базовые градиентные линзы при следующих данных:

фокусное расстояние 100 мм;

толщина линзы по оси 10 мм;

коэффициент n_0 принимал значения из области 1,4—2,0 с определенным шагом;

для каждого значения коэффициента n_0 коэффициент n_1 изменялся в диапазоне от $-0,04$ до $+0,04$;

предельные значения показателя преломления линзы ограничены областью от 1,4 до 2,05, что соответствует показателям преломления оптических стекол и пластмасс;

максимальный перепад показателя преломления по абсолютному значению ограничен 0,4 с учетом современных возможностей технологии изготовления градиентных материалов.

Полученные решения были проанализированы по соотношению радиусов поверхностей, положению входного зрачка и величинам первого, четвертого и пятого коэффициентов Зейделя. В результате выделено семь семейств изопланатических линз с различными особенностями.

В данной работе представлены три семейства — наиболее предпочтительные для проектирования широкоугольных ОС с приемлемыми значениями относительных отверстий.

Семейство № 1

На рис. 2 показана трансформация линз этого семейства, полученная при изменении коэффици-

ента РПП n_1 от $-0,005$ до $+0,04$ мм⁻¹ при постоянных значениях n_0 . При равенстве коэффициента n_1 нулю, что соответствует линзе с постоянным показателем преломления, равным n_0 , линза принимает вид, который в классификации проф. М. М. Русинова известен как тип Б(ка), а именно радиус первой поверхности концентричен к положению входного зрачка, а вторая поверхность является апланатической, входной зрачок расположен за линзой. При увеличении n_1 от 0 до 0,04 мм⁻¹ значения радиусов уменьшаются, входной зрачок приближается к первой поверхности, а линза приобретает более "менискообразную" форму. При отрицательных значениях n_1 кривизна обеих поверхностей уменьшается, форма линзы стремится к выпукло-плоской, а зрачок удаляется от первой поверхности.

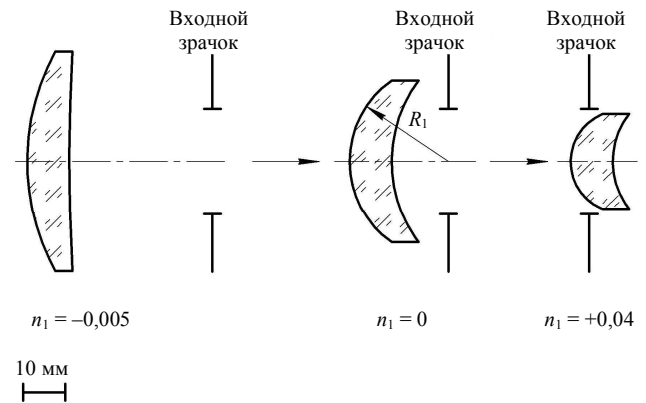
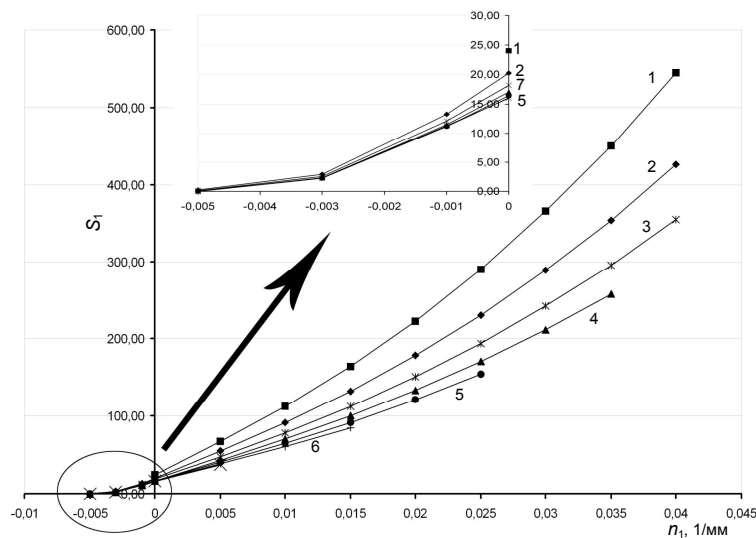


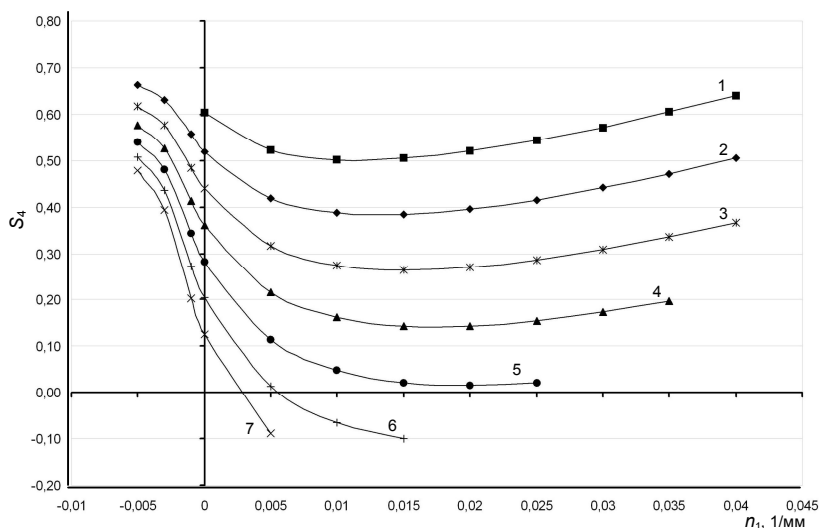
Рис. 2. Трансформация линз семейства № 1 при изменении коэффициента РПП n_1 от $-0,005$ до $+0,04$ мм⁻¹

На рис. 3, а—в представлены графики изменения приведенных первого, четвертого и пятого коэффициентов Зейделя линз семейства № 1 в зависимости от коэффициентов РПП n_0, n_1 .

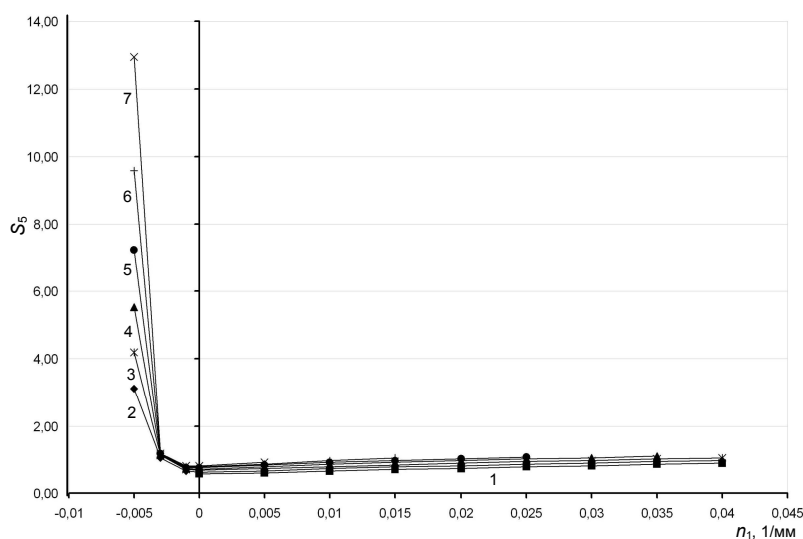


а

Рис. 3. Приведенный коэффициент Зейделя линз семейства № 1 в зависимости от коэффициентов РПП: а — первый: 1 — $n_0 = 1,4$; 2 — $n_0 = 1,5$; 3 — $n_0 = 1,6$; 4 — $n_0 = 1,7$; 5 — $n_0 = 1,8$; 6 — $n_0 = 1,9$; 7 — $n_0 = 2,0$



б



в

Рис. 3. Окончание:

б — четвертый; в — пятый:

1 — $n_0 = 1,4$; 2 — $n_0 = 1,5$; 3 — $n_0 = 1,6$; 4 — $n_0 = 1,7$; 5 — $n_0 = 1,8$; 6 — $n_0 = 1,9$; 7 — $n_0 = 2,0$

Линзы данного семейства обладают отрицательной сферической aberrацией, которая растет с увеличением коэффициента n_1 от $-0,005$ до $+0,04 \text{ мм}^{-1}$. При отрицательных значениях коэффициента n_1 сферическая aberrация градиентных линз рассматриваемого семейства меньше, чем у однородной линзы типа Б(ка) с показателем преломления равным коэффициенту n_0 РПП.

При равных значениях коэффициента n_1 сферическая aberrация меньше в линзах с высокими значениями коэффициента n_0 .

Кривизна Петцваля в линзах данного семейства может принимать как положительные, так и отрицательные значения, а при определенном сочетании коэффициентов РПП и толщины линзы обращаться в ноль. Таким образом выявляется возможность получения линзы свободной в рамках теории aberrаций третьего порядка от комы, астигматизма и кривизны Петцваля.

Также в линзах данного семейства при $n_1 > 0$ существует область с уменьшенной кривизной Петцваля по отношению к однородной линзе типа Б(ка).

При равных значениях коэффициента n_1 кривизна Петцваля меньше в линзах с высокими значениями коэффициента n_0 . Дисторсия в линзах данного семейства положительна. Минимум дисторсии достигается при коэффициенте $n_1 = 0$, т. е. в случае однородной линзы. При равных значениях коэффициента n_1 дисторсия меньше в линзах с низкими значениями коэффициента n_0 .

Таким образом, существуют две области, в которых градиентные линзы семейства №1 обладают лучшими aberrационными свойствами, чем однородные линзы типа Б(ка): область с уменьшенной сферической aberrацией при отрицательных значениях коэффициента n_1 и область с уменьшенной кривизной Петцваля при положительных n_1 .

Семейство № 2

Семейство № 2 соответствует области решений, которая при равенстве коэффициента n_1 нулю превращается в изопланатическую базовую линзу типа Б(ок) (по классификации проф. М. М. Русинова), а именно первая поверхность плоская, радиус второй поверхности концентричен к положению входного зрачка, а входной зрачок расположен в пространстве предметов.

При увеличении n_1 от 0 до $0,04 \text{ мм}^{-1}$ первая плоская поверхность становится выпуклой, кривизна второй поверхности уменьшается, входной зрачок удаляется от первой поверхности. При отрицательных значениях n_1 кривизны обеих поверхностей увеличиваются, форма линзы стремится к "менискообразной", а зрачок приближается к первой поверхности. При высоких отрицательных значениях перепада показателя преломления входной зрачок перемещается за первую поверхность.

Исследование абберационных свойств линз семейства № 2 позволило выделить ряд особенностей.

Линзы данного семейства обладают положительным первым и четвертым коэффициентами Зейделя и отрицательным пятым.

В сравнении с однородным решением Б(ок) градиентные линзы в области изменения n_1 от 0 до $0,04 \text{ мм}^{-1}$ имеют меньшие значения сферической абберации.

Также можно выделить две области ($-0,015 \leq n_1 < 0 \text{ мм}^{-1}$ и $0 < n_1 \leq 0,04 \text{ мм}^{-1}$), в которых кривизна Петцваля градиентных линз оказывается меньше, чем у соответствующих однородных решений с показателем преломления n_0 .

Минимальные значения дисторсии достигаются при значениях коэффициента $n_1 < 0$: в данной области градиентные линзы оказываются эффективнее однородных линз с показателем преломления, равным n_0 .

Таким образом, существуют две области, в которых градиентные линзы семейства № 2 обладают лучшими абберационными свойствами, чем однородные линзы типа Б(ка): область с уменьшенной кривизной Петцваля и дисторсией при $-0,015 \leq n_1 < 0 \text{ мм}^{-1}$ и область с уменьшенной кривизной Петцваля и сферической абберацией при положительных значениях коэффициента n_1 .

Семейство № 3

Изопланатические решения, отнесенные к семейству № 3, выявляются при расширении области исследования линз семейства № 1, которое ограничено изменением коэффициента n_1 в диапазоне значений от $-0,005$ до $0,04 \text{ мм}^{-1}$, так как при дальнейшем смещении в область отрицательных n_1 (от $-0,005$ до $-0,04 \text{ мм}^{-1}$) конструктивные

параметры линзы претерпевают существенные изменения, а именно меняется знак r_2 с положительного на отрицательный, S_p становится отрицательным, т. е. вынесенным в пространство предметов. Как следствие, такое изменение формы линзы привело к принципиально отличным значениям коэффициентов Зейделя, что и обосновало формирование отдельного семейства.

Таким образом, семейство № 3 представляет собой двояковыпуклые изопланатические базовые градиентные линзы с входным зрачком, расположенным перед первой поверхностью. Среди однородных изопланатических решений существует только один тип, у которого входной зрачок располагается в пространстве предметов, а именно Б(ок), рассмотренный в семействе № 2. В связи с этим целесообразно сравнивать решения семейства № 3 с однородными линзами Б(ок).

Во всем диапазоне значений n_1 линзы семейства № 3 обладают меньшей сферической абберацией, чем однородные линзы с показателем преломления, равным n_0 .

Кривизна Петцваля градиентных линз, наоборот, во всем диапазоне значений n_1 выше, чем у однородных линз. При увеличении n_1 по абсолютному значению четвертая сумма Зейделя вырастет относительно величин, характеризующих однородные решения. Дисторсия же у линз данного семейства выше, чем в однородных линзах Б(ок).

Заключение

Сравнение свойств полученных семейств приводит к выводу, что наименьшее значение сферической абберации может быть достигнуто в линзах семейств № 1 и № 3. Однако необходимо отметить, что эти решения характеризуются удаленными положениями входного зрачка. Наименьшая кривизна Петцваля характерна для линз семейства № 1. Наименьшие значения дисторсии, причем разные по знаку, могут быть достигнуты в линзах семейств № 1, 2.

В целом данное исследование показывает наличие у градиентных изопланатических линз с линейным осевым РПП особых абберационных свойств, что обеспечивает расширение набора изопланатических базовых линз. В ряде случаев применение градиентных линз позволяет получить преимущества по сравнению с однородными аналогами, связанные с уменьшением значений отдельных аббераций.

Литература

1. Русинов М. М. Техническая оптика: Учеб. пособие для вузов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1979. — 488 с.

2. *Грейсух Г. И., Ефименко И. М., Степанов С. А.* Оптика градиентных и дифракционных элементов. — М.: Радио и связь, 1990. — 136 с.

3. *Грейсух Г. И.* Теоретические основы и принципы построения высокоразрешающих оптических систем на основе дифракционных и градиентных элементов: Дис. ... на соискание уч. ст. д-ра техн. наук. — г. Пенза, 1991.

4. *Степанов С. А.* Расчет и анализ оптических систем, включающих дифракционные и градиентные элементы: Дис. ... на соискание уч. ст. д-ра физ.-мат. наук. — г. Пенза, 1998. — 263 с.

5. *Ежов Е. Г.* Расчет и моделирование высокоразрешающих градиентных и дифракционно-градиентных объективов: Дис. ... на соискание уч. ст. канд. техн. наук. — г. Самара, 2001.

6. *Sands P. J.* Third order aberrations of inhomogeneous lenses//J. Opt. Soc. Am. 1970. V. 60. No. 11. P. 1436—1443.

7. *Ровенская Т. С.* Методы проектирования оптических систем с градиентными элементами. — М.: Изд-во МГТУ, 1994. — 39 с.

8. *Джеррард А., Берч М.* Введение в матричную оптику. — М.: Мир, 1978. — 341 с.

Design and investigation of an isoplanatic axial gradient-index lens

A. E. Alimov

Bauman Moscow State Technical University, 5 Second Bauman str., 105005, Moscow, Russia

E-mail: deminox@yandex.ru

This work is dedicated to the design of an isoplanatic axial gradient-index lens with spherical surfaces. Aberration properties and design data of such lenses were investigated and systematized.

PACS: 42.15.Fr; 42.79.Ry

Keywords: isoplanatic lens, aberration properties, gradient-index optical elements.

Bibliography — 8 references.

Received 21 May 2009