

УДК 535.015 7

На правах рукописи

Алимов Андрей Евгеньевич

**СВОЙСТВА БАЗОВЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ
С ОСЕВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



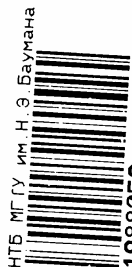
Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Оптико-электронные приборы научных исследований».

Научный руководитель: Ровенская Тамара Сергеевна
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Бездидько Сергей Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ОАО «Научно-производственная
корпорация «Системы прецизионного
приборостроения»»

Ширанков Александр Федорович
кандидат технических наук, доцент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: ФНПЦ ОАО «Красногорский завод
им. С.А. Зверева», г. Красногорск
Московской обл.



Алимов А.Е. Свойства Базовы

Защита диссертации состоится «15» февраля 2012 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «16» февраля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Бурый Е.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Первые работы, посвященные исследованию градиентных оптических элементов (ГОЭ), появились более 150 лет назад. К настоящему времени разработана основная теоретическая база для проектирования оптических систем (ОС) с ГОЭ, а именно: способы описания и классификации распределений показателя преломления (РПП) градиентных оптических сред (ГОС) и их спектральных характеристик; методы расчета хода реальных и параксиальных лучей, узких астигматических пучков; теория аберраций различных порядков. Одновременно развивалась технология производства ГОС, что обеспечило в настоящее время возможность серийного изготовления ГОЭ на основе стекол и пластмасс, прежде всего, с осевым и радиальным РПП. Успехи в теории расчета и технологии изготовления ГОЭ закономерно привели к появлению множества ОС различного назначения (как формирующих определенные пространственные структуры световых пучков, так и строящих изображение), на практике доказавших эффективность применения ГОЭ, обусловленную как уменьшением массы и габаритов ОС, так и повышением их оптических характеристик и качества изображения.

Первоначальные успехи технологии промышленного производства ГОС были связаны с разработкой материалов с радиальным РПП, поэтому развитие методов проектирования ОС с ГОЭ базировалось на использовании материалов с таким РПП. При этом в настоящее время из-за жестких технологических ограничений на поперечные размеры ГОЭ с радиальным РПП (прежде всего для материалов, созданных на основе оптических стекол) их применение оправдано только в миниатюрных ОС. Современные ГОЭ с осевым РПП таких ограничений не имеют и могут использоваться в различных видах ОС. В то же время теоретические основы применения ГОЭ с осевым РПП разработаны в меньшей степени: коррекционные возможности градиентной линзы с осевым РПП, как правило, рассматриваются только в связи с вопросами исправления сферической аберрации; в подавляющем большинстве работ для расчета ОС с осевыми ГОЭ используется метод проб; многие исследователи отмечают недостаточное развитие алгебраических и композиционных методов синтеза ОС. Таким образом, развитие методов синтеза ОС с ГОЭ с осевым РПП является актуальной проблемой.

Данная диссертационная работа посвящена развитию композиционных методов расчета центрированных высокоразрешающих ОС (малокомпонентных объектов с постоянными и переменными фокусными расстояниями для оптико-электронных приборов и комплексов) с градиентными сферическими линзами из оптически прозрачных изотропных материалов с осевым РПП. Композиционные методы, приоритетная роль в разработке которых принадлежит проф. М.М. Русинову, являются одними из важнейших среди методов синтеза ОС. В настоящее время они развиваются за счет применения современных информационных технологий, которые позволяют частично автоматизировать процесс структурного синтеза ОС. Основу композиционных методов составляют простейшие базовые элементы, представляющие собой

одиночные линзы, создающие оптическую силу и свободные от определенных типов аберраций. Построение ОС из таких элементов позволяет обеспечить отсутствие в ней аберраций, которые исправлены в самих базовых линзах. Структурная схема проектируемой ОС определяется выбранным типом базовой линзы. Однако оптические характеристики разрабатываемой ОС также обуславливают требования к кардинальным и аберрационным параметрам базового элемента. Например, при разработке широкоугольных низкоапертурных ОС важно обеспечить устранение полевых аберраций – астигматизма, комы, кривизны поля; при разработке светосильных узкопольных ОС – сферической аберрации и выполнение условия синусов.

Таким образом, развитие теории синтеза ОС с применением композиционных требует изучения параксиальных и аберрационных характеристик, а также коррекционных возможностей базовых оптических элементов различных типов и их комбинаций, в том числе созданных на основе ГОС с осевым РПП. Поэтому исследование свойств базовых ГОЭ с осевым РПП с целью их эффективного применения при разработке современных ОС является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является исследование свойств сферических линз с осевым распределением показателя преломления, результаты которого обеспечат модернизацию композиционных методов синтеза оптических систем за счет расширения номенклатуры базовых элементов.

Объектом исследования в диссертационной работе являются градиентные оптические элементы с осевым распределением показателя преломления.

Предмет исследования – параксиальные и аберрационные свойства базовых элементов объективов различных структурных схем, представляющих собой одиночные сферические линзы с осевым линейным распределением показателя преломления (ОЛРПП).

Для достижения цели диссертационной работы сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ предельных значений габаритных и оптических параметров ГОЭ с осевым РПП, которые могут быть обеспечены при современном уровне развития технологии изготовления, и исследованы различные типы ОС, содержащие такие ГОЭ.

2. Проведен анализ известных методов расчета хода лучей в ГОС и определения аберраций в ОС с ГОЭ, по результатам которого разработаны математическая модель базового ГОЭ с ОЛРПП и алгоритм синтеза такого элемента с требуемыми аберрационными свойствами.

3. Проведен сравнительный анализ дисперсионных характеристик ГОС с осевым РПП, изготовленных с помощью технологий ионного обмена и многокомпонентной диффузии.

4. Рассмотрены способы аппроксимации закона РПП в широкой области спектра, основанные на применении дисперсионной формулы Зельмейера и интерполяционного многочлена Лагранжа.

5. Разработана динамическая библиотека для программы Zemax, позволяющая использовать интерполяционный многочлен Лагранжа для моделирования дисперсионных характеристик ГОС с осевым РПП при анализе и синтезе ОС.

Методы исследования При решении поставленных задач использовались методы математического и компьютерного моделирования, численные методы интерполяции функций, методы геометрической оптики и абберационного анализа, методы структурного и параметрического синтеза оптических систем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые обоснована целесообразность использования ГОЭ с осевым РПП в качестве базовых элементов объективов различного назначения.

2. Разработана математическая модель базовой линзы с ОЛРПП и алгоритм синтеза трех типов таких линз с заданными абберационными свойствами:

- с исправленной сферической абберацией,
- с исправленными сферической абберацией и астигматизмом,
- с исправленными комой и астигматизмом (изопланатические).

3. Впервые для трех типов градиентных базовых линз с ОЛРПП выполнены анализ и систематизация конструктивных параметров, параксиальных характеристик и абберационных свойств в актуальной области значений коэффициентов закона РПП и отношений осевой толщины линз к их фокусным расстояниям.

4. Выработан критерий, определяющий границы применимости теории аббераций третьего порядка при синтезе градиентных базовых линз из материала с осевым РПП.

5. Исследована сравнительная эффективность введения градиента показателя преломления либо в пределах стрелки прогиба первой поверхности, либо всей осевой толщины линзы с исправленной сферической абберацией.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложенный алгоритм синтеза градиентных линз с ОЛРПП с заданными абберационными свойствами позволяет синтезировать базовые элементы, необходимые для разработки объективов с различными структурными схемами.

2. Показано, что базовые линзы с ОЛРПП дополняют известный набор базовых элементов, так как их применение позволяет разрабатывать ОС с лучшими абберационными свойствами в сравнении с аналогами из однородных материалов.

3. Разработанная динамическая библиотека для программы Zemax, представляющая инструмент для моделирования дисперсионных свойств ГОЭ с осевым РПП при помощи интерполяционного многочлена Лагранжа, упрощает решение задач анализа и синтеза ОС, содержащих такие ГОЭ.

4. Разработаны ОС телеобъектива и объектива видеоэндоскопа, содержащие ГОЭ с осевым РПП, которые обеспечивают более высокое качество изображения, чем имеющиеся аналоги на основе однородных

оптических элементов.

Внедрение результатов диссертационной работы Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе лекций «Проектирование оптических систем с градиентными оптическими элементами» и внедрены на ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» в процесс разработки объективов для оптико-электронных изделий, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования конструктивных параметров, параксиальных характеристик и аберрационных свойств линз с ОЛРПП доказывают целесообразность применения ГОЭ с ОЛРПП в качестве базовых элементов объективов различного назначения.

2. Сформулированный критерий применимости теории аберраций третьего порядка позволяет при синтезе градиентной базовой линзы с ОЛРПП в области аберраций третьего порядка оценивать уровень ее реальных аберраций.

3. Использование в ОС базовых линз с осевым РПП обеспечивает более высокое качество изображения в сравнении с аналогичными ОС на основе однородных оптических элементов, что подтверждено результатами математического моделирования телеобъектива и объектива видеозондоскопа.

Апробация результатов и публикации Полученные в диссертационной работе научные результаты обсуждались на заседании и научных семинарах кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана, были доложены на международных конференциях: «Оптика-2005» (г. Санкт-Петербург, 2005), «Прикладная оптика - 2006» (г. Санкт-Петербург, 2006), «Прикладная оптика - 2008» (г. Санкт-Петербург, 2008). Основные результаты диссертации изложены в 15 научных работах, две из которых опубликованы в журнале «Прикладная физика», входящем в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, содержит список библиографических описаний цитируемых источников из 126 наименований. Работа изложена на 265 страницах машинописного текста и содержит 87 рисунков и 88 таблиц.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения, структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния технологий изготовления ГОЭ на основе стекол и пластмасс. Особое внимание уделено методам ионного обмена и объемной диффузии стекла (много компонентной диффузии). Отмечено, что к настоящему времени данные

методы позволяют осуществлять серийное производства ГОЭ с осевым РПП с широким набором конструктивных и технологических параметров. Выделено основное преимущество метода объемной диффузии – возможность изготовления ГОЭ с осевым РПП с высокими значениями светового диаметра, что позволяет не ограничивать потенциальную область применения (как в случае с ГОЭ с радиальным РПП) таких элементов миниатюрными ОС.

Рассмотрены изображающие ОС различного назначения (фотографические объективы с постоянными и переменными фокусными расстояниями, окуляры, объективы приборов ночного видения), включающие ГОЭ с осевым РПП, и методы их расчета. Проведенный анализ ОС с ГОЭ с осевым РПП показывает, что использование таких элементов эффективно влияет на уменьшение значений aberrаций различных типов, а также обеспечивает уменьшение габаритных размеров и количества компонентов.

В результате проведенных исследований сделан вывод о необходимости развития композиционных методов проектирования ОС, содержащих ГОЭ с осевым РПП, за счет синтеза базовых оптических элементов с ОЛРПП с заданными aberrационными свойствами, а также систематизации их коррекционных возможностей.

Вторая глава диссертации посвящена разработке математической модели базовой линзы с ОЛРПП и алгоритма синтеза таких линз с заданными aberrационными свойствами, а также метода исследования и систематизации конструктивных параметров, параксиальных характеристик и aberrационных свойств в актуальной области значений технологических параметров и соотношений осевой толщины линзы к ее фокусному расстоянию.

На основе анализа существующих методов расчета хода параксиальных и реальных лучей в ГОС и определения aberrаций различных порядков ОС с ГОЭ, в качестве основы для синтеза выбрана теория aberrаций третьего порядка. Она обеспечивает создание исходного варианта ОС, имеющего предпосылки для получения требуемой aberrационной коррекции в области реальных aberrаций.

Определены актуальные для синтеза типы базовых линз, обеспечивающие синтез широкой номенклатуры ОС (светосильные объективы с неразвитой полевой характеристикой, светосильные анастигматы симметричного типа, несимметричные объективы с развитым полем зрения):

- с исправленной сферической aberrацией;
- с исправленными сферической aberrацией и астигматизмом;
- с исправленными комой и астигматизмом (изопланатические).

Предложены математическая модель базовой линзы с ОЛРПП и алгоритм синтеза таких линз с заданными aberrационными свойствами. Находящаяся в воздухе одиночная линза (рис. 1) со сферическими поверхностями из материала с ОЛРПП ($n = n_0 + n_1 z$, $0 \leq z \leq d$ – расстояние вдоль оси Z) при расположении предмета в бесконечности имеет шесть параметров: r_1, r_2 – радиусы кривизны, d – толщина по оси, s_p – положение входного зрачка, n_0, n_1 – коэффициенты РПП.

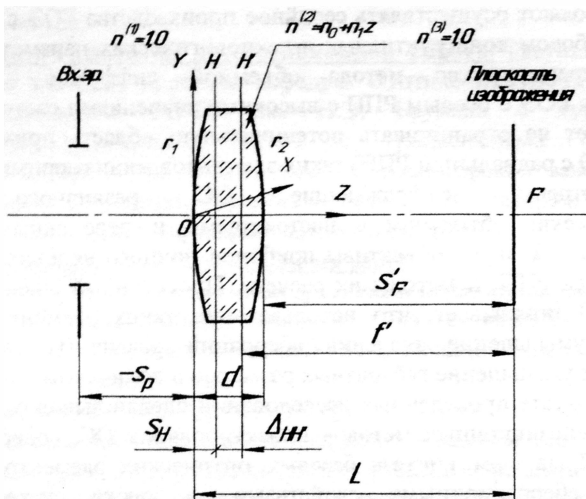


Рис. 1. Линза со сферическими поверхностями из материала с ОЛРПП

Задача синтеза состоит в определении значений этих конструктивных параметров при условиях получения требуемого фокусного расстояния (f') и устранения в таком решении определенных типов монохроматических aberrаций. В рамках теории aberrаций третьего порядка последнее требование трансформируется в условие равенства нулю соответствующего коэффициента Зейделя ($\bar{S}_I - \bar{S}_V$).

Для получения изопланатических линз, линз с исправленной сферической aberrацией и астигматизмом и линз с исправленной сферической aberrацией необходимо решить системы уравнений (1), (2), (3) соответственно:

$$\begin{cases} \bar{S}_{II}(r_1, r_2, n_0, n_1, d, s_p) = 0; \\ \bar{S}_{III}(r_1, r_2, n_0, n_1, d, s_p) = 0; \\ f'(r_1, r_2, n_0, n_1, d) = \text{const.} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} \bar{S}_I(r_1, r_2, n_0, n_1, d) = 0; \\ f'(r_1, r_2, n_0, n_1, d) = \text{const.} \end{cases} \quad (3)$$

Отметим, что (1), (2), (3) представляют собой недоопределенные системы интегральных уравнений, зависящие от шести переменных. Для их решения разработан следующий алгоритм. Исходными данными для синтеза были приняты d , f' , n_0 и n_1 . Величины коэффициентов РПП ограничивались выбором

материалов линзы из оптических стекол и пластмасс ($1,4 \leq n(d) \leq 2,0$) и максимальным перепадом показателя преломления в пределах области существования функции РПП ($-0,4 \leq \Delta n \leq 0,4$). Таким образом, из шести параметров свободными для синтеза базовой линзы остались три, а именно r_1 , r_2 , s_p . При этом задача синтеза свелась к поиску решения системы нелинейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными.

Среди полученных значений r_1 , r_2 и s_p выбирались те, которые могут быть физически реализованы и вычислялись значения оставшихся коэффициентов Зейделя, для которых не обеспечивались условия равенства нулю, и их распределение по поверхностям и средам. Параллельно с коэффициентами Зейделя определялись параксиальные характеристики линз: положение главных плоскостей (s_{H1} , Δ_{H1}), общая длина ($L=d+s'_F$).

Предложенный алгоритм реализован при помощи компьютерной математической программы Maple. Апробация результатов синтеза проводилась при помощи программы для автоматизированного расчета ОС, содержащих ГОЭ, разработанной на кафедре «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты сравнения абберационных составляющих третьего порядка для ряда линз показали, что погрешность в представленных расчетах не превышает 10^{-5} и не является критичной при анализе в области аббераций третьего порядка.

Исследование свойств синтезированных базовых линз проводилось по значениям их конструктивных параметров и величинам остаточных аббераций следующим методом:

- 1) формирование из полученной области решений семейств с общими конструктивными и абберационными свойствами;
- 2) выделение области значений n_0 , n_1 , с оптимальным соотношением остаточных аббераций третьего порядка и преимуществами перед аналогами из однородных материалов;
- 3) выявление общих закономерностей в соответствии значений реальных аббераций и аббераций третьего порядка базовых линз при различных апертурных и полевых характеристиках.

Критерием оценки на третьем этапе служила относительная доля аббераций высших порядков, которая рассчитывалась по формуле:

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

где W_p - величина реальной абберации, W_{3n} - величина абберации третьего порядка. Оценка вклада реальных аббераций производилась для точки на оси по поперечной сферической абберации, для внеосевой крайней точки по астигматической разности и средней кривизне изображения. Расчет аббераций проводился при следующих оптических характеристиках:

- 1) относительные отверстия для изопланатических линз принимались равными $D/f=1:5$ (до $1:2$ для линз с исправленной сферической абберацией);

2) угловые поля (2ω) устанавливались индивидуально из условия возможности прохождения главного луча внесевого пучка.

На каждом этапе исследования проводился сравнительный анализ семейств между собой.

Третья глава диссертации посвящена исследованию свойств «толстых» и «тонких» базовых изопланатических линз с ОЛРПП.

Синтез «тонких» базовых изопланатических линз из материала с ОЛРПП осуществлялся в следующей области значений конструктивных параметров: $f=100$ мм, $d=10$; 20 мм, $n_0 \in [1,4; 2,0]$, $n_1 \in [-0,04; 0,04]$ мм⁻¹.

В результате решения системы (1) и анализа численных значений конструктивных параметров и величин aberrаций были выделены семь семейств решений «тонких» изопланатических линз, основные конструктивные особенности которых представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Область решений для «тонких» базовых изопланатических линз с ОЛРПП

№ семейства	Форма линзы	Положение входного зрачка	Пределы изменения n_0	Пределы изменения n_1 , мм ⁻¹	Аналог с ППП по классиф. проф. М.М. Русинова
1	Мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 < r_2$)	$s_p > 0$	1,4...2,0	-0,005...0,040	Б(ка)
2	При $-0,04 \leq n_1 < 0$: мениск ($r_1 < 0, r_2 < 0, r_1 > r_2 $); при $n_1 = 0$: плосковыпуклая линза; при $0 > n_1 \geq 0,04$: двойковыпуклая линза	При $n_1 < -0,02$: $s_p > 0$ при $n_1 > -0,02$: $s_p < 0$	1,4...2,0	-0,040...0,040	Б(ок)
3	Двойковыпуклая линза	$s_p < 0$	1,5...2,0	-0,040...-0,010	Нет
4	Мениск ($r_1 < 0, r_2 < 0, r_1 < r_2 $)	$s_p < 0$	1,4...1,7	0,028...0,040	Нет
5	Мениск ($r_1 < 0, r_2 < 0, r_1 < r_2 $)	$s_p < 0$	1,4...1,7	0,028...0,040	Нет
6	Мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 > r_2 $)	$s_p > 0$	1,7...2,0	-0,040...-0,024	Нет
7	Мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 > r_2 $)	$s_p > 0$	1,7...2,0	-0,040...-0,024	Нет

С точки зрения абберационных свойств третьего порядка наибольший интерес представляют собой базовые градиентные линзы семейств №1, 2, 3. В семействе №1 существуют области с уменьшенными в сравнении с аналогами из однородных материалов: сферической абберацией при $n_1 < 0$, кривизной Петцваля при $n_1 > 0$. В семействе №2 выделены две области, которые характеризуются более эффективным набором остаточных аббераций в сравнении с аналогами из однородных материалов: $-0,015 \leq n_1 < 0 \text{ мм}^{-1}$ – меньшая дисторсия и кривизна Петцваля; $0 < n_1 \leq 0,04 \text{ мм}^{-1}$ – меньшая сферическая абберация и кривизна Петцваля. Линзы семейства №3, имеют преимущество перед линзами с постоянным показателем преломления (ППП) семейства №2 в отношении сферической абберации.

Исследование в области реальных аббераций показало, что пределы изменения оптических характеристик линз семейств №1-№3, в которых наблюдается хорошая корреляция между реальными абберациями и абберациями третьего порядка могут быть определены следующим образом: $D/f \leq 1:5$; $2\omega \leq 60^\circ$ для семейств №1,2, $2\omega \leq 30^\circ$ для семейства №3.

Анализ конструктивных параметров, а также аббераций семейств №4-7 изопланатических решений позволяет сделать вывод об ограниченной области применения таких линз. Малые величины радиусов кривизны существенно ограничивают рост относительного отверстия и угловых полей (типовые значения не превышают $D/f = 1:10$, $2\omega = 18^\circ$), а большие значения остаточных аббераций нивелируют свойство изопланатичности уже в области аббераций третьего порядка.

Синтез «толстых» базовых изопланатических линз из материала с ОЛРПП осуществлялся в следующей области значений конструктивных параметров: $f = 6,2 \text{ мм}$, $d = 10 \text{ мм}$, $n_0 = 1,6126$, $n_1 \in [-0,02; 0,02] \text{ мм}^{-1}$. В результате синтеза выделены 2 группы:

1) решения, являющиеся развитием 1-го и 2-го семейств «тонких» изопланатических базовых линз с ОЛРПП;

2) решения, которые при $n_1 = 0$ соответствуют известным типам «толстых» базовых изопланатических линз: Б(ка) «толстая», Б(кк), Б(ко), Б(кб).

Исследование полученных групп в области аббераций третьего порядка и реальных аббераций, в результате которого сделаны следующие выводы:

1) в «толстых» изопланатических линзах с ОЛРПП можно обеспечить $2\omega \geq 60^\circ$ без виньетирования и $D/f \geq 1:3$;

2) важнейшей особенностью «толстых» изопланатических линз с ОЛРПП по сравнению с аналогами из однородного стекла является $s'_F > 0$;

3) «толстые» базовые изопланатические линзы с ОЛРПП имеют преимущество перед аналогами из однородного стекла в отношении сферической аббераций, кривизны изображения и дисторсии;

4) доля аббераций высших порядков при одинаковых D/f и 2ω ниже в «толстых» изопланатических решениях, чем в «тонких».

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию свойств «тонких» и «толстых» базовых линз с ОЛРПП с исправленной сферической

абберацией и астигматизмом, а также сравнению эффективности введения ГОС либо в пределах стрелки прогиба первой поверхности, либо всей осевой толщины на основе линз с исправленной сферической абберацией.

Синтез «тонких» базовых линз из материала с ОЛРПП с исправленной сферической абберацией и астигматизмом осуществлялся при: $f=100$ мм, $d=10$; 20 мм, $n_0 \in [1,4;2,0]$, $n_1 \in [-0,04;0,04]$ мм⁻¹.

В результате решения системы (2) и анализа численных значений конструктивных параметров и величин аббераций были выделены четыре семейства решений «тонких» линз с исправленными сферической абберацией и астигматизмом. Отметим, что однородную «тонкую» линзу с аналогичными абберационными свойствами получить невозможно.

Основные конструктивные особенности линз каждого из семейств представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Область решений для «тонких» базовых линз с ОЛРПП с исправленной сферической абберацией и астигматизмом

№ семейства	Форма линзы	Положение входного зрачка	Пределы изменения n_0	Пределы изменения n_1 , мм ⁻¹	Аналог с ППП по классиф. проф. М.М. Русинова
1	При $-0,015 \leq n_1 < -0,01$: мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 < r_2$) при $-0,04 \leq n_1 < -0,015$: мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 > r_2$)	$s_p > 0$	1,5...2,0	-0,04...-0,01	Нет
2	Двояковыпуклая линза	$s_p < 0$	1,5...2,0	-0,04...-0,01	Нет
3	Мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 > r_2 $)	$s_p > 0$	1,6...2,0	-0,04...-0,02	Нет
4	Мениск ($r_1 > 0, r_2 > 0, r_1 > r_2 $)	$s_p > 0$	1,6...2,0	-0,04...-0,02	Нет

С точки зрения абберационных свойств третьего порядка наибольший интерес представляют собой базовые градиентные линзы 1-го и 2-го семейств. В семействе №1 одновременно можно добиться минимизации либо меридиональной комы и дисторсии, либо кривизны Петцваля и дисторсии. В линзах семейства №2 одновременно можно добиться минимизации либо меридиональной комы и кривизны Петцваля, либо дисторсии.

Исследование решений в области реальных aberrаций, позволило определить предельные оптические характеристики для линз 1-го и 2-го семейств $D/f=1:3$, $2\omega \leq 50^\circ$, при которых обеспечивается высокая степень соответствия между реальными aberrациями и aberrациями третьего порядка. Решения 3-го и 4-го семейств имеют ограниченную область применения по причинам указанным для семейств №4-7 «тонких» изопланатических линз.

Поиск решений для «толстых» базовых линз с исправленной сферической aberrацией и астигматизмом из материала с ОЛРПП проводился при следующих наборах исходных данных:

- 1) $f=6,2$ мм, $d=10$ мм, $n_0 \in [1,4; 2,0]$, $n_1 \in [-0,04; 0,04]$ мм⁻¹;
- 2) $f=10$ мм, $d=10$ мм, $n_0 \in [1,4; 2,0]$, $n_1 \in [-0,04; 0,04]$ мм⁻¹.

Однако ни в том, ни в другом случае не было найдено решений, осуществимых физически и технологически.

Для сравнения эффективности введения ГОС либо в пределах стрелки прогиба первой поверхности, либо всей осевой толщины проведен синтез двух видов базовых градиентных линз с исправленной сферической aberrацией на основе набора однородных решений с $f=100$ мм, $d=10; 30$ мм, $n \in [1,5; 2,0]$, $s_p = -15, 0, 15$ мм, рассчитанного из условия минимума сферической aberrации. По результатам исследования таких градиентных линз в области aberrаций третьего порядка и реальных aberrаций при $D/f=1:2$, $2\omega=30^\circ$ сделаны следующие выводы:

- 1) оба вида градиентных линз не имеют друг перед другом преимуществ с точки зрения величин aberrаций;

- 2) возможность применения рассматриваемых видов градиентных линз в ОС определяется технологически достижимой глубиной градиентного слоя: по данному параметру предпочтителен вариант с введением градиента в пределах стрелки прогиба поверхности.

В общем случае (аналог из однородного стекла не является линзой, рассчитанной на минимум сферической aberrации) выбор конструктивного исполнения существенным образом зависит от совокупности корригируемых aberrаций и формы линзы.

Исследования, проведенные в главах 3 и 4, позволили сформулировать критерий, позволяющий при синтезе градиентной базовой линзы в области aberrаций третьего порядка делать прогнозные оценки об уровне ее реальных aberrаций:

- 1) aberrации высших порядков тем больше, чем выше абсолютные значения соответствующих суммарных коэффициентов Зейделя;

- 2) оценка уровня aberrаций высших порядков при исправленном вкладе третьего порядка, может быть проведена на основе анализа распределения поверхностных составляющих и составляющих переноса соответствующего коэффициента Зейделя, а именно чем выше составляющие, тем выше aberrация высших порядков.

В главе 5 проведено исследование дисперсионных свойств современных ГОС на основе оптических стекол, изготовленных методами

ионного обмена и многокомпонентной диффузии, в результате которого сделаны следующие выводы:

- 1) технологический метод изготовления ГОС обуславливает ее дисперсионные свойства;
- 2) анализ относительных частных дисперсий показал, что ГОС с осевым РПП, изготовленные методом ионного обмена, предоставляют большие возможности для исправления хроматических аберраций, чем ГОС, полученные методом многокомпонентной диффузии.

Исследован вопрос моделирования дисперсионных свойств стекол с осевым РПП в программе для автоматизированного расчета оптических систем Zemax. Данная программа во всех своих стандартных версиях позволяет моделировать дисперсионные характеристики стекол с осевым РПП только при помощи дисперсионной формулы Зельмейера:

$$n^2(\lambda, z) = n^2(\lambda_{ref}, z) + \sum_{i=1}^3 \frac{K_i(\lambda^2 - \lambda_{ref}^2)}{\lambda^2 - L_i}, \quad (5)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^{m_K} K_{ij} n^{j-1}(\lambda_{ref}, z_i), \quad L_i = \sum_{j=1}^{m_L} L_{ij} n^{j-1}(\lambda_{ref}, z_i),$$

где $n(\lambda, z)$ – моделируемый закон РПП зависящий от длины волны λ и координаты z , K_{ij} и L_{ij} – константы дисперсионной формулы, $n(\lambda_{ref}, z)$ – известный закон РПП на опорной длине волны λ_{ref} .

В процессе синтеза ОС с новыми материалами, для которых матрицы констант не определены, формулируется задача их восстановления на основе известных законов РПП для ряда дискретных длин волн. Данная задача не является тривиальной в связи с тем, что в основе математического описания формулы Зельмейера лежит рациональная функция двух переменных и при интерполяции РПП данной дисперсионной формулой методом неопределенных коэффициентов возникают точки разрывов, которые некорректно обрабатываются программой Zemax. В работе предложены способы устранения разрывов аппроксимирующей функции:

- 1) понижение значения индекса суммирования m_L относительно m_K ;
- 2) подбор значений узловых точек z_i .

В качестве альтернативы, лишенной недостатков присущих дисперсионной модели Зельмейера, был использован интерполяционный многочлен Лагранжа. Для этого была разработана динамическая библиотека, подключаемая к программе Zemax при помощи инструмента User Defined Surface, которая позволяет описывать дисперсионные свойства ГОЭ с линейным и квадратичным осевым РПП и использовать для интерполяции от 2-5 законов РПП на разных длинах волн.

На основе схемы «Таир» (рис. 2) рассчитаны 4 варианта телеобъектива ($f'=40$ мм, $D/f'=1.3$, $2\omega=11.4^\circ$, $2y'=8$ мм) с высоким коэффициентом телеукорочения ($T=0.8$), содержащих ГОЭ с осевым РПП (табл. 3).

Показана эффективность применения ГОЭ в ОС телеобъектива, направленная на улучшение качества изображения, оценка которого

проводилась по полихроматической функции передачи модуляции (ПФПМ) в спектральном диапазоне 0,5-0,7 мкм. По сравнению с объективом-прототипом, созданным на основе сферических линз из однородных материалов, получено увеличение контраста на пространственных частотах до 100 мм^{-1} . На пространственной частоте 50 мм^{-1} достигнуто улучшение ПФПМ для точки на оси до 6%, для внеосевой крайней точки до 60%.

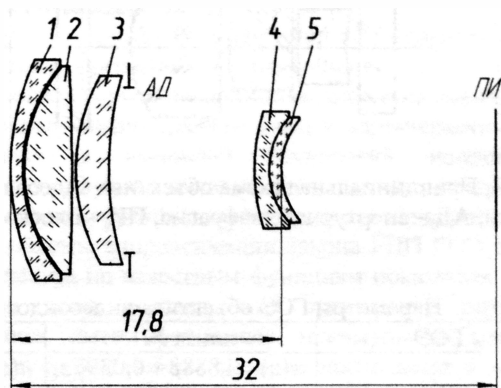


Рис. 2. Принципиальная схема телеобъектива:

1-5 – № линзы, АД – апертурная диафрагма, ПИ – плоскость изображения

Таблица 3.

Параметры ГОЭ рассчитанных вариантов телеобъектива

Параметры ГОЭ	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
№ линзы объектива	5	4	3	3
Вид РПП	линейный участок	линейное	линейное	квадратичное
Глубина градиентной зоны, мм	2,0	1,5	2,9	2,5
Перепад показателя преломления	-0,019	-0,031	-0,030	-0,027
Градиент перепада показателя преломления, мм^{-1}	-0,010	-0,021	-0,010	-0,011

Рассчитан двухкомпонентный сверхширокоугольный объектив ($f'=2,73 \text{ мм}$, $D/f'=1:3,8$, $2\omega=114,4^\circ$) для видеозндоскопа (рис. 3) с базовыми элементами с ОЛРПП (табл. 4), имеющий лучшие абберационные характеристики по сравнению прототипом, состоящим из сферических линз с ППП: среднеквадратическим радиус пятна рассеяния ($r_{СКВ}$) в спектральном диапазоне 0,465-0,618 мкм для точки на оси – 10,66 мкм (на 0,13 мкм больше, чем в прототипе), для зоны поля ($2\omega=91,5^\circ$) 19,54 мкм (на 6,40 мкм меньше, чем в

прототипе), а для края поля ($2\omega=114,4^\circ$) 21,26 мкм (на 5,10 мкм меньше, чем в прототипе).

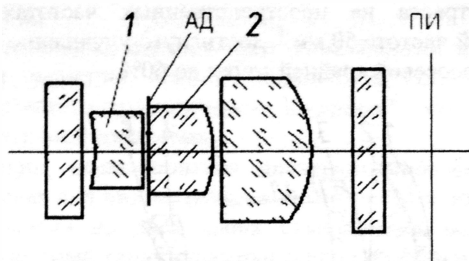


Рис. 3. Принципиальная схема объектива видеоэндоскопа:
1-2 – № линзы, АД – апертурная диафрагма, ПИ – плоскость изображения

Таблица 4.

Параметры ГОЭ объектива видеоэндоскопа

Параметры ГОЭ	линза №1	линза №2
Закон РПП	$n(z) = 1,8888 + 0,0397z$	$n(z) = 1,9345 + 0,0397z$
Глубина градиентной зоны, мм	1,26	1,65
Перепад показателя преломления	0,05	0,07
Градиент перепада показателя преломления, мм ⁻¹	0,04	0,04

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснована целесообразность использования ГОЭ с ОЛРПП в качестве базовых элементов объективов различного назначения.

2. Разработаны математическая модель базовой линзы с ОЛРПП и алгоритм синтеза трех типов таких линз с заданными абберационными свойствами в области аббераций третьего порядка:

- с исправленной сферической абберацией,
- с исправленными сферической абберацией и астигматизмом,
- с исправленными комой и астигматизмом (изопланатические).

3. Для заявленных типов градиентных базовых линз с ОЛРПП выполнены расчет, анализ и систематизация их конструктивных параметров, параосиальных характеристик и абберационных свойств (в области реальных аббераций и аббераций третьего порядка) в широком диапазоне значений коэффициентов закона РПП и отношений осевых толщин линз к их фокусным расстояниям.

4. Выявлены области значений конструктивных параметров, в пределах которых базовые линзы с ОЛРПП обладают лучшими абберрационными свойствами, чем их аналоги из однородных материалов.

5. Выработан критерий применимости теории аббераций третьего порядка, который позволяет на этапе синтеза градиентных базовых линз из материала с осевым ОЛРПП в области аббераций третьего порядка оценивать уровень их реальных аббераций.

6. В результате исследования свойств линз с исправленной сферической абберацией определены преимущества применения ГОС с ОЛРПП либо в пределах стрелки прогиба первой поверхности, либо всей осевой толщины.

7. Сравнительный анализ дисперсионных характеристик ГОС с осевым РПП, изготовленных с помощью технологий ионного обмена и многокомпонентной диффузии, показал, что данные материалы способны обеспечить эффективную коррекцию хроматических аббераций.

8. Анализ проблемы аппроксимации закона РПП ГОЭ с осевым РПП в широкой области спектра по известным функциям показателя преломления на дискретных длинах волн показал, что применение интерполяционного многочлена Лагранжа имеет решающее преимущество перед способом, использующим формулу Зельмейера, которое заключается в том, что искомая аппроксимирующая функция всегда непрерывна во всей области определения. Разработана динамическая библиотека для программы Zemax, позволяющая использовать интерполяционный многочлен Лагранжа для моделирования дисперсионных характеристик ГОС с осевым РПП при анализе и синтезе ОС.

9. Математическое моделирование 4-х вариантов телеобъектива ($f'=40$ мм, $D/f'=1:3$, $2\omega=11,4^\circ$, $T=0,8$) и двухкомпонентного сверхширокоугольного объектива ($f'=2,73$ мм, $D/f'=1:3,8$, $2\omega=114,4^\circ$) для видеозондоскопа, содержащих базовые линзы с осевым РПП, показало, что они характеризуются лучшим качеством изображения по сравнению с аналогами из однородных материалов.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Исследование «толстой» изопланатической базовой линзы с осевым распределением показателя преломления // Прикладная физика. 2011. №3. С.125–130.

2. Алимов А.Е. Синтез и исследование изопланатической базовой градиентной линзы с осевым распределением показателя преломления // Прикладная физика. 2010. №1. С.118–123.

3. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Компактный сверхширокоугольный объектив для микровидеокамеры // Прикладная оптика – 2006: Сборник трудов МНТК. Санкт-Петербург, 2006. Т. 3. С. 173–176.

4. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Синтез градиентной изопланатической базовой линзы // Прикладная оптика – 2008: Сборник трудов МНТК. Санкт-Петербург, 2008. Т. 2. С. 282–286.

5. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Исследование эффективности применения градиентных оптических материалов в объективе видеозондоскопа

// Медико-технические технологии на страже здоровья. Сборник трудов VIII РНТК. Родос (Греция), 2006. С. 76–81.

6. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Малогабаритный широкоугольный объектив для видеозэндоскопа // Медико-технические технологии на страже здоровья: Сборник трудов IX РНТК. Катания (Италия), 2007. С. 106–110.

7. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Градиентная базовая изопланатическая линза для объектива видеозэндоскопа // Медико-технические технологии на страже здоровья: Сборник трудов XI РНТК. Будва (Черногория), 2009. С. 136–139.

8. Алимов А.Е., Ровенская Т.С. Развитие схемы сверхширокоугольного объектива видеозэндоскопа // Оптика – 2005: Сборник трудов МНТК. Санкт-Петербург, 2005. С. 133.

9. Разработка методов проектирования оптических схем современных широкоугольных объективов с асферическими и градиентными линзами: Отчет по теме «Г4Т» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы Т.С. Ровенская. Исполнители Алимов А.Е., Крюков А.В., Кузичев В.И. и др. ГР № 01200602870, Инв. № 02200601598. М., 2005. 130 с.

10. Исследование и разработка методов анализа аберрационных свойств оптических систем: Отчет по теме «Г64Т» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы Т.С. Ровенская. Исполнители Алешина В.А., Алимов А.Е., Королев П.Н. и др. ГР № 01200701621, Инв. № 02200700731. 123 с.

11. Исследование и разработка методов анализа и синтеза оптических систем с асферическими и градиентными элементами: Отчет по теме «Г74Т» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы В.И. Пустовойт. Исполнители Алимов А.Е., Иконина А.В., Косых К.А. и др. ГР № 01200802870, Инв. № 02200801894. М., 2007. 122 с.

12. Разработка принципов построения и коррекции оптических схем высокоразрешающих оптических систем на основе асферических, градиентных и гибридных линз: Отчет по теме «Г84Т» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы В.И. Пустовойт. Исполнители Алимов А.Е., Крюков А.В., Ровенская Т.С. и др. ГР № 01200901297, Инв. № 02200901252. М., 2008. 145 с.

13. Разработка методов синтеза высокоразрешающих компактных короткофокусных монофокальных и панкратических объективов цифровых камер видимого и ближнего инфракрасного диапазонов: Отчет по теме «Г94Т» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы В.И. Пустовойт. Исполнители Алимов А.Е., Гужавин Д.А., Крюков А.В. и др. ГР № 01201000178, Инв. № 02201152745. М., 2009. 140 с.

14. Алимов А.Е. Улучшение качества объектива видеозэндоскопа путем применения градиентных сред // Студенческая научная весна – 2005: Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции. Москва, 2005. Т. 2. С. 19–20.

15. Алимов А.Е. Развитие схемы сверхширокоугольного объектива видеозэндоскопа // Студенческая научная весна – 2006: Сборник трудов студенческой научно-технической конференции. Москва, 2006. С. 94–96.