

На правах рукописи

ЕЖОВ ЕВГЕНИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ
РАЗРАБОТКА СХЕМ И МЕТОДИК РАСЧЕТА ЦЕНТРИРОВАННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ОДНОРОДНЫЕ ЛИНЗЫ С
АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ, ДИФРАКЦИОННЫЕ И
ГРАДИЕНТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Специальность 01.04.05. – Оптика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Пенза - 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Пензенский государственный университет архитектуры и строительства” (ПГУАС) и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева” (СГАУ).

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор Степанов С.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Захаров В.П.
доктор физико-математических наук, доцент Карпеев С.В.
доктор физико-математических наук, заслуженный изобретатель РФ Турухано Б.Г.

Ведущая организация: ФГУП НПО «Государственный институт прикладной оптики»

Защита состоится «___» _____ 200 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д212.215.01 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» _____ 200_ г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, профессор

В.Г. Шахов

Общая характеристика работы.

Актуальность темы.

Развитие и совершенствование технологий, основанных на использовании оптического излучения, привело к расширению круга решаемых оптикой задач и к существенному повышению требований, предъявляемых к оптическим системам различного назначения. На удовлетворение этих требований, нередко сочетающих предельные оптические и эксплуатационные характеристики, направлен поиск новых схемных решений, совершенствование методов проектирования и расширение элементной базы оптики. Последнее ориентируется на широкое использование асферических преломляющих и отражающих поверхностей, дифракционных и градиентных элементов.

Массовое производство асферических поверхностей стало возможным и экономически целесообразным благодаря появлению современных методов формообразования на основе прецизионной штамповки, а практическая возможность изготовления высокоэффективных дифракционных элементов открылась в последние десятилетия с развитием микроэлектронных и лазерных технологий. Что касается градиентной оптики, то сегодня уже свыше пятнадцати фирм, используя технологию ионного и диффузионного обмена, промышленно производят и поставляют на рынок заготовки из градиентных материалов, градиентные оптические элементы, а также готовые приборы на основе таких элементов.

Вращательно-симметричные градиентные и дифракционные линзы, а также однородные линзы с асферическими поверхностями обладают более широкими, чем у традиционных элементов возможностями коррекции аберраций, и их включение в центрированную оптическую систему, состоящую из нескольких элементов, открывает дополнительные возможности для ее совершенствования.

К началу нового столетия сложились два основных направления разработки оптических систем с дифракционными и градиентными элементами. Одно из этих направлений, у истоков которого стояли М.А. Ган, К.С. Мустафин, А.В. Лукин, M.G. Morris, D.T. Moore, J.B. Caldwell и др., предполагает использование существующих и, в частности, классических схемных решений с последующей заменой в них одного или нескольких традиционных оптических элементов дифракционными или градиентными. Другое направление предполагает поиск принципиально новых схемных решений, которые позволили бы в максимальной степени использовать преимущества новой элементной базы. Значительный вклад в это направление внесли С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, С.А. Степанов, Р.Е. Ильинский, J. B Caldwell, I. Kitano, D. T. Moore и др. В его рамках предложен и исследован ряд оптических систем различного функционального назначения. Анализ результатов, достигнутых отечественными и зарубежными специалистами, показывает, что оба эти направления разработки оптических систем с дифракционными и градиентными элементами будучи, несомненно, результативными далеко не исчерпаны. В начальной стадии находится разработка принципов и методик использования дифракционных и градиентных элементов для совершенствования известных оптических систем. Ряд предложенных новых схемных решений весьма узок, да и многие из этих решений требуют дальнейшего исследования и развития.

Сегодняшние успехи в области технологии и промышленное производство асферических поверхностей, дифракционных и градиентных элементов позволяют

направить поиск на совершенствование, благодаря использованию этой элементной базы, реальных оптических приборов самого различного назначения. При этом на первый план выдвигается задача выбора оптимальной исходной схемы, под которой понимают схему, включающую лишь те элементы, свойства и возможности которых необходимы, а количество достаточно для удовлетворения требований, предъявляемых к разрабатываемой системе. Эта задача, названная М.М. Русиновым композицией оптических систем, не решается ни одной из существующих компьютерных программ, предназначенных для расчета и проектирования оптики.

Традиционно разработчики оптических систем komponуют исходную схему, опираясь на собственный опыт и используя при этом разработанный Г.Г. Слюсаревым и основанный на теории аберраций третьего порядка аппарат основных параметров P , W и C , или по методу М.М. Русинова, исходя из аберрационных свойств отдельных элементов. Однако наиболее результативным считается подход, при котором исходная схема выбирается из архива известных схемных решений. В созданных в последние годы коммерческих программных продуктах, предназначенных для расчета, исследования, оптимизации и аттестации оптических систем, реализован именно этот подход, опирающийся на библиотеки известных схемных решений. К наиболее мощным из этих программных продуктов, в частности, относятся DEMOS (разработчик - ВНИЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова»), CODE V (Optical Research Associates), ZEMAX Optical design program (Focus Software, Inc.) . Они предоставляют возможность, наряду с традиционными, включать в систему новые элементы трех вышеотмеченных типов, но при этом автоматизированная трансформация схемы в части изменения взаимного расположения элементов различных типов и их количества в процессе оптимизации или какой-либо другой операции не предусмотрена.

При разработке объективов-монохроматов, состоящих из дифракционных и градиентных элементов, хорошо зарекомендовал себя метод, предложенный Г.И. Грейсухом и С.А. Степановым. Метод базируется на решении компенсационных уравнений, обеспечивающих устранение аберраций нескольких порядков малости. Аберрационные коэффициенты при этом получают на основе диаграммы рассеяния псевдолучей, ход которых через оптическую систему рассчитывается в приближении заданного порядка малости. Есть все основания полагать, что дальнейшее развитие этого метода позволит эффективно использовать его при разработке оптических схем центрированных гибридных систем, предназначенных для работы с немонохроматическим излучением и включающих, наряду с другими элементами, однородные линзы с асферическими поверхностями и дифракционные линзы, структура которых размещена на таких поверхностях.

Вышеизложенное определило актуальность и обусловило выбор цели и задач, решаемых в настоящей диссертации.

Целью работы является развитие и распространение псевдолучевого метода расчета градиентных и дифракционно-градиентных объективов-монохроматов на центрированные оптические системы с более широкой элементной базой, предназначенные для работы, как с монохроматическим, так и с полихроматическим излучением; разработка на этой основе оптических схем и методик определения конструктивных параметров систем различного назначения, а также анализ потенциальных возможностей оптических систем, получаемых в результате их оптимизации.

В соответствии с поставленной целью определены основные задачи диссертации:

- на основе анализа известных методик разработать аппарат расчета и исследования оптических систем, включающих однородные рефракционные линзы с асферическими поверхностями, дифракционные и градиентные элементы;
- исследовать и провести сопоставительный анализ дисперсионных свойств элементов различных типов;
- используя развитый аппарат расчета и результаты сопоставительного анализа дисперсионных свойств элементов различных типов распространить метод компоновки схем дифракционно-градиентных объективов-монохроматов на гибридные системы с более широкой элементной базой, предназначенные для работы на одной или нескольких длинах волн, а также с полихроматическим излучением;
- исследовать возможности и определить пути совершенствования дифракционно-градиентных объективов-монохроматов;
- разработать новые схемы и методики расчета гибридных оптических систем для информационных и дисплейных технологий, предназначенных для работы на нескольких длинах волн или с полихроматическим излучением;
- исследовать потенциальные возможности систем различного функционального назначения, полученных в результате оптимизации найденных новых схемных решений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Методика расчета хода псевдолучей развита и распространена на четные преломляющие асферические поверхности и дифракционные линзы, размещенные на таких поверхностях.
2. Разработан метод компоновки оптических схем гибридных систем различного функционального назначения, предполагающий использование элементов, обладающих различными дисперсионными свойствами и допускающих раздельное управление аберрациями различных порядков, отличающийся тем, что позволяет получать схемы центрированных оптических систем, предназначенных для работы, как с монохроматическим, так и с немонахроматическим излучением и включающих, наряду с другими элементами, однородные линзы с асферическими поверхностями и дифракционные линзы, структура которых размещена на таких поверхностях.
3. Показана возможность одновременного устранения всех монохроматических аберраций третьего и пятого порядков у объективов, состоящих из трех дифракционных линз, разделенных неоднородными средами, а также двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда, т.е. оптического элемента, имеющего внешние плоские преломляющие поверхности и изготовленного из двух неоднородных материалов, разделенных сферической поверхностью склейки.
4. Показана возможность многократного снижения уровня дисторсии дифракционно-градиентных объективов за счет взаимной компенсации ее составляющих различных порядков без уменьшения поля высококачественного

изображения и разработана методика расчета высокоразрешающих ортоскопических объективов-монохроматов.

5. Разработана методика ахро- и апохроматической коррекции оптических систем с помощью двух- и трехлинзовых рефракционно-дифракционных корректоров.
6. На основе результатов сопоставительного анализа сферохроматизма однородных линз с асферическими поверхностями и дифракционных линз, разработаны схемы и методика расчета высокоразрешающих дифракционно-рефракционных объективов оптических систем комбинированных устройств записи и чтения цифровых дисков двух форматов.
7. Показано, что введение в визуальный тракт градиентного эндоскопа корректоров aberrаций, komponуемых и рассчитываемых по разработанной в диссертации методике, основанной на результатах анализа aberrационных и дисперсионных свойств стержневых градиентных элементов, позволяет при устраненном продольном и поперечном хроматизме существенно снизить уровень остаточных монохроматических aberrаций и тем самым значительно повысить полихроматическое разрешение в наблюдаемом изображении.

Практическая ценность работы определяется следующими результатами:

- на основе анализа известных методик развит аппарат расчета и исследования оптических систем, включающих однородные рефракционные линзы с асферическими поверхностями, дифракционные и градиентные элементы;
- найденные решения коррекции дисторсии дифракционно-градиентных объективов расширяют возможности таких объективов;
- предложенная методика ахро- и апохроматической коррекции оптических систем с помощью рефракционно-дифракционных корректоров позволяет существенно улучшать характеристики объективов, собранных по классическим схемам, а также разрабатывать новые схемы с полевыми характеристиками близкими к предельным для выбранного числа элементов;
- разработанная схема пластикового микрообъектива для видеокамер систем наблюдения и предложенный вариант модификации оптических трактов телевизоров и дисплеев с проекцией на просвет демонстрируют возможности повышения за счет использования дифракционных элементов конкурентоспособности этой массово выпускаемой наукоемкой продукции;
- разработанные схемы и методика расчета высокоразрешающих дифракционно-рефракционных объективов оптических систем комбинированных устройств записи и чтения цифровых дисков нескольких форматов открывают возможности совершенствования таких устройств, улучшения их технических характеристик и снижения стоимости;
- предложенные методы коррекции aberrаций градиентных эндоскопов указывают пути модернизации выпускаемых приборов и создают основу для разработки приборов нового поколения.

На защиту выносятся:

1. Разработанный метод компоновки схем гибридных оптических систем, различного функционального назначения, включающих однородные линзы со сферическими или асферическими поверхностями, дифракционные и радиально-градиентные элементы.

2. Результаты анализа возможностей одновременного устранения всех монохроматических аберраций третьего и пятого порядков у объективов, состоящих из трех дифракционных линз, разделенных неоднородными средами, а также двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда.
3. Методика расчета и конструктивные параметры дифракционно-градиентных объективов, которые благодаря взаимной компенсации составляющих дисторсии различных порядков способны формировать изображение, близкое к ортоскопическому, с дифракционным качеством по большому полю.
4. Методика ахроматической и апохроматической коррекции изображающих оптических систем с помощью корректоров, состоящих из дифракционной и одной или двух склеенных однородных рефракционных линз.
5. Результаты исследования возможностей коррекции аберраций широких пучков на двух длинах волн у оптической системы, состоящей из дифракционной линзы и однородной рефракционной линзы с аферическими поверхностями.
6. Схемы, методика расчета и конструктивные параметры дифракционно-рефракционной оптической системы чтения/записи цифровых дисков двух форматов.
7. Схемы и методика расчета корректоров аберраций жестких градиентных эндоскопов, позволяющих при устраненном продольном и поперечном хроматизме существенно снизить уровень остаточных монохроматических аберраций и тем самым значительно повысить полихроматическое разрешение в наблюдаемом изображении.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV и VI Международных конференциях «Прикладная оптика» (г. Санкт-Петербург, 2000, 2004); 3rd Int. Workshop on Commercial Radio Sensors and Communication Techniques (г. Линц, Австрия, 2001); IASTED International Conference (г. Новосибирск, 2002); III Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003» (г. Санкт-Петербург, 2003); V и VI Всероссийских научно-технических конференциях «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов» (гг. Пенза, Заречный, 2004, 2006); II, III, IV и V Всероссийских научно-технических конференциях «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов» (г. Пенза, 2004, 2005, 2006, 2007); Международной конференции «Frontiers in optics 2005/Laser science XXI» (г. Таксон, США, 2005); VII Международной конференции «Прикладная оптика - 2006» и конференции «Оптика и образование- 2006», проводившихся в рамках Международного оптического конгресса «Оптика-XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2006); V Международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (г. Пенза, 2006); Всероссийском семинаре «Юрий Николаевич Денисюк - основоположник отечественной голографии» (г. Санкт-Петербург, 2007); Международной конференции «Математическое моделирование, обратные задачи и приложения» (г. Хмельницкий, Украина, 2007); научных семинарах ИСОИ РАН и кафедры Технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета.

Исследования, результаты которых представлены в данной диссертационной работе, проводились:

- при финансовой поддержке Министерства образования РФ (грант № Т0208.0277 по фундаментальным исследованиям в области технических наук);
- при совместной финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ и американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF) (грант № Y1-P-14-03, в рамках программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRNE), направленный на оказание поддержки новому поколению российских ученых);
- в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве с ООО "НТЦ "ВНИИМП-ОПТИМЕД-1". (Москва).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 54 печатные работы.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она изложена на 222 страницах машинописного текста и содержит 70 рисунков и 44 таблиц. В списке цитируемой литературы 262 наименований.

Содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, описана структура и приведено краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена методам расчета, компоновке схем и получению исходных конструктивных параметров гибридных оптических систем.

Приведено описание используемых в данной работе математических моделей асферических поверхностей, дифракционных элементов и неоднородных сред. Обоснован выбор метода гауссовых скобок для параксиального расчета и метода получения аберрационных коэффициентов на основе диаграммы рассеяния псевдолучей, ход которых через оптическую систему рассчитывается в приближении заданного порядка малости. Методика расчета хода псевдолучей развита и распространена на четные преломляющие асферические поверхности наиболее общего вида и дифракционные линзы (ДЛ), размещенные на таких поверхностях.

Расчет хода псевдолуча через оптическую систему включает две задачи: прослеживание хода псевдолуча через среду, которая в общем случае может быть ограничена двумя асферическими поверхностями, и определение параметров преломленного или дифрагированного псевдолуча.

Ход луча описывается в системе координат оптической оси, т.е. в декартовой системе, ось OZ которой совпадает с оптической осью. Высота и наклон луча определяются с помощью векторов ρ и ϵ ; при этом вектор ρ имеет составляющие $[x(z), y(z), 0]$, а вектор ϵ - составляющие $(\epsilon_x, \epsilon_y, 0)$, где ϵ_x и ϵ_y - направляющие тангенсы луча, связанные с его направляющими косинусами соотношениями $\epsilon_x = \alpha_x / \alpha_z$ и $\epsilon_y = \alpha_y / \alpha_z$.

Четная асферическая поверхность наиболее общего вида в системе координат с началом в вершине поверхности описывается уравнением

$$F(\rho, z) = z - \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} - \sum \alpha_i \rho^{2i} = 0, \quad (1)$$

где c - кривизна поверхности в ее вершине, κ - квадрат эксцентриситета, α_i - при $i = 1, 2, 3, \dots$ коэффициенты асферической деформации.

При распространении луча в однородной среде между k -ой и $(k+1)$ -ой асферическими поверхностями оптической системы луч на входе в среду задается векторами ρ_k и ϵ_k , а на выходе из среды - векторами ρ_{k+1} и ϵ_{k+1} . Если $z_{k,k+1}$ есть расстояние вдоль оси OZ от точки входа луча в однородную среду до точки его выхода, то очевидно, что векторы ρ_k , ϵ_k и, ρ_{k+1} , ϵ_{k+1} связаны между собой уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \rho_{k+1} &= \rho_k + z_{k,k+1} \epsilon_k, \\ \epsilon_{k+1} &= \epsilon_k \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где

$$z_{k,k+1} = d_k + z_{k+1} - z_k. \quad (3)$$

Здесь d_k - расстояние между вершинами k -ой и $(k+1)$ -ой поверхностей, z_k - координата точки пересечения луча с k -ой поверхностью в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности и, аналогично, z_{k+1} - координата точки пересечения луча с $(k+1)$ -ой поверхностью в системе координат, связанной с вершиной $(k+1)$ -ой поверхности.

Векторы ρ_k и ϵ_k представляются в виде сумм слагаемых нечетных порядков малости относительно модулей векторов, определяющих высоту и наклон луча во входном зрачке оптической системы,

$$\left. \begin{aligned} \rho_k &= \rho_k^{(1)} + \rho_k^{(3)} + \rho_k^{(5)} + \dots, \\ \epsilon_k &= \epsilon_k^{(1)} + \epsilon_k^{(3)} + \epsilon_k^{(5)} + \dots \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

а расстояние $z_{k,k+1}$ - в виде суммы членов нулевого и четных порядков малости:

$$z_{k,k+1} = z_{k,k+1}^{(0)} + z_{k,k+1}^{(2)} + z_{k,k+1}^{(4)} + \dots \quad (5)$$

Подстановка (4) и (5) в первое из уравнений (2), дает возможность связать составляющие различных порядков малости векторов, определяющих высоту луча на входе и выходе из среды:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{k+1}^{(1)} &= \rho_k^{(1)} + z_{k,k+1}^{(0)} \epsilon_k^{(1)}, \\ \rho_{k+1}^{(3)} &= \rho_k^{(3)} + z_{k,k+1}^{(0)} \epsilon_k^{(3)} + z_{k,k+1}^{(2)} \epsilon_k^{(1)}, \\ \rho_{k+1}^{(5)} &= \rho_k^{(5)} + z_{k,k+1}^{(0)} \epsilon_k^{(5)} + z_{k,k+1}^{(2)} \epsilon_k^{(3)} + z_{k,k+1}^{(4)} \epsilon_k^{(1)} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Слагаемые различных порядков малости расстояния $z_{k,k+1}$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} z_{k,k+1}^{(0)} &= d_k, \quad z_{k,k+1}^{(2)} = (\beta_{1,k+1} - \beta_{1,k}) u^{(2)} + \beta_{1,k+1} d_k (2v^{(2)} + d_k w^{(2)}), \\ z_{k,k+1}^{(4)} &= (\beta_{1,k+1} - \beta_{1,k}) u^{(4)} + (\beta_{2,k+1} - \beta_{2,k}) [u^{(2)}]^2 + \\ &+ \beta_{1,k+1} [d_k (2v^{(4)} + d_k w^{(4)}) + 2z_{k,k+1}^{(2)} (v^{(2)} + d_k w^{(2)})] + \\ &+ \beta_{2,k+1} d_k \{ 4d_k [v^{(2)}]^2 + d_k^3 [w^{(2)}]^2 + 4u^{(2)} v^{(2)} + 2d_k u^{(2)} w^{(2)} + 4d_k^2 v^{(2)} w^{(2)} \}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} u^{(2)} &= [\rho_k^{(1)}]^2, & u^{(4)} &= 2\rho_k^{(1)}\rho_k^{(3)}, \\ v^{(2)} &= \rho_k^{(1)}\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(1)}, & v^{(4)} &= \rho_k^{(3)}\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(1)} + \rho_k^{(1)}\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(3)}, \\ w^{(2)} &= [\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(1)}]^2, & w^{(4)} &= 2\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(1)}\boldsymbol{\varepsilon}_k^{(3)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а параметры $\beta_{i,k}$ и $\beta_{i,k+1}$ (при $i=1,2$), относящиеся к k -ой и $k+1$ -ой поверхностям, вычисляются по общим формулам

$$\beta_1 = \frac{1}{2}c + \alpha_1, \quad \beta_2 = \frac{1}{8}(1 + \kappa)c^3 + \alpha_2. \quad (9)$$

Формулы (6)-(9) позволяют рассчитать ход псевдолуча пятого порядка через однородную среду, ограниченную двумя асферическими поверхностями, каждая из которых может представлять собой как поверхность оптического элемента, так и любую другую поверхность, например, поверхность предмета или изображения.

Расчет хода псевдолуча через преломляющую или дифрагирующую поверхность сводится к тому, чтобы по известным составляющим различных порядков малости векторов $\boldsymbol{\rho}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}$, характеризующих псевдолуч, падающий на поверхность, разделяющую две среды или несущую дифракционную микроструктуру, найти составляющие различных порядков малости вектора $\boldsymbol{\varepsilon}'$, определяющего направление распространения прошедшего (преломленного или дифрагированного) псевдолуча. Решение этой задачи, основанное на использовании закона Снеллиуса или формулы дифракционной решетки, требует знания, в частности, составляющих различных порядков малости нормали к поверхности.

Вектор нормали к поверхности, описываемой уравнением $F(\rho, z) = 0$, может быть представлен в виде

$$\mathbf{o} = \frac{\nabla F}{\sqrt{(\nabla F)^2}}, \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \nabla F &= \mathbf{i} \frac{\partial F}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial F}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial F}{\partial z}, \\ \sqrt{(\nabla F)^2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Путем преобразования и дифференцирования выражения (1) получено

$$\sqrt{(\nabla F)^2} = \sqrt{1 + \rho^2 A^2}, \quad (12)$$

где

$$A = \frac{c}{\sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2 \rho^2}} + 2 \sum i \alpha_i \rho^{2(i-1)}. \quad (13)$$

В результате, составляющие вектора нормали имеют вид

$$o_x = -x A o_z, \quad o_y = -y A o_z, \quad o_z = 1 / \sqrt{1 + \rho^2 A^2}. \quad (14)$$

Разложение в ряд радикала $\sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2 \rho^2}$ и подстановка результата в (1) дает

$$F(\rho, z) = z - \beta_1 \rho^2 - \beta_2 \rho^4 - \beta_3 \rho^6 - \dots, \quad (15)$$

где β_1 и β_2 вычисляются по формулам (9), а

$$\beta_3 = \frac{1}{16}(1 + \kappa)^2 c^5 + \alpha_3. \quad (16)$$

Дифференцирование уравнения (15) приводит к

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= -2x(\beta_1 + 2\beta_2 \rho^2 + 3\beta_3 \rho^4 + \dots), \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= -2y(\beta_1 + 2\beta_2 \rho^2 + 3\beta_3 \rho^4 + \dots), \\ \frac{\partial F}{\partial z} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Далее, используя соотношения (8), заключенный в скобки сомножитель в формулах (17)

$$\Lambda = \beta_1 + 2\beta_2 \rho^2 + 3\beta_3 \rho^4 = \beta_1 + 2\beta_2 (u^{(2)} + u^{(4)}) + 3\beta_3 (u^{(2)})^2 + \dots, \quad (18)$$

может быть представлен в виде суммы слагаемых различных порядков малости

$$\Lambda = \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(2)} + \Lambda^{(4)} + \dots, \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Lambda^{(0)} &= \beta_1, \\ \Lambda^{(2)} &= 2\beta_2 u^{(2)}, \\ \Lambda^{(4)} &= 2\beta_2 u^{(4)} + 3\beta_3 (u^{(2)})^2. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Подстановка переменной Λ в (12) дает

$$\sqrt{(\nabla F)^2} = \sqrt{1 + 4\rho^2 \Lambda^2}, \quad (21)$$

откуда

$$o_z = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\rho^2 \Lambda^2}} = 1 - 2(u^{(2)} + u^{(4)}) \left[(\Lambda^{(0)})^2 + 2\Lambda^{(0)} \Lambda^{(2)} \right] + 6(u^{(2)})^2 (\Lambda^{(0)})^4. \quad (22)$$

Порядковые составляющие o_z имеют вид

$$\left. \begin{aligned} o_z^{(0)} &= 1, \\ o_z^{(2)} &= -2u^{(2)} (\Lambda^{(0)})^2, \\ o_z^{(4)} &= -4u^{(2)} \Lambda^{(0)} \Lambda^{(2)} - 2u^{(4)} (\Lambda^{(0)})^2 + 6(u^{(2)})^2 (\Lambda^{(0)})^4. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Из выражений (4), (14) и (19) следует

$$\begin{aligned} o_x &= -2x\Lambda o_z = -2(x^{(1)} + x^{(3)} + x^{(5)}) (\Lambda^{(0)} + \Lambda^{(2)} + \Lambda^{(4)}) (1 + o_z^{(2)} + o_z^{(4)}) = \\ &= -2 \left[(x^{(1)} \Lambda^{(0)} + x^{(1)} \Lambda^{(2)} + x^{(1)} \Lambda^{(4)} + x^{(3)} \Lambda^{(0)} + x^{(3)} \Lambda^{(2)} + x^{(5)} \Lambda^{(0)}) \times \right. \\ &\quad \left. \times (1 + o_z^{(2)} + o_z^{(4)}) \right] + \dots \end{aligned} \quad (24)$$

В результате порядковые составляющие o_x имеют вид

$$\left. \begin{aligned} o_x^{(1)} &= -2x^{(1)} \Lambda^{(0)}, \\ o_x^{(3)} &= -2(x^{(1)} \Lambda^{(0)} o_z^{(2)} + x^{(1)} \Lambda^{(2)} + x^{(3)} \Lambda^{(0)}), \\ o_x^{(5)} &= -2(x^{(1)} \Lambda^{(0)} o_z^{(4)} + x^{(1)} \Lambda^{(2)} o_z^{(2)} + x^{(1)} \Lambda^{(4)} + x^{(3)} \Lambda^{(0)} o_z^{(2)} + \\ &\quad + x^{(3)} \Lambda^{(2)} + x^{(5)} \Lambda^{(0)}). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Аналогичную форму имеют и составляющие o_y .

В случае преломления псевдолуча асферической поверхностью, в соответствии с законом Снеллиуса имеем:

$$\mathbf{\alpha}' = v\mathbf{\alpha} + \chi\mathbf{o}. \quad (26)$$

Здесь $\mathbf{\alpha}$ и $\mathbf{\alpha}'$ - направляющие векторы падающего и преломленного лучей,

$$\left. \begin{aligned} v &= n/n', \\ \chi &= -v(\mathbf{o} \cdot \mathbf{\alpha}) + \sqrt{1 - v^2[1 - (\mathbf{o} \cdot \mathbf{\alpha})^2]}, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

n и n' - показатели преломления сред слева и справа от границы раздела в точке падения луча. В скалярном виде выражение (26) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_x &= v\alpha_x + \chi o_x, \\ \alpha'_y &= v\alpha_y + \chi o_y, \\ \alpha'_z &= v\alpha_z + \chi o_z. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Для перехода от направляющих косинусов к направляющим тангенсам используется уравнение связи между векторами $\mathbf{\alpha}$ и $\mathbf{\varepsilon}$:

$$\mathbf{\alpha} = \alpha_z(\mathbf{\varepsilon} + \mathbf{k}), \quad (29)$$

где \mathbf{k} - единичный вектор вдоль оси Oz , а

$$\alpha_z = (1 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2)^{-1/2}. \quad (30)$$

Для того, чтобы с помощью (29) и (30) определить составляющие различных порядков малости вектора $\mathbf{\alpha}'$, а затем и $\mathbf{\varepsilon}'$, в них необходимо представить в виде сумм слагаемых различных порядков величину χ и проекции векторов $\mathbf{\alpha}$, \mathbf{o} . Выполнив эти разложения и подставив результат в уравнение, связывающее проекции векторов $\mathbf{\varepsilon}$ и $\mathbf{\alpha}$, получим:

$$\varepsilon'_x = \varepsilon_x^{(1)} + \varepsilon_x^{(3)} + \varepsilon_x^{(5)} + \dots, \quad (31)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^{(1)} &= \alpha_x^{(1)}, \\ \varepsilon_x^{(3)} &= \alpha_x^{(1)}\gamma^{(2)} + \alpha_x^{(3)}, \\ \varepsilon_x^{(5)} &= \alpha_x^{(1)}\gamma^{(4)} + \alpha_x^{(3)}\gamma^{(2)} + \alpha_x^{(5)}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Аналогичную форму имеют и составляющие ε'_y .

Вышеприведенные соотношения являются основой и для расчета хода псевдолуча через структуру ДЛ, размещенную на асферической поверхности. В этом случае известные выражения, описывающие дифракцию на структуре, считают записанными в локальной \tilde{K} -системе координат, с направляющими векторами $\tilde{\mathbf{i}}$, $\tilde{\mathbf{j}}$, $\tilde{\mathbf{k}}$, началом координат в точке падения луча на асферическую поверхность и осью $O\tilde{Z}$, совпадающей с нормалью \mathbf{o} к поверхности в этой точке. Переход от этой системы координат к K -системе, имеющей направляющие векторы \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} и связанной с вершиной поверхности, а также разложение по вышеописанной схеме дает суммы составляющих различных порядков малости искомого вектора $\mathbf{\varepsilon}'$, определяющего наклон дифрагированного структурой ДЛ луча.

В главе обосновывается выбор функций оценки качества изображения для последующего их использования на различных этапах расчета оптических систем, рас-

смаатриваемых в данной диссертации: наименее ресурсоемких функций, оценивающих качество изображения точки по параметрам диаграммы рассеяния лучей - на этапе разработки исходной схемы и оптимизации; интенсивности Штреля и относительной энергии в пределах радиуса диска Эйри - при аттестации высокоразрешающих систем, а частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) – при аттестации изображающих систем с достаточно высоким уровнем остаточных аберраций.

Глава завершается изложением развиваемого автором метода компоновки оптических схем и определения конструктивных параметров гибридных центрированных систем, включающих элементы, позволяющие осуществлять селективную коррекцию аберраций различных порядков.

В соответствии с этим методом на первом этапе, исходя из требований, предъявляемых к оптической системе и учитывая коррекционные возможности элементов различных типов, выбирается ее конфигурация, т.е. общее число элементов, их тип и взаимное расположение. Затем составляется система параксиальных и компенсационных уравнений, решение которой призвано обеспечить заданные параксиальные характеристики и устранение выбранных монохроматических аберраций нескольких низших порядков малости. Общее количество конструктивных параметров при выбранной конфигурации может превышать число решаемых уравнений, и тогда значения свободных параметров будут определяться из условия достижения минимально возможного уровня остаточных аберраций высших порядков. Поиск набора этих значений включает определение границы начальной зоны поиска, исходя из известных ограничений на значения свободных параметров, выбор шага для каждого из свободных параметров и решение на каждом шаге системы параксиальных и компенсационных уравнений. Результатом этого этапа явится база начальных решений.

На втором этапе для каждого из решений набранной базы при значениях числовой апертуры и полевого угла, близких к требуемым, и оптимальном положении входного зрачка производится расчет хода реальных лучей и вычисляется лучевая функция оценки качества точечного изображения. Затем выделяются решения, для которых значения оценочной функции превышают пороговый уровень.

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 асферической деформации эйконалов записи ДЛ и асферических поверхностей. При этом оптимизация производится по коэффициентам, влияющим на аберрации, начиная с того порядка малости в абберационном разложении, который не учитывался при составлении компенсационных уравнений. Если же результаты оптимизации неудовлетворительны (не получено ожидаемое значение апертуры или полевого угла, какие-то конструктивные параметры системы не приемлемы, т.д.), проводится повторное исследование базы начальных решений с изменением условий отбора. В результате окажутся найденными конструктивные параметры, соответствующие предельным для выбранной конфигурации оптическим характеристикам. В случае если эти характеристики не удовлетворяют условиям решаемой задачи, то следует изменить конфигурацию оптической системы, число ее элементов и/или их взаимное расположение, а затем весь процесс поиска повторить.

Отмечается, что вышеописанный метод, базирующийся на знании коррекционных возможностей элементов различных типов и хорошо зарекомендовавший себя при проектировании градиентных и дифракционно-градиентных объективов-монохроматов, требует дальнейшего развития и распространения на оптические системы, работающие с некогерентным излучением.

Вторая глава посвящена исследованию возможностей и поиску путей коррекции дисторсии высокоразрешающих дифракционно-градиентных объективов-монохроматов (см. рис. 1).

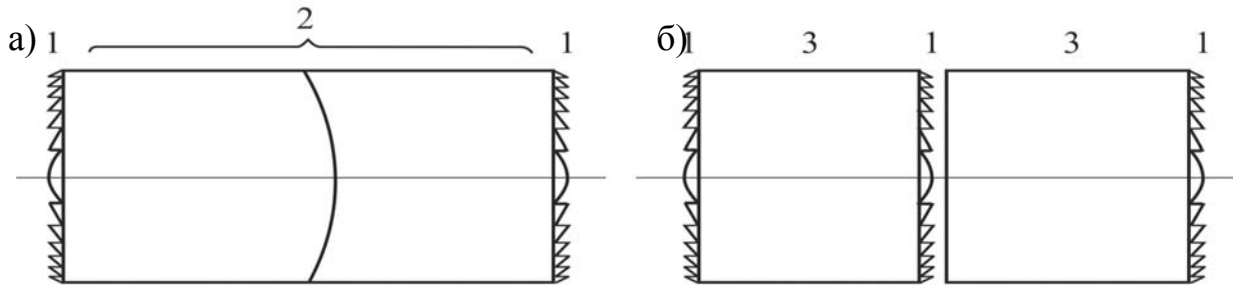


Рис. 1. а) - объектив, состоящий из двух плоских ДЛ (1) и склеенной линзы Вуда (2); б) - объектив, состоящий из трех плоских ДЛ (1), разделенных неоднородными средами (3).

Опираясь на метод компоновки оптических схем и определения конструктивных параметров, описанный в главе 1, были найдены и исследованы неизвестные ранее решения, обеспечивающие устранение у таких объективов всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков, включая дисторсию. При этом было показано, что только объектив, состоящий из трех ДЛ разделенных неоднородными средами, способен при рэлеевском разрешении $\delta_R = 1$ мкм обеспечить практически значимый размер углового поля высококачественного изображения ($2\omega = 12^\circ$). Остаточная относительная дисторсия в этом случае $\delta y'_{\max} \leq 0,005\%$.

Существенно увеличить поле зрения как вышеупомянутого объектива, включающего три ДЛ, так и состоящего из двух ДЛ и склеенной линзы Вуда, удалось, заменив строгое устранение составляющих дисторсии третьего и пятого порядков их взаимной компенсацией. Методика компенсации основана на установленных автором закономерностях, общих для объективов обоих типов. Дисторсия третьего порядка в таких системах легко может быть вызвана любого знака, и это не сопровождается отрицательными эффектами, которые могли бы повысить уровень остаточных aberrаций высших порядков. Более того, при противоположных знаках коэффициентов дисторсии третьего и пятого порядков рост модуля коэффициента дисторсии третьего порядка приводит к уменьшению модуля коэффициента пятого порядка. Взаимосвязь коэффициентов дисторсии описывается выражением

$$W_{0,2,0} = W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}, \quad (33)$$

где $W_{0,1,0}$ и $W_{0,2,0}$ - коэффициенты дисторсии третьего и пятого порядка, соответственно, $W_{0,2,0}^{(0)}$ - коэффициент дисторсии пятого порядка при $W_{0,1,0} = 0$, k - коэффициент пропорциональности.

Относительная дисторсия, включающая составляющие двух наименьших порядков, имеет вид

$$\delta y' = \Delta y' / \text{tg} \omega = W_{0,1,0} \text{tg}^2 \omega + W_{0,2,0} \text{tg}^4 \omega. \quad (34)$$

Здесь $\Delta y'$ - абсолютная дисторсия, а ω - полевой угол в пространстве предметов.

Значение коэффициента $W_{0,1,0}$, снижающего до минимума максимальную величину модуля относительной дисторсии в пределах заданного полевого угла, можно найти, например, следующим образом. Потребуем, чтобы относительная дисторсия на краю поля была равна модулю относительной дисторсии в точке экстремума, как это показано на рис. 2.

В предположении, что искомое значение по модулю много меньше единицы, получено приближенное выражение

$$W_{0,1,0}^{(\text{opt})} \approx (N - \sqrt{N^2 + 4PM}) / 2P, \quad (35)$$

дающее вполне приемлемое начальное значение для последующей взаимной компенсации с учетом уже влияния составляющих дисторсии высших порядков.

Величины, входящие в выражении (35), имеют вид

$$M = W_{0,2,0}^{(0)} \text{tg}^2 \omega_{\text{max}}, \quad (36)$$

$$N = 2k\sqrt{M} / W_{0,2,0}^{(0)} + M, \quad (37)$$

$$P = 0,25 - k \text{tg}^2 \omega_{\text{max}}, \quad (38)$$

где ω_{max} - максимальный полевой угол в пространстве предметов.

Полевой угол, при котором наблюдается экстремум, вычисляется по формуле

$$\text{tg} \omega_{\text{ext}} = \sqrt{-W_{0,1,0}^{(\text{opt})} / 2(W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}^{(\text{opt})})}, \quad (39)$$

а относительная дисторсия на краю поля, с точностью до знака равная дисторсии в экстремуме, определяется выражением

$$\delta y'_{\text{max}} = 0,25 W_{0,1,0}^{(\text{opt})2} / (W_{0,2,0}^{(0)} + kW_{0,1,0}^{(\text{opt})}). \quad (40)$$

Данная методика в совокупности с вышеописанной концепцией позволила получить схемные решения и конструктивные параметры ортоскопических объективов обоих типов, способных формировать изображение с дифракционным качеством по большому полю ($\delta_R = 1$ мкм., $2\omega = 42^\circ$, $\delta y'_{\text{max}} \leq 0,13\%$).

Третья глава посвящена разработке методик коррекции хроматических aberrаций изображающих и фокусирующих оптических систем. В ней проанализированы хроматические свойства однородных рефракционных линз (ОРЛ) с асферическими поверхностями и ДЛ.

На основе анализа первичного хроматизма разработаны методики использования корректоров, состоящих из ДЛ и одной или двух ОРЛ, для выполнения ахро- и апохроматической коррекций оптических систем. В предположении, что дифракционно-рефракционный корректор бесконечно тонкий, и его оптическая сила Φ на центральной длине волны $\bar{\lambda}$ спектрального диапазона от λ_{min} до λ_{max} имеет фикси-

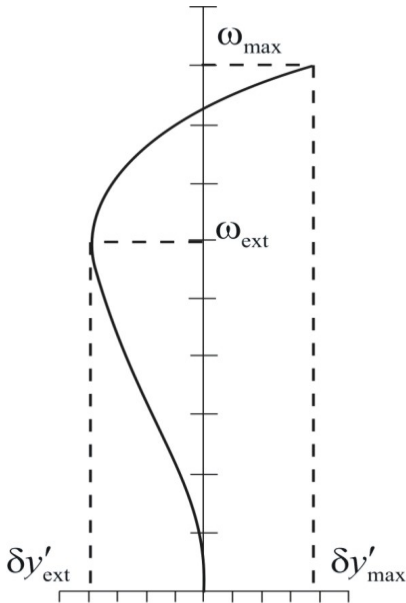


Рис. 2. Относительная дисторсия при оптимальном соотношении составляющих третьего и пятого порядков.

рованное значение, условие ахроматизации оптической системы, в которую вводится этот корректор, имеет вид

$$\left(\frac{\Phi_{DL}}{\nu_{DL}} + \sum_{i=1}^I \frac{\Phi_{Ri}}{\nu_{Ri}} \right) h_A^2 - S_{ch}^{(\lambda_{min}, \lambda_{max})} = 0, \quad (41)$$

$$\Phi_{DL} + \sum_{i=1}^I \Phi_{Ri} = \Phi. \quad (42)$$

Здесь Φ_{DL} и Φ_R – оптические силы ДЛ и ОРЛ корректора на длине волны $\bar{\lambda}$; $I=1$ или 2 в зависимости от количества ОРЛ в корректоре; h_A – высота апертурного нулевого луча в плоскости корректора, вычисленная на той же длине волны; $S_{ch}^{(\lambda_{min}, \lambda_{max})}$ – вклад в первую хроматическую сумму всех элементов оптической системы за исключением корректора, вычисленный для длин волн λ_{min} и λ_{max} ; ν_R и ν_{DL} – коэффициенты дисперсии материала ОРЛ и ДЛ.

В случае апохроматической коррекции система уравнений (41), (42) дополняется выражением

$$\left(\frac{\Phi_{DL}}{\nu_{DL}} \gamma_{DL} + \sum_{i=1}^I \gamma_{Ri} \frac{\Phi_{Ri}}{\nu_{Ri}} \right) h_A^2 - S_{ch}^{(\lambda_{min}, \bar{\lambda})} = 0, \quad (43)$$

где параметры

$$\gamma_{DL} = (\lambda_{min} - \bar{\lambda}) / (\lambda_{min} - \lambda_{max}), \quad (44)$$

$$\gamma_R = (n_{\lambda_{min}} - n_{\bar{\lambda}}) / (n_{\lambda_{min}} - n_{\lambda_{max}}) \quad (45)$$

– относительные частные дисперсии ДЛ и материала ОРЛ соответственно, а величина $S_{ch}^{(\lambda_{min}, \bar{\lambda})}$, как и в уравнении (41), характеризует вклад в первую хроматическую сумму всех элементов оптической системы за исключением корректора, но уже для длин волн λ_{min} и $\bar{\lambda}$.

Решение системы уравнений (41)-(43) предваряется выбором местоположения корректора в оптической системе и его оптической силы Φ . Если корректор вводится в предварительно рассчитанную систему как дополнительный компонент, то его целесообразно поместить вблизи апертурной диафрагмы, положив $\Phi = 0$. В случае же замены дифракционно-рефракционным корректором какого-то компонента системы, расположение корректора и его оптическую силу следует выбрать, исходя из того, что установка корректора не должна существенно изменить параксиальные характеристики системы. Это, в частности, достигается при условии сохранения угла и высоты падения апертурного нулевого луча на ту поверхность системы, которая расположена непосредственно за корректором.

Анализ системы уравнений (41)-(43) показал, что в простейшем случае, когда рефракционная часть корректора представляет собой одиночную линзу, афокальный корректор ($\Phi = 0$) позволяет произвести апохроматизацию лишь в не представляющем практический интерес случае, когда дисперсия оптической системы очень мала по модулю и аномальна по знаку. В противном случае возможна только ахроматизация, при этом оптические силы элементов корректора рассчитываются по формулам

$$\Phi_R = -\Phi_{DL} = \frac{\nu_{DL} \nu_R U}{\nu_{DL} - \nu_R}, \quad (46)$$

где

$$U = S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})} / h_A^2. \quad (47)$$

В видимом диапазоне, а конкретно в интервале, ограниченном синей F– и красной C–линиями водорода ($\lambda_{\min} = \lambda_F = 0,48613$ мкм и $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626$ мкм), когда в качестве центральной длины волны выбирается желтая d–линия гелия ($\bar{\lambda} = \lambda_d = 0,58756$ мкм) коэффициент дисперсии ДЛ $v_{\text{DL}} \approx -3,45$. Благодаря этому, как следует из формулы (46), афокальный дифракционно-рефракционный корректор позволяет скомпенсировать примерно на порядок больший хроматизм, чем это достижимо с помощью чисто рефракционного склеенного корректора, имеющего те же оптические силы элементов.

При постановке задачи апохроматической коррекции оптической системы путем замены одного из ее компонентов корректором, состоящим из ДЛ и одиночной ОРЛ, из системы уравнений (41)-(43) следует, что параметры корректора рассчитываются по формулам

$$v_R = v_{\text{DL}} \frac{1 - \gamma_R L}{1 - \gamma_{\text{DL}} L}, \quad (48)$$

$$\Phi_R = \frac{v_R (U v_{\text{DL}} - \Phi)}{v_{\text{DL}} - v_R}, \quad (49)$$

$$\Phi_{\text{DL}} = \Phi - \Phi_R, \quad (50)$$

где

$$L = \frac{U v_{\text{DL}} - \Phi}{W v_{\text{DL}} - \gamma_{\text{DL}} \Phi}, \quad (51)$$

$$W = \frac{S_{\text{ch}}^{(\lambda_{\min}, \bar{\lambda})}}{h_A^2}. \quad (52)$$

При апохроматической коррекции коэффициент дисперсии материала ОРЛ уже не является свободным параметром и его значение, полученное в ходе расчета, может оказаться физически нереализуемым. Это ограничение преодолевается, если рефракционную часть корректора, используемого для апохроматизации оптической системы, выполнить из двух линз. В этом случае система уравнений (41)-(43), являющаяся линейной по отношению к оптическим силам элементов, легко решается любым из стандартных методов. Анализ показал, что при выборе для рефракционной части корректора крона и флинта с максимально возможной разницей значений коэффициентов дисперсии оптические силы ОРЛ имеют противоположные знаки, модули их минимальны и незначительно превышают оптическую силу объектива в целом. При этом оптическая сила ДЛ существенно ниже оптической силы объектива в целом и ее изготовление, с этой точки зрения, не вызывает технологических трудностей.

Замена компонента предварительно рассчитанного объектива дифракционно-рефракционным корректором может привести к нарушению ранее достигнутой коррекции монохроматических аберраций. Восстановить или даже снизить уровень этих аберраций можно, одновременно используя соотношение кривизн преломляющих поверхностей ОРЛ, поправки в закон чередования кольцевых зон ДЛ, а также толщины элементов и воздушных промежутков.

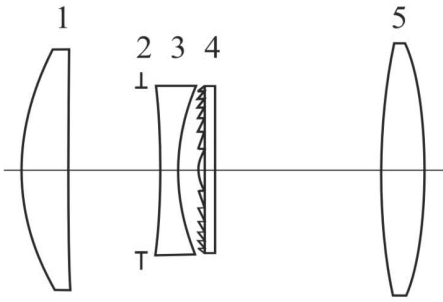


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема фотообъектива с дифракционно-рефракционным корректором: 1; 3; 5 – ОРЛ; 2 – апертурная диафрагма; 4 – ДЛ.

Эффективность разработанной методики продемонстрирована на примерах апохроматической коррекции фотообъектива типа «триплет Кука», ахроматической коррекции микрообъектива для видеокамер систем наблюдения (ССТV-систем) и апохроматической коррекции многолинзового объектива для «тонкого» проекционного телевизора или дисплея (RPTV). Коррекция хроматизма осуществлялась путем замены одного из компонентов объектива на двух- или трехлинзовый дифракционно-рефракционный корректор. В результате полихроматическое разрешение, например, фотообъектива (см. рис. 3), имеющего фокусное расстояние $f' = 240$ мм, при контрасте 0,2 на оси повысилось с 13 мм^{-1} до 72 мм^{-1} , а на краю поля - с 13 мм^{-1} до $16,5 \text{ мм}^{-1}$. Кривые лучевых aberrаций и волновой сферической aberrации исходного объектива и его модификации при относительном отверстии 1:6, представлены на рис. 4 – 6 (а) и (б), соответственно.

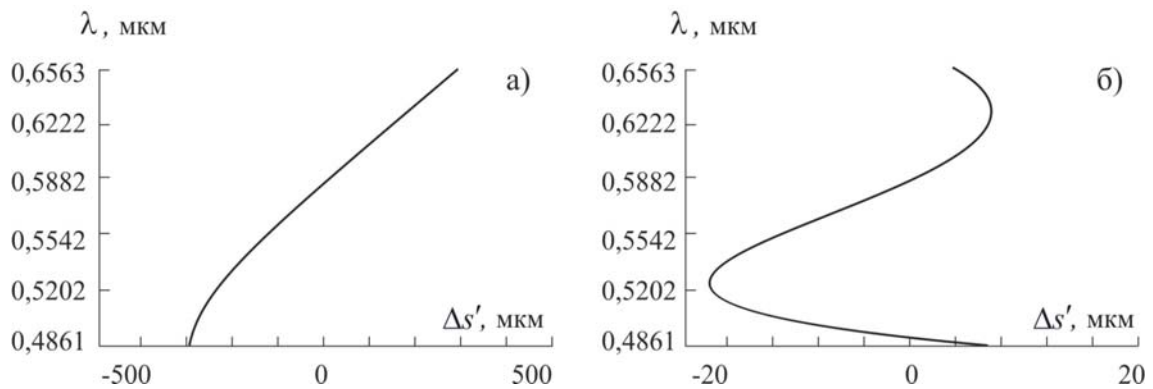


Рис. 4. Продольный хроматизм исходного (а) и модифицированного (б) объективов.

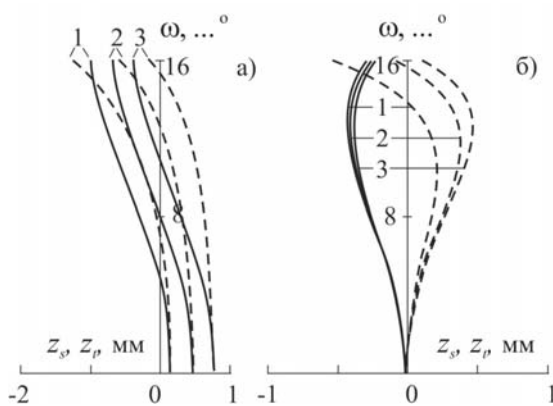


Рис. 5. Астигматизм и кривизна поля исходного (а) и модифицированного (б) объективов: 1 – при $\lambda = \lambda_F$; 2 – при $\lambda = \lambda_d$; 3 – при $\lambda = \lambda_C$; (— — — — сагиттальная и — — — — тангенциальная составляющие).

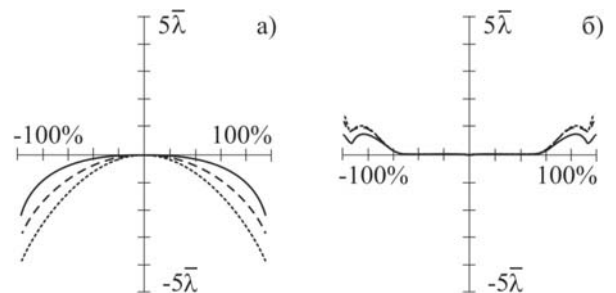


Рис. 6. Волновая сферическая aberrация исходного (а) и модифицированного (б) объективов: — — — — при $\lambda = \lambda_F$; — — — — при $\lambda = \lambda_d$; — при $\lambda = \lambda_C$.

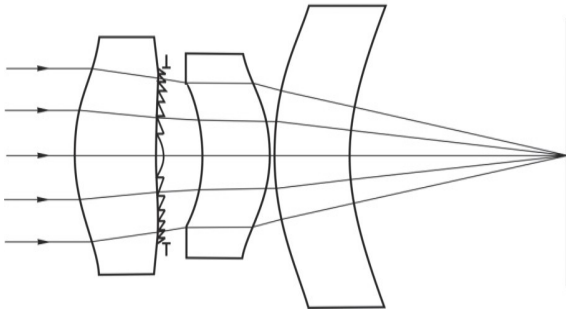


Рис. 7. Принципиальная оптическая схема микрообъектива.

контрасте 0,78 не опускается ниже 50 мм^{-1} . Фокусное расстояние этого объектива $f' = 3,71 \text{ мм}$, а относительное отверстие 1:2,4.

Замена склеенного дублета проекционного объектива оптического тракта RPTV на трехлинзовый дифракционно-рефракционный корректор (рис. 8) позволила не только апохроматизировать объектив, но и уменьшить поперечный хроматизм при одновременном снижении уровня остаточных монохроматических aberrаций, что, в конечном счете, привело к удвоению полихроматического разрешения (заявка на патент № 2006118187, Российская Федерация).

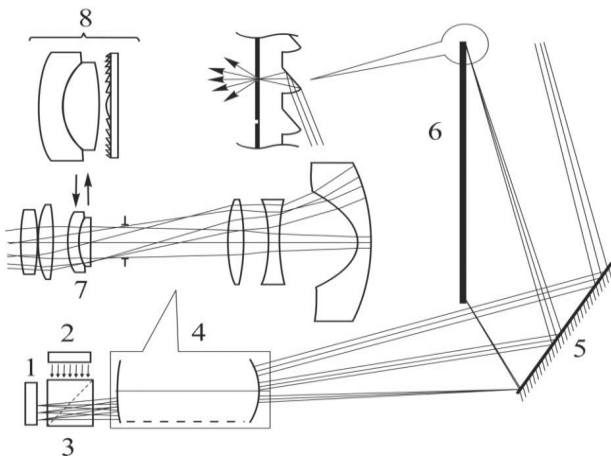


Рис. 8. Типичная схема оптического тракта RPTV и предложенный вариант модификации проекционного объектива: 1 - DMD-чип; 2 - осветитель; 3 - светоделитель; 4 - однолинзовая часть проекционного объектива; 5 - асферическое зеркало проекционного объектива; 6 - просветный экран; 7 - заменяемый компонент; 8 - дифракционно-рефракционный корректор.

Заключительная часть главы посвящена коррекции сферохроматизма оптической системы комбинированного устройства записи и чтения цифровых дисков двух форматов. Задача усложнена тем, что объектив устройства должен иметь значительную апертуру, а при переходе с формата на формат скачкообразно изменяется не только рабочая длина волны, но и толщина плоскопараллельного слоя над информационной поверхностью диска. Кроме того, необходимо, чтобы система объектив-диск была свободна от всех aberrаций, ограничивающих качество фокусировки не только на оси, но и вблизи нее. И, наконец, желательно, чтобы на обеих длинах волн объектив работал с бесконечно удаленной предметной точкой.

Поиск минимальной конфигурации, позволяющей удовлетворить все вышеперечисленные требования, выполненный в соответствии с концепцией компоновки исходных схем и определения конструктивных параметров оптических систем, изложенной в главе 1 и развитой в данной главе, привел к дублету, в котором ОРЛ с двумя асферическими поверхностями размещена между ДЛ и диском (см. рис. 9). В процессе поиска, ориентированного на CD и DVD форматы, шесть коэффициентов

асферических добавок кольцевой микроструктуры ДЛ и поверхностей ОРЛ использовались для устранения, путем решения соответствующих компенсационных уравнений, aberrаций широких пучков.

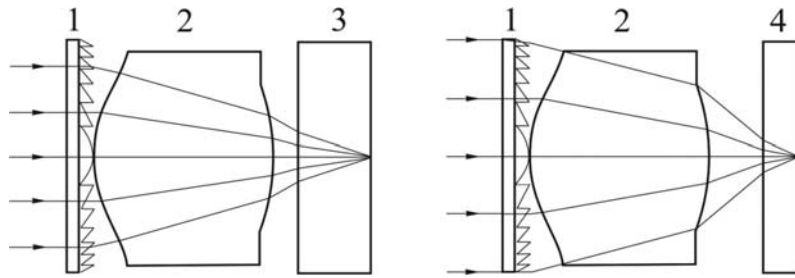


Рис. 9. CD/DVD система объектив – цифровой диск: 1 – ДЛ; 2 – однородная ОРЛ с двумя асферическими поверхностями; 3 – CD диск; 4 – DVD диск.

При этом сферическая aberrация третьего и пятого порядков устранялась на обеих длинах волн ($\lambda_1 = 0,78$ мкм для CD формата и $\lambda_2 = 0,65$ мкм для DVD формата), а кома третьего и круговая кома пятого порядков для длины волны DVD формата, требующего наибольшую числовую апертуру системы. В результате, одна из полученных схем, при фокусных расстояниях $f'_{\lambda_1} = 2,33$ мм, $f'_{\lambda_2} = 2,3356$ мм и минимальном воздушном промежутке между ОРЛ и подложкой диска 0,5 мм, обеспечивает на длине волны λ_1 при числовой апертуре $A' = 0,51$, а также на длине волны λ_2 при апертуре $A' = 0,65$ дифракционно-ограниченную фокусировку в пределах углового поля $2\omega = 1,4^\circ$. Максимальный световой диаметр линз объектива $D_{\text{св}} = 3,03$ мм. Волновая aberrация в пределах выходного зрачка на краю поля и распределение интенсивности в сфокусированном пятне в режиме DVD приведены на рис. 10. Максимальное значение волновой aberrации на краю зрачка составляет $0,07\lambda$. Интенсивность Штреля в изображении $I_s = 0,98$, а относительная энергия в пределах радиуса диска Эйри $E(\delta_R) = 0,833$. Перенос в представленном выше объективе дифракционной структуры с плоскопараллельной подложки на переднюю асферическую поверхность ОРЛ, позволили упростить конструкцию и снизить массу объектива, не ухудшая качество фокусировки.

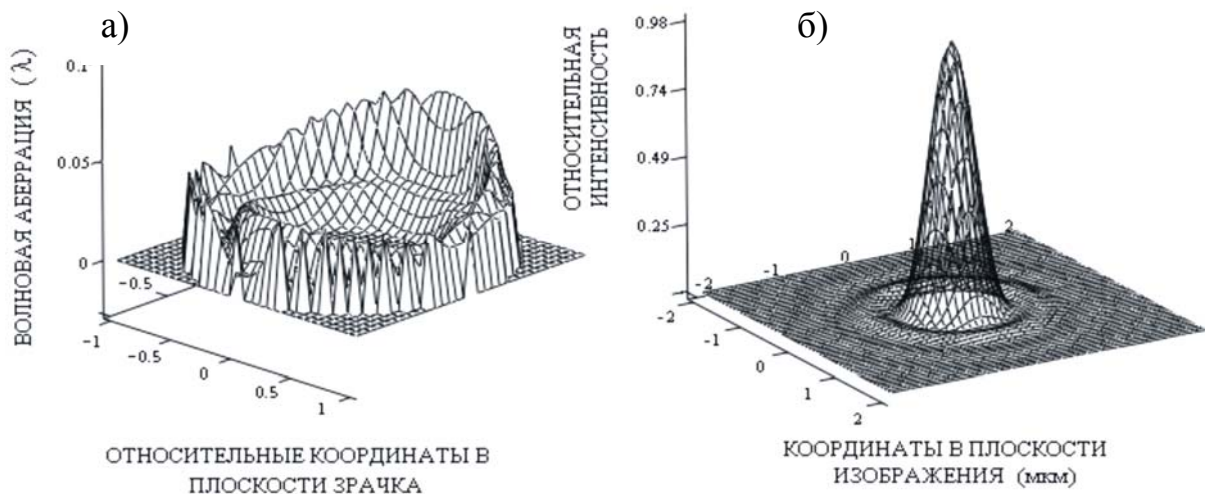


Рис. 10. Распределение волновой aberrации в плоскости выходного зрачка (а) и распределение интенсивности в дифракционном изображении точки (б).

В связи с тем, что ДЛ объектива системы чтения/записи работает на двух, существенно отличающихся длинах волн, глава завершается анализом зависимости дифракционной эффективности рельефно-фазовой микроструктуры, имеющей ступенчатый профиль штриха, от длины волны. Показано, что в пределах спектрального диапазона, ограниченного рабочими длинами волн CD и DVD форматов, снижение дифракционной эффективности, обусловленное переходом с расчетной длины волны на рабочие, практически не зависит от числа ступеней, если их больше пяти и в любом случае не превышает 3%.

Четвертая и пятая главы посвящены поиску путей и разработке методов совершенствования уже достаточно широко используемых оптических систем, включающих стержневые градиентные элементы: сверхтонких жестких эндоскопов с визуальным трактом, состоящим из объектива и градиентного транслятора.

В четвертой главе анализируются базовые схемы визуального тракта, состоящего из градиентного или однородно-линзового объектива и градиентного транслятора, формирующего действительное изображение вблизи своего заднего торца. Это изображение является предметом для окуляра.

Исходя из того, что эндоскоп предназначен для работы с полихроматическим излучением, даны рекомендации по подбору материалов градан-объектива и градан-транслятора. Для характеристики дисперсионных свойств радиально-градиентных материалов вводится эффективный коэффициент дисперсии

$$v = \frac{v_0 v_1}{v_1 - (1 - 1/n_0)v_0}. \quad (53)$$

Здесь $v_0 = (n_0 - 1)/\Delta n_0$ и $v_1 = n_1/\Delta n_1$ – коэффициенты дисперсии для базового показателя преломления n_0 и первого коэффициента радиального градиента n_1 , соответственно; $n_i = n_i(\bar{\lambda})$ и $\Delta n_i = n_i(\lambda_{\min}) - n_i(\lambda_{\max})$; $\bar{\lambda}$, λ_{\min} и λ_{\max} – как и ранее центральная, минимальная и максимальная длины волн заданного спектрального диапазона.

Хроматизм положения визуального тракта удастся снизить, выбрав материал транслятора с максимально возможным по модулю эффективным коэффициентом дисперсии, а материал градан-объектива, длина которого существенно меньше длины транслятора, – со значением v противоположным по знаку и минимально возможным по модулю. Значения эффективного коэффициента дисперсии, серийно выпускаемых неоднородных материалов, подходящих по апертуре для изготовления трансляторов, лежат в диапазоне $-190 < v < -180$, а соответствующие значения v материалов объективов – в диапазоне $18 < v < 22$. Учитывая, что длины градиентных объектива и транслятора отличаются почти на два порядка, даже рациональный подбор градиентных материалов не позволяет снизить хроматизм, ограничивающий разрешение системы, до приемлемого уровня. Например, базовая система с фокусным расстоянием $f' = -1,017$ мм, состоящая из градан-объектива (стекло SLW-1.0) и градан-транслятора (стекло ARS20) с диаметром $D_T = 1,5$ мм, обеспечивающим числовую апертуру в пространстве изображений $A' = 0,073$, имеет разрешение на краю поля (угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 60^\circ$, линейное поле в пространстве изображений $2y' \approx 1,1$ мм), не превышающее 64 мм^{-1} , при контрасте $T = 0,2$. Ахроматизацию вышерассмотренной базовой оптической системы можно выполнить путем введения в нее дополнительного корректора, устанавливаемого

вблизи заднего торца градан-транслятора. Эффективность корректора будет максимальной при работе в параллельном ходе лучей, для чего длина транслятора должна быть изменена на величину, равную четверти периода параксиальной траектории луча. В рассматриваемом случае, когда изображение формируется вблизи заднего торца транслятора, в качестве корректора достаточно использовать одну плосковыпуклую ОРЛ, приклеенную к заднему торцу транслятора. Конструктивные параметры плосковыпуклой ОРЛ, 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 визуального тракта эндоскопа, устранение хроматизма положения и увеличения. Поясним, что незначительное в процентном отношении изменение длины транслятора существенно влияет на хроматизм увеличения благодаря изменению положений плоскости изображения и выходного зрачка. Недостатком плосковыпуклого корректора, является то, что при малом радиусе его преломляющей поверхности, существенно возрастают остаточные монохроматические aberrации, и, прежде всего, aberrации тонких пучков, значительно снижающие разрешение системы. Уменьшить эти aberrации при устраненном продольном и поперечном хроматизме для двух крайних длин волн выбранного спектрального диапазона удастся, как показано в данной главе, заменой ОРЛ на радиально-градиентную линзу Вуда.

Дальнейшая минимизация aberrаций тонких пучков без нарушения коррекции хроматизма возможна путем введения в систему дополнительной ОРЛ. В главе изложена методика получения исходных схем и конструктивных параметров двухлинзовых (однородного и однородно-градиентного) корректоров хроматизма и превалярующих монохроматических aberrаций (см. рис. 11).

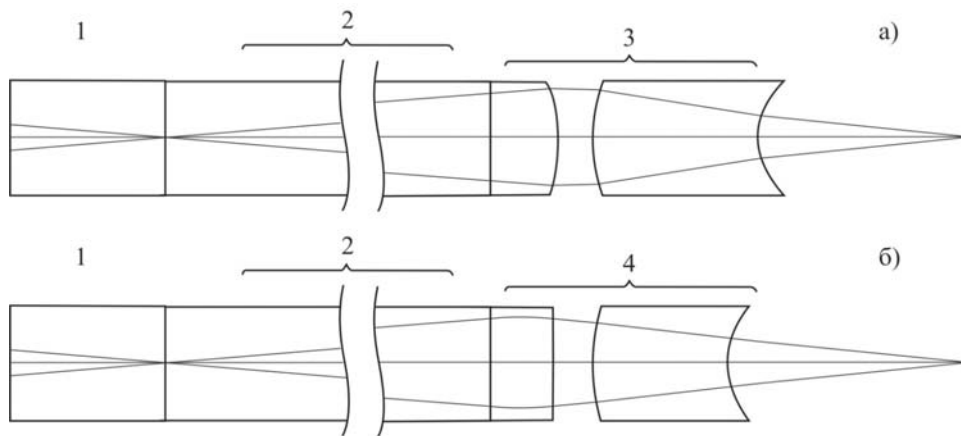


Рис. 11. Оптические схемы иглообразной части визуального тракта жесткого эндоскопа, включающие однородно-линзовый (а) или гибридный (б) корректор aberrаций. 1 – градан-объектив, 2 – градан-транслятор, 3 – однородно-линзовый корректор, 4 – гибридный корректор.

В соответствии с ней конструктивные параметры дополнительной ОРЛ и толщину воздушного промежутка между ней и элементом, приклеенным к торцу транслятора, в первом приближении, можно получить, потребовав, чтобы ее поверхности вносили небольшой астигматизм нужного знака, а их вклад в сумму Петцваля соответствовал вкладу отрицательной ОРЛ. В этом случае дополнительная ОРЛ приобретает форму мениска, небольшая положительная оптическая сила которого обеспе-

чивается за счет его толщины. Доводка системы в целом осуществляется оптимизацией. Показано, что корректоры, рассчитанные по этой методике, действительно позволяют полностью устранить для двух длин волн продольный и поперечный хроматизм при существенном снижении уровня остаточных монохроматических aberrаций визуального тракта эндоскопа и обеспечить ощутимый рост его полихроматического разрешения.

В качестве примера ниже приведены характеристики визуального тракта эндоскопа с гибридным двухлинзовым корректором, градиентная часть которого выполнена из стекла SLS-2.0 (см. рис. 11б). По модулю все коэффициенты aberrаций тонких пучков третьего и пятого порядков, а также сумма Петцваля этой системы меньше соответствующих коэффициентов базовой системы, а разрешение превышает базовое, более чем в 1,6 раза, достигая на краю поля 106 мм^{-1} . На рис. 12 и 13 приведены кривые остаточных монохроматических и хроматических aberrаций оптической системы с гибридным корректором. Ее монохроматические aberrации вычислялись на центральной длине волны λ_d , а хроматические – в спектральном диапазоне, ограниченном F- и C-линиями. На рис. 14 представлена полихроматическая ЧКХ этой системы.

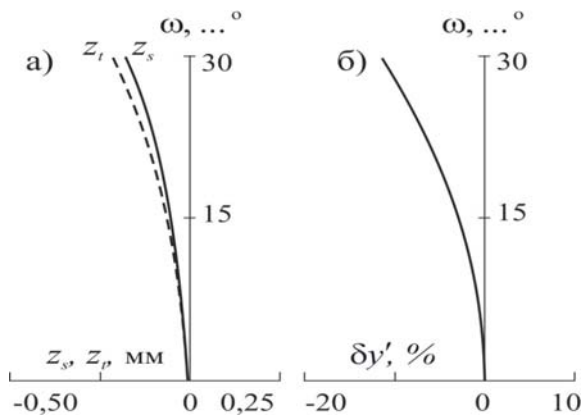


Рис. 12. Кривые монохроматических aberrаций визуального тракта с гибридным корректором: а) – астигматизм и кривизна поля, б) – дисторсия.

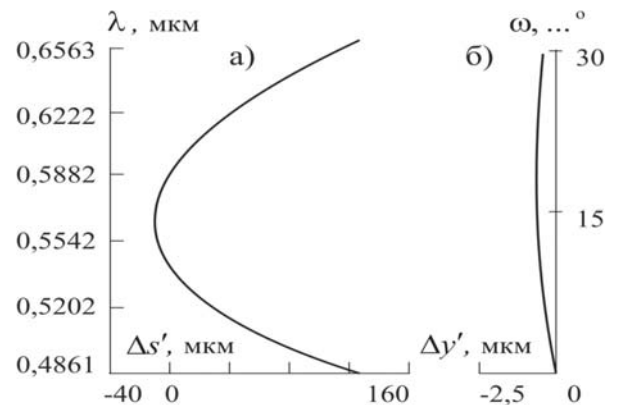


Рис. 13. Кривые хроматических aberrаций визуального тракта с гибридным корректором: а) – хроматизм положения, б) – хроматизм увеличения.

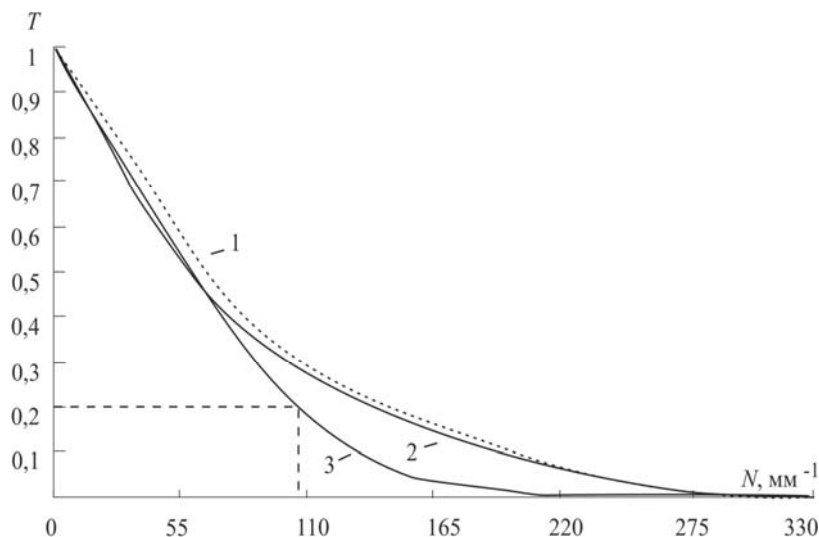


Рис. 14. ЧКХ визуального тракта с гибридным корректором: 1 – при $\omega = 0$; 2 и 3 – при $\omega = 30^\circ$ для меридиональной и сагиттальной плоскостей, соответственно.

Наряду с зарубежными градиентными материалами, для изготовления трансляторов визуальных трактов жестких эндоскопов в нашей стране используются отечественные градиентные стержни, производимые на протяжении ряда лет компанией ЗАО «ГРИНЕКСТ» (г. Санкт-Петербург). В частности ООО "НТЦ "ВНИИМП-ОПТИМЕД-1". (Москва) серийно выпускает сверхтонкие жесткие эндоскопы, комплектуемые объективами, выполненными из однородных микролинз и градиан-трансляторами ЗАО «ГРИНЕКСТ».

В силу несоизмеримости хроматизма объектива и транслятора суммарный продольный хроматизм такой гибридной системы значительно превышает хроматизм рассмотренной выше базовой схемы с градиентным объективом. Исследования показали, что и в этом случае использование корректора аберраций, включающего плосковыпуклую ОРЛ и мениск и рассчитанного по вышеописанной методике, позволяет полностью устранить хроматизм положения и увеличения и снизить уровень превалирующих аберраций тонких пучков. В частности, разрешение визуального тракта со световым диаметром $D_T = 1,5$ мм и углом поля зрения в пространстве предметов $2\omega = 70^\circ$ увеличилось с 47 мм^{-1} (как на оси, так и на краю поля зрения) у базовой схемы до 170 мм^{-1} на оси и 90 мм^{-1} на краю поля у схемы с двухлинзовым корректором.

В пятой главе рассмотрены вопросы сопряжения визуального тракта эндоскопа, состоящего из объектива и градиентного транслятора с цветной видеокамерой. Установлено, что при масштабе изображения, формируемого таким визуальным трактом, соответствующем размеру ПЗС-матрицы, остаточные хроматические и монохроматические аберрации не позволяют использовать разрешение современных матриц в полном объеме. С помощью же корректирующей одиночной плосковыпуклой ОРЛ, приклеиваемую к заднему торцу транслятора, в зависимости от марки его градиентного стекла можно выполнить полную или частичную ахроматическую коррекцию, однако в любом случае она приводит лишь к незначительному увеличению разрешения. В то же время корректоры, состоящие из двух ОРЛ и рассчитываемые по методике, изложенной в 4 главе, позволяют параллельно с ахроматизацией снизить уровень аберраций тонких пучков, подняв разрешение до значений, ограниченных вторичным спектром.

Преодолеть этот барьер удастся благодаря апохроматической коррекции, достигаемой с помощью гибридного корректора, состоящего из ДЛ и плосковыпуклой ОРЛ. Схему и конструктивные параметры такого корректора позволяет получить адаптированная к условиям данной задачи методика, приведенная в 3 главе.

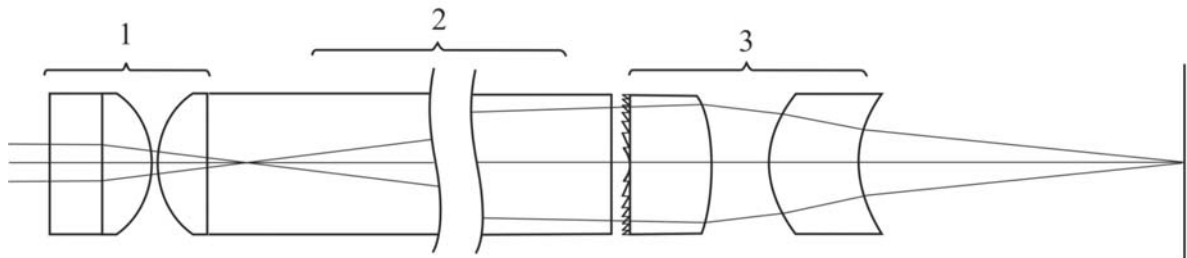


Рис. 15. Оптическая схема апохроматизированной иглообразной части визуального тракта жесткого эндоскопа, включающей двухлинзовый объектив (1), градиан-транслятор (2) и гибридный трехлинзовый корректор (3).

Включение в двухлинзовый гибридный корректор третьей линзы (см. рис. 15), выполненной в виде однородного мениска, открывает возможность, не нарушая апохроматизации, дополнительно снизить отрицательное влияние на разрешение системы монохроматических aberrаций.

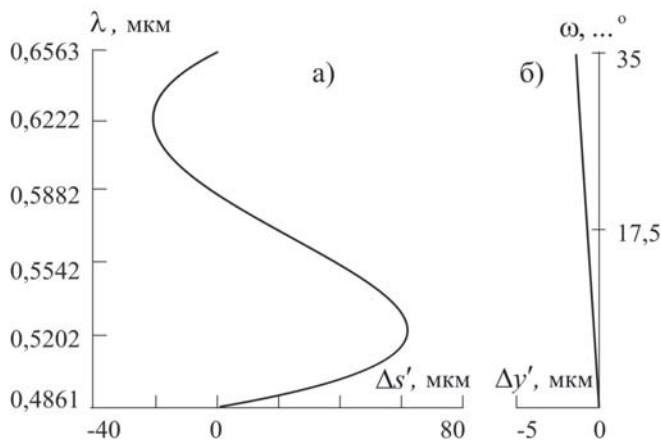


Рис. 16. Кривые хроматических aberrаций визуального тракта, включающего трехлинзовый корректор: а) – хроматизм положения, б) – хроматизм увеличения.

На рис. 16 приведены кривые хроматических aberrаций данной оптической системы, а на рис. 17 – ее ЧКХ. Фокусное расстояние системы $f' = 3,8$ мм обеспечивает ее сопряжение при $2\omega = 70^\circ$ с ПЗС-матрицей формата $1/3''$ ($2y' \approx 4,5$ мм). В результате включения третьей линзы разрешение системы в центре поля увеличилось по отношению к разрешению некорректированной системы 3,5 раза, а на краю – в 1,4 раза, достигнув дифракционного предела.

Анализ эффективности коррекции aberrаций каждой из рассмотренных систем завершается рекомендациями по выбору разрешающей способности ПЗС-

матрицы, соответствующей разрешению скорректированной системы.

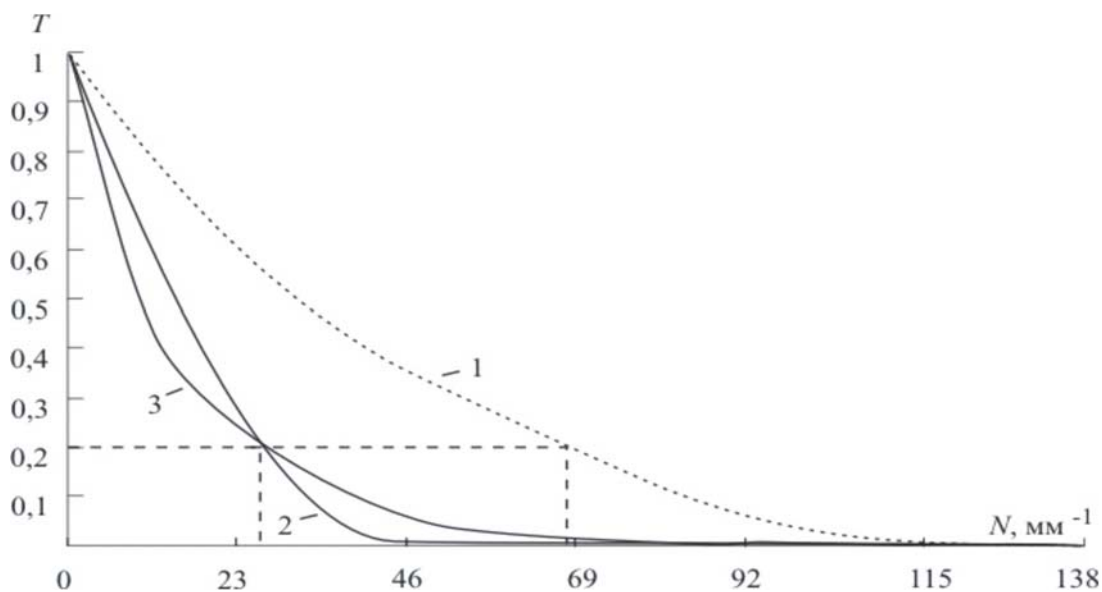


Рис. 17. Полихроматическая ЧКХ визуального тракта эндоскопа, включающего трехлинзовый корректор: 1 – при $\omega = 0$; 2 и 3 – при $\omega = 35^\circ$ для меридиональной и сагиттальной плоскостей, соответственно.

Заключение.

В диссертации разработан метод компоновки оптических схем гибридных систем различного функционального назначения, предполагающий использование элементов, обладающих различными дисперсионными свойствами и допускающих раздельное управление aberrациями различных порядков, отличающийся тем, что позволяет получать схемы центрированных оптических систем, предназначенных

для работы, как с монохроматическим, так и с немонахроматическим излучением и включающих, наряду с другими элементами, однородные линзы с асферическими поверхностями и дифракционные линзы, структура которых размещена на таких поверхностях. На этой основе разработаны схемы и методики расчета ряда оптических систем с однородными, дифракционными и радиально-градиентными элементами; проведен анализ потенциальных возможностей таких систем.

Получены следующие основные результаты:

1. Методика расчета хода псевдолучей развита и распространена на четные преломляющие асферические поверхности и дифракционные линзы, размещенные на таких поверхностях.

2. Показана возможность одновременного устранения всех монохроматических aberrаций третьего и пятого порядков у объективов, состоящих из трех дифракционных линз, разделенных неоднородными средами, а также двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда.

3. Показана возможность многократного снижения уровня дисторсии дифракционно-градиентных объективов за счет взаимной компенсации ее составляющих различных порядков без уменьшения поля высококачественного изображения и разработана методика расчета высокоразрешающих ортоскопических объективов-монохроматов.

4. Разработана методика ахро- и апохроматической коррекции оптических систем с помощью двух- и трехлинзовых рефракционно-дифракционных корректоров. Ее эффективность продемонстрирована на примере ахроматической коррекции микрообъектива ССТV-видеокамеры и апохроматической коррекции фотообъектива и объектива для «тонкого» проекционного телевизора или дисплея (RPTV).

5. Показана возможность коррекции aberrаций широких пучков на двух длинах волн у оптической системы, состоящей из дифракционной линзы и однородной рефракционной линзы с асферическими поверхностями.

6. Разработаны схемы и методика расчета высокоразрешающих дифракционно-рефракционных оптических систем комбинированных устройств записи и чтения цифровых дисков двух форматов. Эффективность методики продемонстрирована на примере расчета системы комбинированного устройства записи и чтения цифровых дисков CD/DVD форматов.

7. Разработаны методики получения конструктивных параметров корректоров aberrаций сверхтонких жестких эндоскопов, визуальный тракт которых состоит из объектива и транслятора, выполненного из градиентного стекла зарубежного или отечественного производства, и предназначенных для работы с окуляром или цветной видеокамерой.

8. Предложены и исследованы схемы корректоров aberrаций сверхтонких жестких эндоскопов:

- корректора в виде линзы Вуда, приклеенной к заднему торцу транслятора, позволяющего устранить продольный и поперечный хроматизм для двух крайних длин волн выбранного спектрального диапазона при относительно невысоком уровне монохроматических aberrаций;

- двухлинзовых (однородного и однородно-градиентного) корректоров хроматизма и превалирующих монохроматических aberrаций тонких пучков,

позволяющих выполнить ахроматическую коррекцию визуального тракта эндоскопа и поднять его разрешение до значений, ограниченных вторичным спектром;

- гибридного корректора, состоящего из ДЛ и плосковыпуклой ОРЛ, обеспечивающего апохроматическую коррекцию визуального тракта эндоскопа;
- трехлинзового гибридного корректора, способного, не нарушая апохроматизацию, дополнительно снизить отрицательное влияние на разрешение системы монохроматических аберраций.

9. Показано, что введение в визуальный тракт эндоскопа корректоров аберраций, komponуемых и рассчитываемых по разработанной в диссертации методике, позволяет значительно повысить полихроматическое разрешение в наблюдаемом изображении, приблизив его к дифракционному пределу.

Содержание диссертации отражено в следующих основных публикациях:

Монография:

1. **Грейсух, Г. И.** Дифракционные оптические элементы в современном оптическом приборостроении [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г. // Техническая оптика: базовое руководство / Шредер Г., Трайберг Х.; дополненный пер. с нем. Р. Ильинского – М.: Техносфера, 2006. - Дополнение 3. - С. 387-406.

Статьи и материалы конференций:

2. **Грейсух, Г. И.** Вычислительные аспекты проектирования изображающих оптических систем, включающих градиентные и дифракционные линзы [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1997. – Вып. 17. - С. 53-56.
3. **Грейсух, Г. И.** Коррекционные возможности компонента, состоящего из трех склеенных плоскопараллельных пластин [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Оптический Журнал. - 1999. – Т. 66, № 2. - С. 80-83.
4. **Грейсух, Г. И.** Тройные склеенные радиально-градиентные объективы [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Оптический Журнал. - 1999. – Т.66, № 10. - С.92-96.
5. **Greisukh, G. I.** Design of objectives consisting of cemented radial gradient-index lenses [Текст] / Greisukh G. I., Ezhov E. G. Stepanov S. A. // Proc. SPIE. - 1999. – Vol. 3737, P. 369-375.
6. **Грейсух, Г. И.** Коррекционные возможности склеенных радиально-градиентных объективов [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Тез. докл. международной конф. молодых ученых и специалистов “Оптика-99”. - СПб.: ВНЦ ГОИ, 1999. – С. 142.
7. **Грейсух, Г. И.** Композиция и расчет высокоразрешающих оптических систем с градиентными и дифракционными элементами [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 2000. – Вып. 20. - С. 20-24.
8. **Ежов, Е. Г.** Расчет хода псевдолучей через дифракционные структуры, выполненные на сферической поверхности [Текст]/ Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 2000. – Вып. 20. - С. 25-28.
9. **Грейсух, Г. И.** Композиция и расчет объективов-монохроматов на основе градиентных и дифракционных элементов [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов

- С. А. // Сб. трудов международной конф. «Прикладная оптика 2000». - СПб.: ВНЦ ГОИ, 2000. – Т. 2. – С. 24-27.
10. **Грейсух, Г. И.** Коррекционные возможности объектива, склеенного из четырех градиентных плоскопараллельных пластин [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Оптический Журнал. – 2000. – Т. 67, № 8. - С. 65-68.
11. **Грейсух, Г. И.** Коррекционные возможности гибридного объектива, состоящего из двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Оптический Журнал. – 2000. – Т. 67, № 10. - С. 48-52.
12. **Грейсух, Г. И.** Высокоразрешающий дифракционно-градиентный объектив [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Оптический Журнал. – 2001. – Т. 68, № 3. - С. 59-62.
13. **Greisukh, G. I.** Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective [Текст] / Greisukh G. I., Ezhov E. G., Stepanov S. A. // Applied Optics. – 2001. - Vol.40, № 16. – P. 2730-2735.
14. **Грейсух, Г. И.** Расчет хода псевдолучей через оптические системы, включающие дифракционные линзы, структура которых выполнена на асферической поверхности [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 2001. – Вып. 21. - С. 70-72.
15. **Грейсух, Г. И.** Расчет дифракционного фокусирующего элемента антенны автомобильного локатора [Текст] / Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Минин И.В., Минин О.В., Степанов С.А.// Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 2001. – Вып. 21. - С. 73-76.
16. **Грейсух, Г. И.** Схемы и расчет дифракционно-линзовых микроволновых антенн [Текст] / Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Минин И.В., Минин О.В., Степанов С.А. // Сб. трудов 1-ой международной научно-технической конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». - Самара: СамГУ, 2001. – Т. 2. – С. 61.
17. **Greisukh, G. I.** The schemes and design of automotive radar antenna concluding the diffractive lens [Текст] / Greisukh G. I., Ezhov E. G., Minin I. V., Minin O. V., Stepanov S. A. // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Commercial Radio Sensors and Communication Techniques, August 23, 2001, Johannes Kepler University Linz , Austria, P.128-131.
18. **Грейсух, Г. И.** Вычисление интегральных характеристик точечного изображения, формируемого высокоразрешающим объективом с дифракционными и градиентными элементами [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 3. - С. 45-52.
19. **Greisukh, G. I.** Computer-aided design for gradient-index and diffractive-gradient-index high-resolution objectives [Текст] / Greisukh G. I., Ezhov E. G., Stepanov S. A. // Proceedings of the IASTED International Conference, ISBN: 0-88986-342-3. – Anaheim, Calgary, Zurich: ACTA Press, 2002. – P. 1-4.
20. **Грейсух, Г. И.** Расчет распределения интенсивности и концентрации энергии в дифракционном изображении точечного источника [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. - М.: ИСОИ РАН, МЦНТИ, 2002. – Вып. 24. - С. 43-47.
21. **Грейсух, Г. И.** Коррекционные возможности градиентно-однородных оптических систем дистальной части жесткого эндоскопа [Текст] / Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Труды третьей международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003». Санкт-Петербург, 20-23 октября 2003. / Под ред. проф. Козлова С. А. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. с. 173.

22. **Грейсук, Г. И.** Дифракционные и однородно-линзовые корректоры для коррекции аберраций градиентного эндоскопа [Текст] / Грейсук Г. И., Степанов С.А., Ежов Е. Г. // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2003. Вып. 25. С. 54-58.
23. **Ежов, Е. Г.** Коррекция аберраций жесткого градиентного эндоскопа [Текст]/ Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Г.И. Грейсук // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 3. - С. 100-105.
24. **Ежов, Е. Г.** Сопряжение дистальной части сверхтонкого жесткого градиентного эндоскопа с цветной ПЗС-камерой [Текст]/ Ежов Е.Г., Грейсук Г.И., Степанов С.А. // Сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов» - Пенза: Приволжский дом знаний, 2004. – С. 91-95.
25. **Ежов, Е. Г.** Оценка качества тракта, состоящего из оптической системы и ПЗС-камеры [Текст]/ Ежов Е.Г. // Сб. статей II-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов». Пенза: 2004. – С. 94-97.
26. **Ежов, Е. Г.** Сверхтонкие досмотровые эндоскопы на основе градиентных оптических элементов [Текст]/ Е.Г. Ежов, Г.И. Грейсук, С.А. Степанов // Материалы V-й Всероссийской научно-практической конф. «Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2004. – С. 203-205.
27. **Ежов, Е. Г.** Коррекция дисторсии гибридного объектива, состоящего из двух дифракционных линз и склеенной линзы Вуда [Текст]/ Е.Г. Ежов // Оптический Журнал. – 2004. – Т. 71, № 10. –С. 92–96.
28. **Грейсук, Г. И.** Коррекция аберраций градиентной иглообразной части жесткого эндоскопа, сопрягаемой с ПЗС-камерой [Текст] / Грейсук Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А.// Сб. трудов VI международной конференции "Прикладная оптика -2004". СПб.: 2004. - Т. 3. С. 88-91.
29. **Ежов, Е. Г.** Компенсация дисторсии дифракционно-градиентных объективов высокого разрешения [Текст]/ Е.Г. Ежов // Труды Оптического общества имени Д. С. Рождественского. VI Междунар. Конф. «Прикладная оптика 2004», – С-Петербург: 2004. – Т. 3, С. 220–224.
30. **Greisukh, G. I.** Reduction of the distortion of the diffractive-gradient-index high-resolution objectives [Текст] / Greisukh G. I., Ezhov E. G., Stepanov S. A. // Applied Optics. – 2005. - Vol. 44, Issue 4. – P. 512-518.
31. **Грейсук, Г. И.** Коррекция аберраций оптической системы иглообразного жесткого градиентного эндоскопа [Текст] / Грейсук Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. // Автометрия. - 2005. - Т. 41, № 2. - С. 115-123.
32. **Ежов, Е. Г.** Расчет комбинированных оптических головок для чтения и записи цифровых дисков нескольких форматов [Текст]/ Е.Г. Ежов, Г.И. Грейсук, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. - М.: ИСОИ РАН, МЦНТИ, 2005. – Вып. 27. - С. 29-31.
33. **Грейсук, Г. И.** Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз [Текст] / Грейсук Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С.А., // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2005. Вып. 28. С. 60-65.
34. **Грейсук, Г. И.** Оптика на рубеже веков [Текст] / Грейсук Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А. // Региональное строительство и архитектура. – 2006. – № 1. - С. 120-127.

35. **Greisukh, G. I.** Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems [Текст] / Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 24. – P. 6137–6141.
36. **Ежов, Е. Г.** Согласование разрешающей способности оптической системы и ПЗС-матрицы [Текст] / Ежов Е.Г. // Сб. статей IV-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов». Пенза: 2006. – С. 64-67.
37. **Ежов, Е. Г.** Коррекция хроматизма объективов видеокамер систем наблюдения [Текст] / Ежов Е.Г., Степанов С.А., Грейсух Г.И. // Материалы VI-й Всероссийской научно-практической конф. «Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2006. – С. 168-172.
38. **Ezhov, E. G.** Design of combined pick-up optical heads [Текст]/ Ezhov E.G. // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, № 31. – P. 8040-8043.
39. **Ежов, Е. Г.** Расчет рефракционно-дифракционных объективов комбинированных устройств чтения/записи оптических дисков нескольких форматов [Текст] / Е.Г. Ежов // Труды VII Международной конференции «Прикладная оптика - 2006», – С-Петербург: 2006. – Т. 3, С. 269-273.
40. **Ежов, Е. Г.** Рельефно-фазовые дифракционные элементы для комбинированных устройств чтения/записи оптических дисков нескольких форматов [Текст] / Е.Г. Ежов // Труды VII Международной конференции «Прикладная оптика - 2006», – С-Петербург: 2006. – Т. 3, С. 274–276.
41. **Ежов, Е. Г.** Сопоставительный анализ коррекционных возможностей оптических элементов различных типов [Текст] / Ежов Е.Г., Степанов С.А., Грейсух Г.И. // Сб. трудов Международного оптического конгресса «Оптика-XXI век». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006 - С. 77.
42. **Грейсух, Г. И.** Методические аспекты описания свойств оптических элементов различных типов [Текст] / Грейсух Г.И., Степанов С.А., Ежов Е.Г. // Сб. трудов Международного оптического конгресса «Оптика-XXI век». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006-С. 77-78.
43. **Ежов, Е. Г.** Современные методы и средства проектирования гибридных оптических систем [Текст] / Ежов Е.Г. // Сб. статей V Международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения». Пенза: ПГСХА, 2006 - С. 98-100.
44. **Ежов, Е. Г.** Устройства чтения/записи оптических дисков нескольких форматов: проблемы и пути решения [Текст]/ Ежов Е.Г. // Сб. статей V Международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения». Пенза: ПГСХА, 2006 - С. 100-103.
45. **Ежов, Е. Г.** Апохроматизация жесткого градиентного эндоскопа [Текст]/ Ежов Е.Г., Степанов С.А. // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 1 - С. 91-97.
46. **Ежов, Е. Г.** Высококачественный массовый микрообъектив для ССТV-систем [Текст]/ Ежов Е.Г. // Современные технологии безопасности. – 2006. – № 3, 4. - С. 12-15.
47. **Ежов, Е. Г.** Проектирование оптических систем с дифракционными элементами на асферических поверхностях [Текст]/ Ежов Е.Г. // Компьютерная оптика. - М.: ИСОИ РАН, МЦНТИ, 2006. – Вып. 30. - С. 9-15.

48. **Ежов, Е. Г.** Телевизоры и мониторы с обратной проекцией: проблемы и пути решения [Текст]/ Ежов Е.Г. // Современные технологии безопасности. – 2007. – № 1. – С. 15-16.
49. **Грейсух, Г.И.** Дифракционная оптика от рождения до наших дней [Текст]/ Грейсух Г.И., Ежов Е.Г. // Сб. трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк - основоположник отечественной голографии». СПб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2007 - С. 54-57.
50. **Ежов, Е. Г.** Дифракционные оптические элементы в информационных и дисплейных технологиях [Текст]/ Ежов Е.Г. // Сб. трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк - основоположник отечественной голографии». СПб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2007 - С. 189-192.
51. **Ежов, Е. Г.** Проектирование гибридных оптических систем [Текст]/ Ежов Е.Г. // Сб. трудов Международной конференции «Математическое моделирование, обратные задачи и приложения». Хмельницкий: ХНУ, 2007 - С. 208-215.
52. **Ежов, Е. Г.** Телевизоры с проекцией на просвет: современное состояние и перспективы [Текст]/ Ежов Е.Г., Грейсух Г.И., Степанов С.А. // Сб. статей V-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов». Пенза: 2007. – С. 110-113.
53. **Ежов, Е. Г.** Применение дифракционных оптических элементов в информационных технологиях [Текст]/ Ежов Е.Г. // Сб. статей V-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов». Пенза: 2007. – С. 113-116.
54. **Ежов, Е. Г.** Дифракционные оптические элементы для проекционных дисплеев [Текст]/ Ежов Е. Г., Грейсух Г. И., Степанов С. А. // Компьютерная оптика. - М.: ИСОИ РАН, МЦНТИ, 2007. – Вып. 31. - С. 22-26.