

На правах рукописи

ФРОЛОВ Максим Евгеньевич

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ
ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ НА ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДИСКАХ**

Специальность 05.11.07 — Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва 2007

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Хорохоров Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Жилкин Александр Михайлович,
МГУГиК (МИИГАИК)
кандидат технических наук, доцент
Ровенская Тамара Сергеевна,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: **ФГУП «Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения»**, г. Москва

Защита состоится «23» апреля 2008 года 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.

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

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

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Бурый Е.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Устройства хранения информации являются широко востребованными и быстро развивающимися системами. Одной из разновидностей устройств хранения информации является устройство, носителем информации в котором служит цифровой оптический диск, запись и считывание с которого осуществляется при помощи оптического излучения. Устройства хранения информации на цифровых оптических дисках завоевали широкую популярность в качестве надежного, недорогого и доступного способа хранения и воспроизведения различного рода информации: кинофильмов, звуковых записей, программ и т.д.

Одним из ключевых элементов таких систем является оптическая головка — комплексная следящая оптико-электронная система, которая осуществляет считывание и запись информации на оптический диск. К оптическим головкам предъявляются требования по высокой плотности считывания и записи, по простоте и дешевизне конструкции, по возможности совместной работы с дисками предыдущих поколений. Динамика развития данного типа устройств предъявляет жесткие требования к срокам и стоимости разработки.

Использование компьютерного моделирования распространения излучения в оптической системе позволяет ускорить и упростить разработку и отладку электронных схем приема и обработки сигналов. Известны работы Х. Хопкинса, М. Мансурипура, А.Ф. Ширанкова и др. авторов, посвященные расчету прохождения оптического излучения через оптическую систему головки, на основе которых создана программа Diffract компании MM Research и программа DVD Simulator, разработанная в Московском Исследовательском центре фирмы Самсунг Электроникс. В основном, все работы, посвященные этой проблематике, используют аппарат скалярной теории дифракции. В работах Мансурипура используется метод разложения оптических полей по плоским волнам. Каждый из этих подходов имеет свои недостатки. Скалярная теория дифракции не учитывает векторного характера поля. Использование разложения по плоским волнам требует существенных вычислительных затрат и не может применяться при анализе информационных элементов диска, размеры которых меньше длины волны излучения. В настоящее время минимальные размеры этих элементов имеют значения порядка половины длины волны излучения в защитном слое диска и сохраняют тенденцию к дальнейшему уменьшению.

Известны работы отечественных авторов: А.Ф. Ширанкова, О.В. Рожкова, Е.Г. Ежова, Г.И. Грейсуха, которые посвящены разработке оптических систем для дисковых устройств памяти. Устройства хранения информации на оптических дисках являются системами, ориентированными на

массовое производство. Поэтому стоимость и технологичность конструкции и всех ее компонентов играют большое значение. Асферические однолинзовые объективы и коллиматоры при массовом производстве позволяют существенно упростить конструкцию и стоимость оптической системы, поэтому они широко используются в современных устройствах. Для обеспечения высокой числовой апертуры однолинзового объектива необходимо использование асферических поверхностей со значительным отклонением от ближайшей сферы. Это приводит к необходимости использования полиномов высокой степени для описания поверхностей объектива и существенно усложняет оптимизацию в современных оптических САПР.

Поэтому задача автоматизированного проектирования высокоапертурных оптических систем для оптических головок, а также математическое моделирование работы таких систем являются актуальными.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методов проектирования лазерных систем хранения информации на цифровых оптических дисках и математическое моделирование работы таких систем.

Задачи исследования

- Разработать методику математического моделирования работы лазерной системы хранения информации на цифровых оптических дисках;
- Разработать алгоритмы расчета полей излучения в высокоапертурной оптической системе чтения и записи информации на дисковые носители;
- Исследовать и разработать методики расчета и проектирования основных элементов оптической системы: объектива и коллиматора;
- Рассмотреть вопросы ахроматизации оптической системы;
- Провести анализ существующих типов комбинированных систем и разработать методики их проектирования;
- Провести проверку разработанных в диссертации теоретических положений на примерах синтеза конкретных оптических головок; проверить достоверность результатов синтеза с помощью анализа полученных решений оптическими пакетами прикладных программ, имеющими мировое признание.

Методы исследования

Методы теории оптических систем, методы геометрической оптики, методы скалярной теории дифракции, методы векторной теории дифракции, численные методы электродинамики, численные методы решения дифференциальных уравнений, численные методы интегрирования.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые разработана методика математического моделирования работы оптической системы считывающей головки, основанная на сочетании методов скалярной теории дифракции, векторной теории дифракции и численного решения уравнений Максвелла, которая позволяет проводить расчеты полей излучения как в современных, так и в перспективных оптических дисковых системах памяти с высокоапертурными объективами и дисками с информационными элементами, минимальные размеры которых сопоставимы и менее длины волны излучения.
2. В рамках векторной теории дифракции предложен алгоритм расчета светового поля в информационной плоскости диска, который позволяет получать распределение поля, формируемого оптической системой высокой числовой апертуры.
3. Предложен алгоритм расчета результата взаимодействия излучения, сформированного объективом, с информационными элементами на диске, на основе численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей.
4. Получена система из двух дифференциальных уравнений, описывающая профили поверхностей однолинзового апланатического асферического объектива. Эта система позволяет рассчитывать различные варианты конструктивного исполнения однолинзового объектива с гладкими и фазовыми (киноформными) поверхностями.
5. Разработана методика ахроматизации оптической головки с помощью дифракционного фазового рельефа для двух вариантов исполнения: на одной из гладких поверхностей объектива или на отдельно стоящей плоскопараллельной пластине.
6. Предложены варианты применения разработанных методик и алгоритмов для проектирования комбинированных оптических головок.

Практическая ценность работы

1. Сформулированы рекомендации по математическому моделированию работы оптической системы на основе сочетания трех методов расчета прохождения оптического излучения: скалярной теории дифракции, векторной теории дифракции и численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей.
2. Разработан и реализован в виде программного комплекса для ПЭВМ алгоритм расчета, который позволяет получать распределение поля, формируемого оптической системой высокой числовой апертуры, с учетом векторного характера излучения.
3. Предложен алгоритм расчета распределения оптического излучения, возникающего в результате взаимодействия излучения, сформированного объективом, с информационными элементами на диске, на основе численного решения уравнений Максвелла. Алгоритм реализован в виде комплекса программ для ПЭВМ и позволяет рассчитывать поле, отраженное от информационных элементов различных типов и размеров (в том числе менее длины волны), с учетом векторного характера как падающего, так и рассчитываемого отраженного излучения.
4. На основе полученных в диссертации систем дифференциальных уравнений, описывающих профили поверхностей однолинзового асферического объектива, предложен алгоритм, позволяющий синтезировать различные варианты конструктивного исполнения однолинзового объектива с гладкими и фазовыми (киноформными) поверхностями. Алгоритм реализован в виде программного модуля для пакета математических программ.
5. Разработан способ ахроматизации оптической системы с помощью корректора на основе дифракционного фазового рельефа, реализованный в виде программного модуля для пакета математических программ.
6. Предложены варианты применения разработанных методик и алгоритмов для проектирования комбинированных оптических головок, позволяющих работать с оптическими дисками двух стандартов.

Внедрение результатов работы

Разработанные методики проектирования использованы в НИР, выполненных МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с фирмой Самсунг Электроникс Ко., Лтд., и используются в учебном процессе кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Внедрение

и использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Апробация результатов и публикации

Основные результаты работы доложены на VI и VII международных конференциях «Прикладная оптика», г. Санкт-Петербург, 2004, 2006 гг., на международном симпозиуме «Optical Memory and Optical Data Storage», Honolulu (Hawaii) в 2005 г. По теме диссертации опубликовано 5 работ, одна из них опубликована в журнале, входящем в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 201 странице, содержит 81 рисунок и 6 таблиц.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Методика расчета полей излучения в оптической системе, основанная на комбинации скалярной теории дифракции, векторной теории дифракции и численного решения уравнений Максвелла, позволяющая моделировать работу оптических дисковых систем памяти с высокоапертурными объективами и дисками, информационные элементы которых имеют размеры, сопоставимые с длиной волны излучения.
2. Алгоритм расчета поля в информационной плоскости диска, создаваемого высокоапертурной оптической системой, обеспечивающий определение параметров поля в рамках векторной теории дифракции с учетом поляризации излучения.
3. Расчет поля излучения, отраженного от информационных элементов диска, позволяющий описать взаимодействие излучения, сформированного объективом, с информационными элементами диска различных типов и размеров (в том числе менее длины волны), с учетом векторного характера как падающего, так и рассчитываемого отраженного излучения.
4. Синтез однолинзового апланатического объектива, основанный на решении системы из двух дифференциальных уравнений, описывающих профиль поверхностей объектива как гладких, так и фазовых (киноформных).
5. Ахроматизация оптической системы с использованием дифракционного фазового рельефа для двух вариантов исполнения (на одной из гладких поверхностей объектива и на отдельно стоящей плоскопараллельной пластине), обеспечивающая стабильность работы при

скачкообразном изменении длины волны полупроводникового лазера в связи с изменением мощности его излучения.

Достоверность и обоснованность результатов

Разработка теоретических положений и создание на их основе методик и алгоритмов основаны на известных и подтвержденных практикой физических теориях и математических методах. Разработанные алгоритмы опробованы экспериментально. Результаты численных экспериментов анализировались и сопоставлялись с экспериментальными данными других исследователей при решении аналогичных задач. Результаты синтеза также проверялись программами оптических САПР, получивших мировое признание.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе приводятся общие сведения и основы функционирования дисковых оптических систем памяти. На рис. 1 представлена упрощенная схема оптической системы. Она включает в себя полупроводниковый лазер, коллиматор, объектив, анализатор фокусировки и положения пятна относительно дорожки, а также многоплощадочный фотоприемник, поляризационный светоделитель и четвертьволновую пластинку.

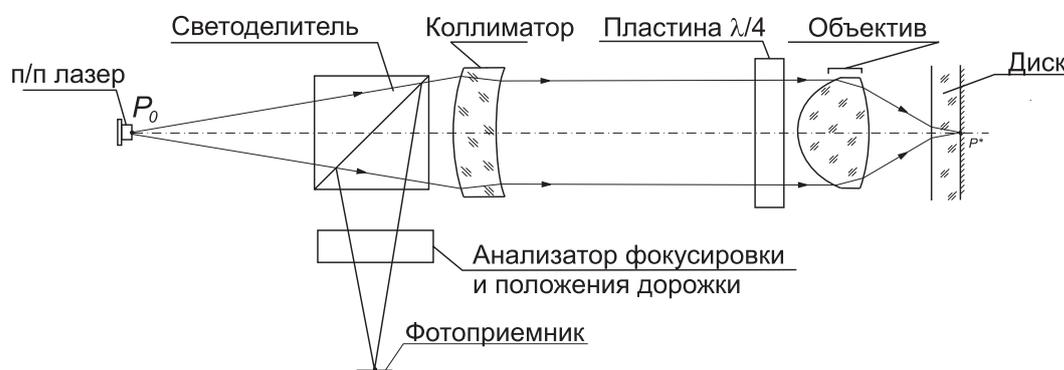


Рис. 1. Схема оптической системы

Излучение лазера коллимируется и фокусируется объективом в информационной плоскости диска, формируя пятно, посредством которого осуществляется считывание и запись информации на диск. Объектив помещен в подвижную каретку с электромагнитным подвесом и осуществляет перемещения как вдоль оси для фокусировки, так и в поперечном направлении для слежения за дорожкой.

Информация на цифровых оптических дисках записана на спиральной дорожке в виде кодированной последовательности информационных элементов. Как правило, информационные элементы выполняются в виде

углублений в четверть длины волны в отражающем слое диска, что приводит к модуляции сигнала считывания при прохождении информационного элемента. Кроме информационного сигнала, многоплощадочный фотоприемник формирует сигналы для систем слежения за дорожкой (автотрекинг) и автофокусировки.

В первой главе изложены теоретические основы и границы применимости трех методов расчета полей, предлагаемых для расчета оптических полей в оптической системе: методов скалярной теории дифракции, методов векторной теории дифракции и метода конечных разностей в пространственно-временной области. Показано, что каждый из методов имеет свою область применимости по отношению к задаче расчета оптических полей в ОС устройств хранения информации на цифровых оптических дисках. Скалярная теория дифракции хорошо известна и позволяет рассчитывать поля, формируемые ОС с малой числовой апертурой. Это делает ее востребованной при расчетах полей в формирующем и считывающем каналах при расчетах коллимационной и приемной части. Векторная теория дифракции свободна от ограничения на числовую апертуру и позволяет рассчитывать поля с учетом векторного характера излучения. Поэтому векторная теория дифракции предлагается для использования при анализе полей, формируемых высокоапертурным объективом в информационной плоскости диска.

Как скалярная, так и векторная теории дифракции предполагают, что размеры области, для которой производится расчет дифракционного интеграла, должны быть существенно больше длины волны излучения. Это не позволяет использовать их при рассмотрении взаимодействия сфокусированного излучения с информационными элементами диска. Для решения этой задачи предлагается использовать метод конечных разностей во временной области, который в настоящее время является одним из известных методов численного решения электродинамических задач. Метод конечных разностей во временной области (FDTD) был предложен в 1966 году, однако, наибольшую популярность получил лишь в последнее время. Он основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной пространственно-временной формулировке. Конечно-разностные уравнения позволяют определять электрические и магнитные поля в текущий момент времени на основании известных значений полей в предыдущий момент времени. Для обеспечения необходимой точности этот метод требует достаточно частой сетки, поэтому для решения задач не локализованных в пространстве необходимы большие вычислительные ресурсы. Поскольку область светового пятна, формируемого оптической системой в информационной плоскости диска, сравнительно мала, использование метода FDTD не столь затратно и может быть выполнено с применением современных ПЭВМ.

Вторая глава посвящена разработке методик расчета оптических полей в оптической системе головок с применением методов, рассмотренных в первой главе. Рассматриваются три задачи: 1) расчет поля, создаваемого объективом в информационной плоскости диска; 2) расчет поля, отраженного от диска, после взаимодействия сфокусированного излучения с информационной структурой диска; 3) расчет поля на входном зрачке объектива после отражения от диска.

При расчете излучения, формируемого объективом на диске, предлагается использовать методы векторной теории дифракции. Поле на диске при этом описывается следующим дифракционным интегралом:

$$\vec{e}(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{\vec{a}(s_x, s_y)}{\sqrt{1 - s_x^2 - s_y^2}} e^{ik\{\Phi(s_x, s_y) + s_x x + s_y y + s_z z\}} d s_x d s_y,$$

где $\Phi(s_x, s_y)$ – волновая aberrация, (x, y, z) – координаты точки анализа относительно точки идеального изображения, $\vec{a}(s_x, s_y)$ – поле напряженности луча на выходном зрачке ОС, s_x, s_y – направляющие косинусы лучей, заполняющих телесный угол Ω .

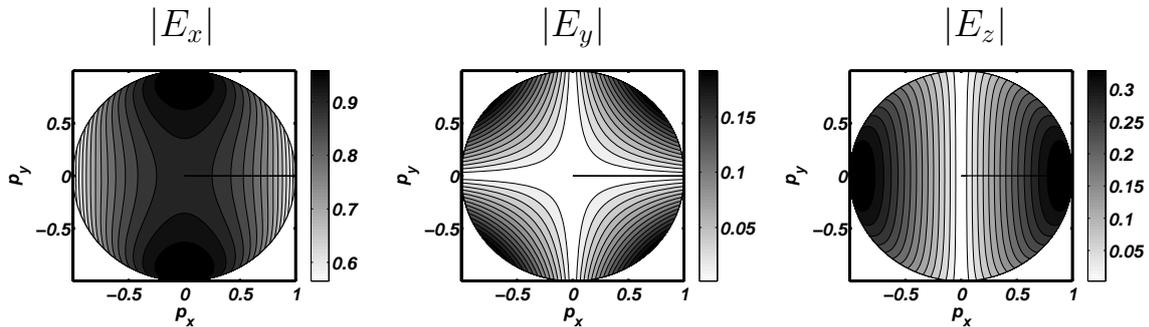


Рис. 2. Распределение амплитуды излучения в выходном зрачке объектива

Для определения поля в выходном зрачке объектива необходимо использовать трассировку лучей, учитывающую состояние поляризации и френелевские коэффициенты при преломлении на границах сред. Предложен алгоритм расчета трассировки лучей через ОС с учетом поляризации. На рис. 2, 3 приведены результаты расчета полей для объектива с числовой апертурой 0,85 в выходном зрачке и в информационной плоскости диска, при линейной поляризации излучения перед объективом вдоль оси x . Из рисунков видно, что как в выходном зрачке, так и на диске присутствуют все три компоненты поля по x , y и z , при линейной поляризации излучения на входе перед объективом. При этом с увеличением числовой апертуры доля y и z компонент возрастает. Разность интенсивностей для скалярного

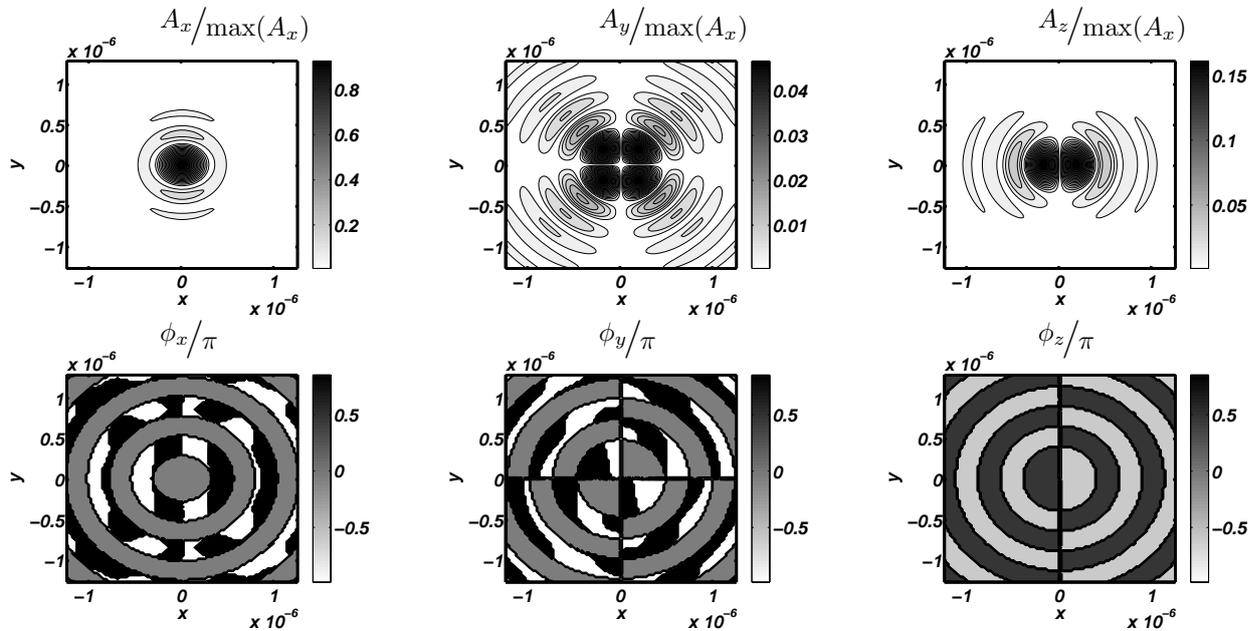


Рис. 3. Результаты расчета поля на диске

и векторного случаев показана на рис. 4 и составляет значение порядка 4% по интенсивности.

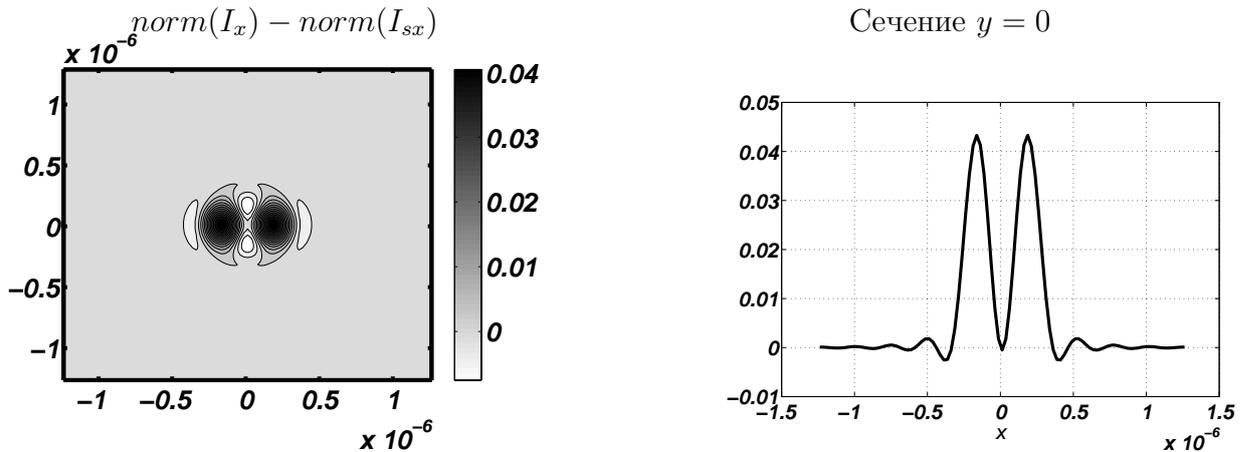


Рис. 4. Разность распределений интенсивности поля на диске между скалярным и векторным случаем

Для анализа взаимодействия излучения с информационными элементами предлагается использовать рассмотренный в первой главе метод конечных разностей. Разработана методика и алгоритм расчета распределения оптического излучения, возникающего в результате взаимодействия излучения, сформированного объективом, с информационными элементами на диске, на основе численного решения уравнений Максвелла. Разработанный алгоритм, реализованный в виде комплекса программ для ПЭВМ, позволяет рассчитывать поле, отраженное от информационных элементов

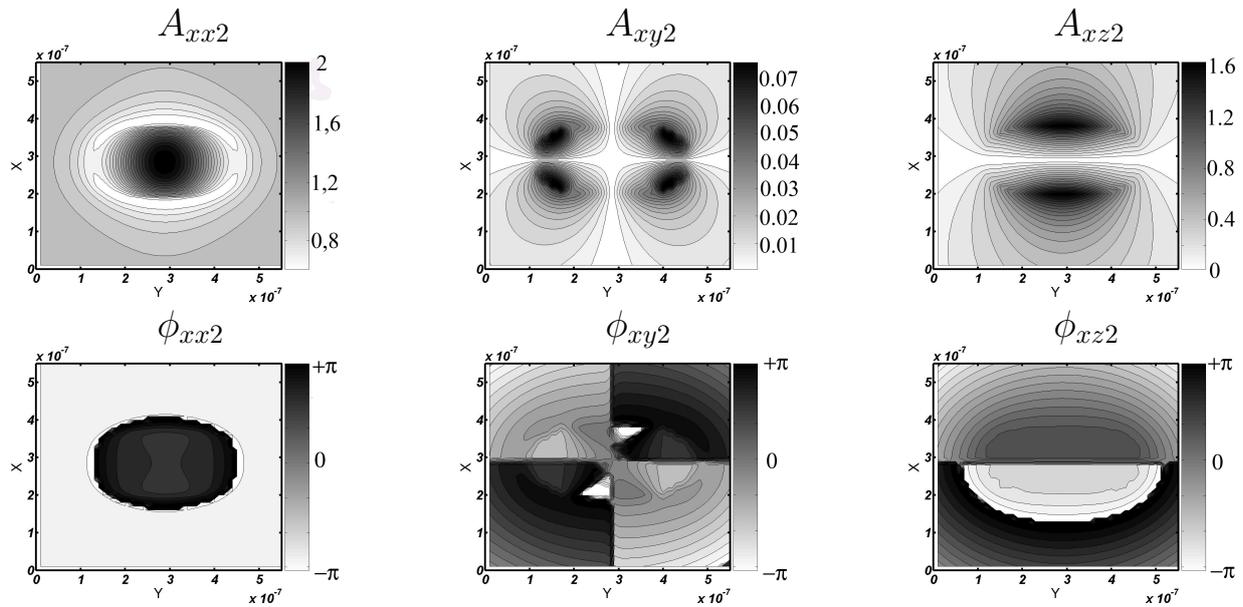


Рис. 5. Амплитудно-фазовое распределение поля, отраженного от информационного элемента при падении плоской волны, поляризованной вдоль оси x

различных размеров и типов, с учетом векторного характера как падающего, так и отраженного излучения. Произведено исследование взаимодействия плоской волны линейной поляризации с информационными элементами различной формы. На рис. 5 представлен пример расчета поля, отраженного от диска, для падающей плоской волны, поляризованной вдоль оси x . Видно, что для плоской падающей волны с линейной поляризацией при отражении возникает сложное амплитудно-фазовое распределение. Так, для плоской волны с единичной амплитудой, поляризованной вдоль оси x , отраженное поле после взаимодействия с информационным элементом ВД диска содержит y и z составляющие поля с максимальным значением по амплитуде 0,06 и 0,6 соответственно. При использовании фазовой модели для описания информационных элементов в расчетах, основанных на скалярной теории дифракции, эти составляющие не учитываются. Разработанная методика и алгоритмы позволяют проводить расчеты прохождения оптического излучения как в современных, так и перспективных оптических дисковых системах памяти с учетом поляризационных эффектов при требованиях к ресурсам и производительности доступных для современных ПЭВМ.

Третья глава посвящена разработке методик проектирования основных элементов оптической системы.

Предложено решение задачи автоматизированного синтеза апланатического асферического синглета с заданной числовой апертурой, фокусирующего излучение в информационную плоскость диска с учетом толщины

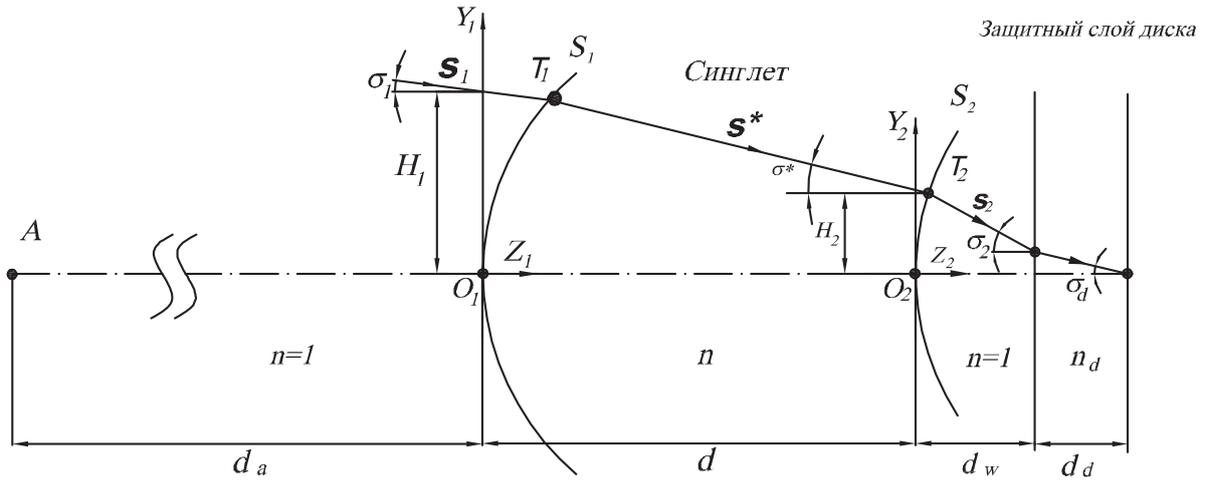


Рис. 6. К синтезу асферических поверхностей

защитного слоя. Показано, что задача поиска двух поверхностей синглета S_1, S_2 (см. рис. 7) сводится к решению системы из двух дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{d Z_1}{d t_1} = - \left(\frac{n \tilde{d}_z - \tilde{d} \sqrt{1 - t_1^2}}{n \tilde{d}_y - t_1 \tilde{d}} + \frac{t_1}{\sqrt{1 - t_1^2}} \right)^{-1} \frac{Z_1 + d_a}{(1 - t_1^2)^{\frac{3}{2}}}; \\ \frac{d Z_2}{d t_2} = \left(\frac{n \tilde{d}_z - \tilde{d} \sqrt{1 - t_2^2}}{n \tilde{d}_y - t_2 \tilde{d}} + \frac{t_2}{\sqrt{1 - t_2^2}} \right)^{-1} \left(\frac{d H_2}{d t_2} - \frac{Z_2}{(1 - t_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\tilde{d}_y = \frac{Z_2 t_2}{\sqrt{1 - t_2^2}} - \frac{(Z_1 + d_a) t_1}{\sqrt{1 - t_1^2}} - H_2; \quad \tilde{d}_z = d + Z_2 - Z_1; \quad \tilde{d} = \sqrt{\tilde{d}_y^2 + \tilde{d}_z^2};$$

Численное решение этой системы может быть выполнено с применением стандартных алгоритмов. Кроме ускорения расчета, данный подход позволяет проводить экспертную оценку различных вариантов конструктивных параметров объектива в процессе синтеза, непосредственно наблюдая к каким изменениям формы объектива приводит варьирование того или иного параметра.

На рис. 7 приведены результаты расчета реализуемой числовой апертуры для различных значений рабочего отрезка d_w . Реализуемая числовая апертура определяется при численном решении системы дифференциальных уравнений (1) с контролем погрешности вычислений. Из графика видно, что не при всяких значениях расстояния между диском и объективом возможна реализация заданного значения числовой апертуры. Например,

на рис. 8 приведены результаты расчета поверхностей синглета для различных значений $d_w = 0,699; 0,701; 0,703; 0,705; 0,707; 0,709$, которые обозначены номерами 1, 2, ..., 6 соответственно. Поскольку все приведенные варианты профилей поверхностей позволяют получить требуемую числовую апертуру, то это позволяет выбирать наиболее удовлетворяющий разработчика вариант поверхностей, например, исходя из лучшей технологичности, эксплуатационных характеристик или каких либо других требований и предпочтений.

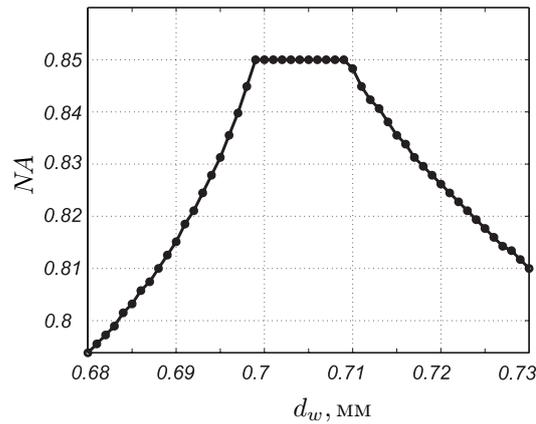


Рис. 7. Зависимость достигнутой апертуры NA от рабочего расстояния d_w

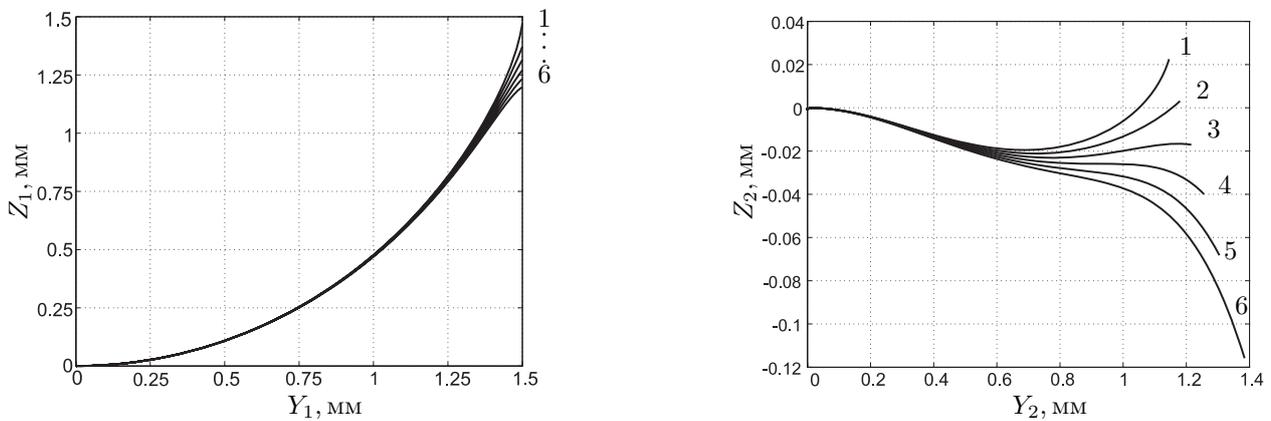


Рис. 8. Профили синглета Z_1, Z_2 при различном рабочем расстоянии

Получены системы дифференциальных уравнений для различных случаев конструктивного исполнения синглета: с различными комбинациями гладких и фазовых (киноформных) поверхностей, для объектива с нанесенными фазовыми поверхностями, для объектива с вынесенным фазовым корректором.

К современным системам оптических головок предъявляются дополнительные требования по исправлению локального хроматизма, который

возникает вследствие смены генерируемой моды полупроводникового лазера при переключении с чтения на запись. Изменение длины волны, генерируемой лазером, при этом составляет значение порядка 1 нм.

Второй параграф главы посвящен ахроматизации объективов головок, рассмотрены различные способы компенсации продольного хроматизма с применением ступенчатых микрорельефов и дифракционных оптических элементов (ДОЭ), выполненных или на одной из поверхностей синглета или в виде дополнительного корректора. Разработан итерационный алгоритм расчета параметров фазового корректора локального хроматизма объектива. Рассмотрены особенности расчета и приведены изменения необходимые для использования разработанных методик синтеза применительно к коллиматору.

В процессе развития технология хранения и записи информации на цифровых оптических дисках сменила несколько поколений устройств: CD, DVD, HD-DVD и Blu Ray. Это делает актуальным проведение работ, направленных на создание эффективных оптических систем комбинированного типа. Под комбинированным типом оптической системы понимается такая оптическая система, которая обеспечивает работу системы с различными типами дисков (CD, DVD, Blu Ray). Системы для работы с различными типами дисков отличаются друг от друга длиной волны считывающего/записывающего излучения, числовой апертурой объектива, обеспечивающей требуемое разрешение на поверхности диска, а также толщиной защитного слоя дисков разных типов. Представлены различные схемные решения, используемые в комбинированных системах для работы с дисками разных стандартов, рассмотрены различные подходы к проектированию таких систем, в том числе, с использованием разработанных методик и алгоритмов.

Четвертая глава посвящена применению разработанных методик расчета оптических головок. Рассмотрены две задачи: разработка одноканальной оптической системы по стандарту Blu-Ray и разработка комбинированной системы для работы с дисками стандартов BD и DVD.

Представлен пример расчета комбинированной двухканальной системы, включающий в себя: синтез объектива с вынесенным ахроматическим корректором, а так же синтез коллиматора с ахроматическим корректором, нанесенным на одну из поверхностей. Получена оптическая система, обладающая качеством изображения близким к дифракционному: волновая aberrация для точки на оси не превышает $0,01\lambda$ для номинальной длины волны и $0,04\lambda$ для смещенной на $+2$ нм длины волны без подфокусировки, среднеквадратичное отклонение волновой aberrации по полю менее $0,1\lambda$. При смещении основной длины волны в диапазоне ± 5 нм с учетом подфокусировки, волновая aberrация для точки на оси не превышает $0,05\lambda$ для номинальной длины волны и $0,1\lambda$ для смещенной на $+2$ нм длины волны

без подфокусировки, среднеквадратичное отклонение волновой aberrации по полю менее $0,1\lambda$.

Представлен расчет комбинированной двухканальной оптической системы для дисков стандарта BD и DVD, включающий в себя: синтез объектива с вынесенным ахроматическим корректором, синтез коллиматора с ахроматическим корректором, нанесенным на одну из поверхностей, а также расчет параметров элемента сопряжения каналов. Достигнуты следующие основные технические характеристики: для канала Blu-Ray волновая aberrация для точки на оси не превышает $0,01\lambda$ для номинальной длины волны и $0,04\lambda$ для смещенной длины волны без подфокусировки, среднеквадратичное отклонение волновой aberrации по полю менее $0,1\lambda$, для канала DVD волновая aberrация для точки на оси не превышает $0,03\lambda$ для номинальной длины волны и $0,07\lambda$ для смещенной на $+2$ нм длины волны без подфокусировки. Среднеквадратичное отклонение волновой aberrации по полю менее $0,06\lambda$.

Проведенные результаты расчетов подтверждают корректность и эффективность разработанной в диссертации методики проектирования комбинированных оптических головок. Достоверность выполненных расчетов подтверждается анализом рассчитанной оптической системы с помощью программы Zemax.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе, и выводы по диссертации.

В приложении содержатся подробные данные по синтезу оптических систем, рассмотренных в четвертой главе диссертации, а также графики остаточных aberrаций для рассчитанных оптических систем.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований в диссертации решена актуальная научно-техническая задача по разработке методов проектирования и моделирования работы лазерных систем чтения и записи информации на цифровых оптических дисках.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Предложена методика моделирования работы оптической системы, основанная на использовании методов скалярной теории дифракции, векторной теории дифракции и численного решения уравнений Максвелла во временной области методом конечных разностей. Методика позволяет проводить расчеты прохождения излучения в оптических дисковых системах памяти с высокоапертурными объективами и дисками, информационные элементы которых имеют минимальные размеры, сопоставимые с длиной волны излучения.

2. Разработан алгоритм расчета светового поля в информационной плоскости диска в рамках векторной теории дифракции, который позволяет получить распределение поля, формируемого высокоапертурным объективом, с учетом поляризации излучения.
3. На основе численного решения уравнений Максвелла создан алгоритм расчета взаимодействия излучения, сформированного объективом, с информационными элементами диска, который позволяет рассчитывать поле, отраженное от информационных элементов различных типов и размеров, с учетом векторного характера как падающего, так и отраженного излучения. Алгоритм реализован в виде комплекса программ для ПЭВМ.
4. Предложена методика синтеза однолинзового асферического апланатического объектива, основанная на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих профиль поверхностей объектива. Методика, реализованная в виде программного модуля, обеспечивает автоматизированный расчет высокоапертурных объективов, а также коллиматоров оптической системы.
5. Разработана методика ахроматизации однолинзового апланатического объектива с помощью ахроматического корректора в виде дифракционного фазового рельефа. Рассмотрены два варианта исполнения корректора: на одной из гладких поверхностей линзы объектива и на отдельной плоскопараллельной пластине.
6. Рассмотрены и обобщены наиболее известные и распространенные схемы комбинированных оптических головок, позволяющие работать с оптическими дисками нескольких типов. Предложены варианты применения разработанных методик и алгоритмов для проектирования комбинированных оптических головок для работы с дисками двух стандартов.
7. На базе разработанных в диссертации методик синтеза произведено проектирование оптической системы стандарта Blu-Ray. Высокая эффективность разработанных методик подтверждается хорошими техническими характеристиками: остаточная волновая aberrация для точки на оси в рабочем спектральном диапазоне не превышает $0,04\lambda$, среднеквадратичное отклонение волновой aberrации по полю менее $0,1\lambda$.
8. Проведен расчет комбинированной двухканальной системы для стандартов Blu-Ray и DVD. Основные технические характеристики: в каналах Blu-Ray и DVD волновая aberrация в рабочем спектральном

диапазоне ± 2 нм для точки на оси не превышает $0,04\lambda$ и $0,07\lambda$ соответственно, среднеквадратичное отклонение волновой аберрации по полю менее $0,1\lambda$ в обоих каналах. Корректность результатов расчетов подтверждается анализом разработанных оптических систем с помощью программы Zemax.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Фролов М.Е., Хорохоров А.М. Автоматизированный синтез высокоапертурного апланатического синглета // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Приборостроение. — 2005. — Спец. выпуск. — С. 43–50.
2. Фролов М.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Расчет объектива с микрорельефом для комбинированной оптической головки для чтения и записи CD, DVD дисков // Прикладная оптика: Сборник трудов VII международной конференции. — СПб., 2004. — Т. 3. — С. 236–241.
3. Design of aplanatic singlet for pickup / M.E. Frolov, A.M. Khorokhorov, A.F. Shirankov, Y.B. Golubkov // Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage. — Honolulu (Hawaii), 2005. — P. 135–138.
4. Фролов М.Е., Хорохоров А.М. Автоматизированный синтез высокоапертурного апланатического синглета с хроматическим корректором // Прикладная оптика: Сборник трудов VII международной конференции. — СПб., 2006. — Т. 3. — С. 177–182.
5. Фролов М.Е. Дифракция излучения на информационных элементах оптических цифровых дисков в рамках векторной теории // Прикладная оптика: Сборник трудов VII международной конференции. — СПб., 2006. — Т. 3. — С. 264–269.

Подписано к печати 10.03.2008. Заказ № 17.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. ООО РИА «Димич».
Московская область, Ленинский р-н,
д. Румянцево, стр. 1.

