

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»
Отделение школы (НОЦ) Материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование прохождения Гауссова пучка через оптическую систему
УДК 628.971:620.9:658.5 (571.16)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Чагдурова Е.Б.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Агапов Н.А.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Е.В.	К.Ф.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Назаренко О.Б.	Д.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Оптотехника»	Полисадова Е.Ф.	Д.Ф.-М.Н.		

Томск – 2018 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код Результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Способность формулировать цели, задачи научного исследования или разработки в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность выделять и обосновывать критерии, на основании которых формируются модели принятия решений, составлять план работ, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи
P2	Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов
P3	Способность к профессиональной оценке проблем проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы
P4	Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерных техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности
P5	Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.
P6	Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать

	правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения
P8	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
P9	Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений
P10	Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов
P11	Способность к оценке современного состояния развития науки и техники, владение иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P12	Способность к сбору сведений, анализу и систематизации знаний об исследуемом объекте

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Отделение материаловедения
Направление подготовки (специальность) 12.04.02 «Оптотехника»

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП «Оптотехника»
ОМ ИШНПТ
_____ Полисадова Е.Ф.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Чагдурова Екатерина Баировна

Тема работы:

Исследование Гауссова пучка через оптическую систему	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2018 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования: Оптическая система с 4 поверхностями. Исходные данные: радиусы поверхностей, показатели преломления; длина волны, расстояния от перетяжки падающего пучка до первой поверхности; радиус перетяжки пучка).
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке	1. Аналитический обзор литературных источников на тему: Свойства одномодового гауссова пучка электромагнитных волн. 2. Аналитический обзор литературных источников на тему: Формирование и распространение волновых пучков.

	3. Моделирование в программе <i>Mathcad</i> хода гауссового пучка лучей через систему поверхностей. 4. Анализ результатов исследования.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Старикова Е.В., к.ф.н., доцент
Социальная ответственность	Назаренко О.Б., д.т.н., профессор
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Реферативно представлены все разделы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
д.т.н., профессор	Агапов Н.А.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Чагдурова Е.Б.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Чагдуровой Екатерине Баировне

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Проект выполнен на базе лабораторий ТПУ школы ИШНПТ отделения материаловедения В реализации проекта задействованы 2 человека: руководитель проекта и инженер-исследователь
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам – 30 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проекта, SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование работ по проекту Формирование сметы расходов на реализацию проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсной и финансовой эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности проекта
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет проекта
4. План управления коммуникациями проекта
5. Реестр рисков проекта
6. Оценка ресурсной и финансовой эффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Е.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Чагдурова Е.Б.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ6Б	Чагдуровой Екатерине Баировне

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.02.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Обработка информации на персональном компьютере (обработка результатов анализов, построение графического материала, набор текста). Рабочее место расположено в 250 аудитории шестнадцатого «В» корпуса ТПУ. Имеет естественное и искусственное освещение, компьютерные столы, компьютеры.
1. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	Ознакомиться со следующими документами: - СанПиН 2.2.4.1191-03; - ГОСТ 12.1.002 «ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах»; - ГОСТ 12.1.045 "Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля"; - СанПиН 2.2.4.1191-03;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности.</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности.</p>	<p>1. Вредные факторы</p> <ul style="list-style-type: none"> - Освещенность рабочей зоны; - Микроклимат в помещении; - Шум; - Степень нервно – эмоционального напряжения; - Монотонность труда; - ЭМИ <p>2. Опасные факторы</p> <ul style="list-style-type: none"> - Электробезопасность; -Пожаровзрывоопасность.
<p>2. Экологическая безопасность:</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Правила утилизации ПК; - Правила утилизации люминесцентных ламп; - Правила утилизации макулатуры.

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Существует ряд действий в случае возникновения пожара и мер по ликвидации его последствий. В помещении имеется огнетушитель химический пенный ОХП – Ю, разработан план эвакуации.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности;	- Обеспечение безопасности на рабочем месте; - Режим труда и отдыха при работе с ПЭВМ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Назаренко О. Б.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Чагдурова Е.Б.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 96 страниц, 15 рисунков, 18 таблиц, 25 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: гауссовы пучки, конфокальный резонатор, волновое уравнение, плоская волна, дифракция.

Объектом исследования оптическая система поверхностей.

Цель работы: определение распределения комплексной амплитуды поля в плоскости анализа и пространственных параметров преобразованного пучка.

В процессе исследования изучены основные методы расчета гауссова пучка.

В результате исследования представлен алгоритм для расчета хода гауссова пучка через оптическую систему поверхностей в программе *Mathcad*.

Методологическая основа: теоретические методы, основанные на научных трудах исследователей в области лазерной физики и оптики.

Область применения: исследования в области лазерной физики.

Экономическая эффективность и значимость работы: гауссов пучок позволяет ввести некоторые характерные параметры, имеющие важное значение для успешного применения лазерных источников.

Список сокращений

ЛИ – лазерное излучение;

ОС – оптическая система;

ОП – опорная плоскость;

ЛОС – лазерно-оптическая система;

ОКГ – оптический квантовый генератор;

ЛП – лазерный пучок.

Оглавление

Введение.....	13
Глава 1 Методы расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами.....	15
1.1 Волновые методы описания преобразования Гауссова пучка идеальной оптической системой.....	16
2.2 Геометрическое описание преобразования Гауссова пучка оптической системой.....	18
Глава 2 Правило <i>ABCD</i> для Гауссова пучка.....	21
2.1 Матрица преобразования луча.....	22
2.2 Матрица перемещения луча.....	24
2.3 Матрица преломления луча.....	25
2.4 Система поверхностей.....	26
Глава 3 Гауссов пучок в свободном пространстве.....	27
3.1 Свойства ономодового Гауссова пучка электромагнитных волн.....	27
3.2 Расчет хода Гауссова пучка через оптическую систему.....	34
Глава 4 Результаты проведенного исследования.....	36
4.1 Анализ параметров прошедшего пучка.....	36
Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	42
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	43
5.2 <i>SWOT</i> - анализ.....	45
5.3 Планирование комплекса работ по проекту.....	47
5.3.1 Планирование перечня работ.....	47
5.3.2 Определение трудоемкости работ.....	48
5.4 Разработка графика выполнения проекта.....	50
5.5 Бюджет проекта.....	51
5.5.1 Расчет материальных затрат проекта.....	52
5.5.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	53
5.5.3 Отчисления во внебюджетные фонды.....	54
5.5.4 Накладные расходы.....	55
5.6 План управления коммуникациями проекта.....	55
5.6.1 Реестр рисков проекта.....	57
5.7 Формирование сметы затрат проекта.....	58
Глава 6 Социальная ответственность.....	60
6.1 Производственная безопасность.....	60
6.1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	61
6.1.2 Микроклимат в помещении.....	62
6.1.3 Степень нервно-эмоционального напряжения.....	63
6.1.4 Монотонный режим работы.....	64
6.1.5 Шум.....	65
6.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	66
6.2.1 Короткое замыкание.....	67
6.3 Экологическая безопасность.....	68
6.3.1 Правила утилизации компьютеров.....	68
6.3.2 Правила утилизации макулатуры.....	69
6.3.3 Правила утилизации люминесцентных ламп.....	70
6.4 Безопасность в ЧС.....	71
6.5. Правовые и организационные мероприятия по обеспечению безопасности.....	72
6.5.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	72

6.5.2 Организационные мероприятия при компоновке зоны.....	73
Заключение.....	75
Список использованной литературы.....	76
Приложение А.....	78
Приложение Б.....	83

Введение

Актуальность работы:

Для эффективного использования лазерного излучения необходимо знать свойства лазера, особенности распространения пучка и возможность его преобразования. Управление распространением лазерного пучка, т.е. его пространственное преобразование, является одной из важных задач, которую решают практически.

Появление лазера способствовало введению понятия гауссова пучка.

Излучение, генерируемое лазерами, является когерентным и представляет собой узкий пучок, поперечное сечение которого намного больше длины волны. По этой причине дифракционная расходимость таких пучков невелика, а амплитуда медленно изменяется с продольной координатой. Данные световые пучки являются гауссовыми, так как амплитуда таких пучков в поперечной плоскости изменяются по закону Гаусса, а фазовая поверхность искривляется по мере распространения пучка.

Гауссовы пучки наиболее полно и просто характеризуют свойства лазерных пучков, а также собственные типы колебаний открытых резонаторов и оптических волноводов. Но, тем не менее, гауссовы пучки являются достаточно хорошим приближением.

Область применения лазерных лучей в настоящее время широкая, простирается от научных сфер, таких как нелинейная, интегральная оптика, до машиностроительной промышленности. При этом рассматриваются особенности распространения и свойства лазерных лучей в различных средах: прозрачных и непрозрачных, однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных. В связи с этим возникает необходимость подробного исследования гауссовых пучков света.

Цель работы: определение пространственных параметров преобразованного пучка в плоскости анализа.

Задачи исследования:

1. Исследовать свойства гауссового пучка методом матричной оптики.
2. Рассчитать выходные характеристики гауссового пучка оптической системы.

Объект исследования: оптическая система поверхностей с конструктивными параметрами (r, d, n) , характеристики входного пучка.

Предмет исследования: метод определения параметров гауссового пучка на элементах оптической системы.

Глава 1 Методы расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами

Возникновение оптических квантовых генераторов способствовало появлению и быстрому развитию новых научных направлений. Одно из этих направлений – лазерная оптика, изучающая вопросы формирования лазерного излучения оптическими резонаторами и преобразование его оптическими системами, а также вопросы синтеза таких систем, которые обеспечивают формирование лазерного пучка с требуемыми параметрами. Данное направление сформировалось и продолжает развиваться, улучшая характеристики лазеров, а также область их применения.

Значительную роль в теории лазерной оптики занимают гауссовы пучки, формирующиеся устойчивыми резонаторами. В работах [1,2] отмечено, у гауссовых пучков, распространяющихся в свободном пространстве, распределение амплитуды поля в пространстве не изменяется, а меняется масштаб этого распределения, определяющий поперечный размер пучка. При этом, на удалении z поперечного сечения гауссова пучка от перетяжки, пучок имеет сферический волновой фронт, радиус кривизны которого описывается выражением:

$$R_{\Phi}(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_k}{z} \right)^2 \right], \quad (1)$$

z_k – параметр конфокальности пучка – продольное расстояние от перетяжки пучка, на котором размер пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз.

Выражение (1) показывает, что радиус кривизны волнового фронта гауссова пучка изменяется от $2z_k$ до бесконечности [1,2].

Радиус кривизны волнового фронта в сечении перетяжки и в дальней зоне при $z \rightarrow \infty$ равен бесконечности. Вследствие этого формируемые устойчивым лазерным резонатором гауссовы пучки обладают свойствами, которые не присущи излучению, возникающему от тепловых, люминесцентных источников.

Чаще всего параметры лазерного пучка, сформированного резонатором, не соответствуют требуемым для решения практических задач. Поэтому пучок, вышедший из резонатора, преобразовывают с помощью внешней (вне резонатора) оптической системы и лазерно – оптической системы.

В работе задачу преобразования лазерного пучка оптической системой представляется следующим образом: по указанным характеристикам и параметрам входящего пучка в оптическую систему, а также ее конструктивным параметрам (r, d, n) , определить распределение комплексной амплитуды поля $\psi(x, y, z)$ в плоскости анализа z и пространственные параметры преобразованного пучка.

Решением данной задачи может быть, как строгим, так и приближенным. В приближенном варианте решения вводят различные допущения. При рассмотрении компонентов ЛОС идеальными (без аберраций), а также при отсутствии дифракции решение получено в параксиальном приближении [4,5]. Методы геометрической и волновой оптики используют для уточнения решения в параксиальном приближении, при этом усложняя модель за счет учета аберраций ЛОС или одновременно с дифракционными эффектами. Для этого используют скалярную и векторную теории дифракции [1,5–7]. Скалярный метод дифракционной теории применяется в случае, когда необходимо знать точную структуру электромагнитного поля лазерного пучка, преобразованного оптической системой или, когда диафрагмирование пучка играет существенную роль, что не учитывается в геометрической оптике.

Векторная теория дифракции основывается на уравнения Максвелла, то есть на полном описании электромагнитного поля, и используется, когда допущения остальных методов оказывается недопустимым.

1.1 Волновые методы описания преобразования Гауссова пучка идеальной оптической системой

Идеальная оптическая система не вносит дополнительные искажения в форму волнового фронта, то есть не изменяет фазу пучка по квадратичным

законам [1,5]. При прохождении пучка через тонкую линзу с задним фокусным расстоянием f' комплексная амплитуда выходного поля имеет вид:

$$\psi'(\xi, \eta) = \psi(\xi, \eta) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda f'} (\xi^2 + \eta^2) \right], \quad (2)$$

где ψ, ψ' - распределение комплексной амплитуды поля на входе и выходе линзы соответственно, ξ, η – поперечные координаты на линзе.

Так как для всех мод зависимость изменения радиуса кривизны волнового фронта (1) и параметр конфокальности z_k пучка одинаковы, исследование преобразования многомодового пучка идеальной ЛОС ограничивают рассмотрением основной моды [1,2,8]. Пространственными параметрами гауссова пучка с длиной волны излучения λ являются: размер перетяжки σ_0 , (по уровню $1/e^2$ от осевой интенсивности); параметр конфокальности z_k ; угловая расходимость $2\theta_0$ (по уровню $1/e^2$ от осевой интенсивности). А также положение перетяжки входного пучка задается величиной z_p (ее удаление относительно переднего фокуса ЛОС) или отрезком s_p (ее удаление относительно первой поверхности ЛОС).

В настоящее время для определения параметров гауссова пучка на выходе идеальной ЛОС пользуются методы:

1. метод varianсов [2,8];
2. $ABCD$ – метод [1,2,7];
3. Метод сопряженных плоскостей [1,2].

В методе varianсов и $ABCD$ – методе параметры гауссовы пучка в произвольном сечении описываются комплексным числом: V , комплексным параметром кривизны Когельника $1/q$. В сечении пучка комплексная величина определяется размерам пучка и радиусом кривизны волнового фронта. При распространении гауссова пучка в свободном пространстве и при его преобразовании оптической системой, varianс и комплексный параметр кривизны изменяются в соответствии с соотношениями, приведенными в

работах [2,7,8]. Преимуществом использования данных методов является компактность записи аналитических выражений в комплексной форме.

2.2 Геометрическое описание преобразования Гауссова пучка оптической системой

В данном случае используют метод лучевых пакетов [2,11]. Совмещая центр системы координат с центром перетяжки гауссова пучка, для распределения интенсивности поля в произвольной точке (x, y, z) получается:

$$\bar{I}_{00}(x, y, z) = \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{z_k}{z^2 + z_k^2} (x^2 + y^2) \right] \quad (3)$$

В цилиндрических координатах (ρ, φ, z) поверхность равной относительной интенсивности:

$$\frac{\rho^2}{\rho_0^2} - \frac{z^2}{z_k^2} = 1, \quad (4)$$

где $\rho^2 = x^2 + y^2$, $\rho_0^2 = x_0^2 + y_0^2$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от точки наблюдения в пучке до оси пучка, а ρ_0 – размер пучка в сечении перетяжки ($z = 0$), который соответствует уровню плотности мощности, что и точка наблюдения (x, y, z) .

Выражение (4) описывает однополостный гиперболоид вращения, вследствие чего лазерный пучок с распределением относительной интенсивности поля (3) можно рассматривать как совокупность вложенных гиперболоидов вращения вида (4) с одинаковым параметром конфокальности z_k и различными размерами пучка в сечении перетяжки ρ_0 , соответствующими различными уровнями энергии (рисунок 1).

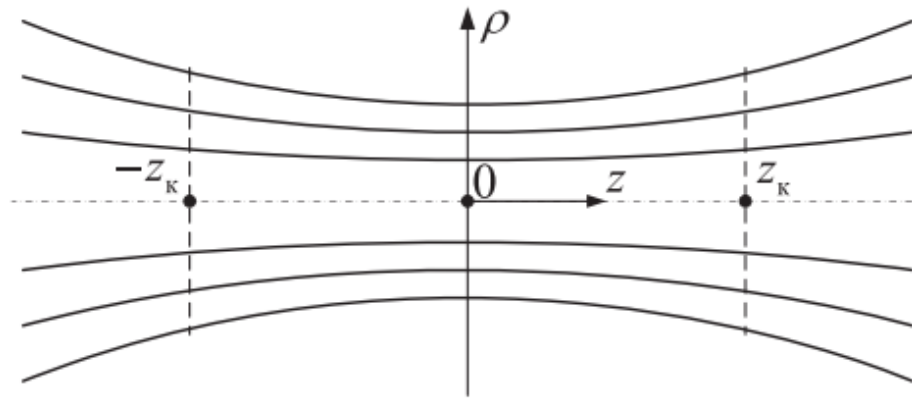


Рисунок 1 – Линии равной относительной интенсивности

Выражения направляющих векторов для однополостного гиперболоида
(2) \vec{v}_1 и \vec{v}_2 и его прямолинейных образующих:

$$\vec{v}_{1,2} = \left\{ \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{xz}{z_k} \pm y \right); \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{xz}{z_k} \mp y \right); z_k \right\} \quad (5)$$

Семейство всех лучей с направляющими векторами \vec{v}_1 или \vec{v}_2 , которые принадлежат одному однополостному гиперболоиду (рисунок 2) называется лучевым пакетом.

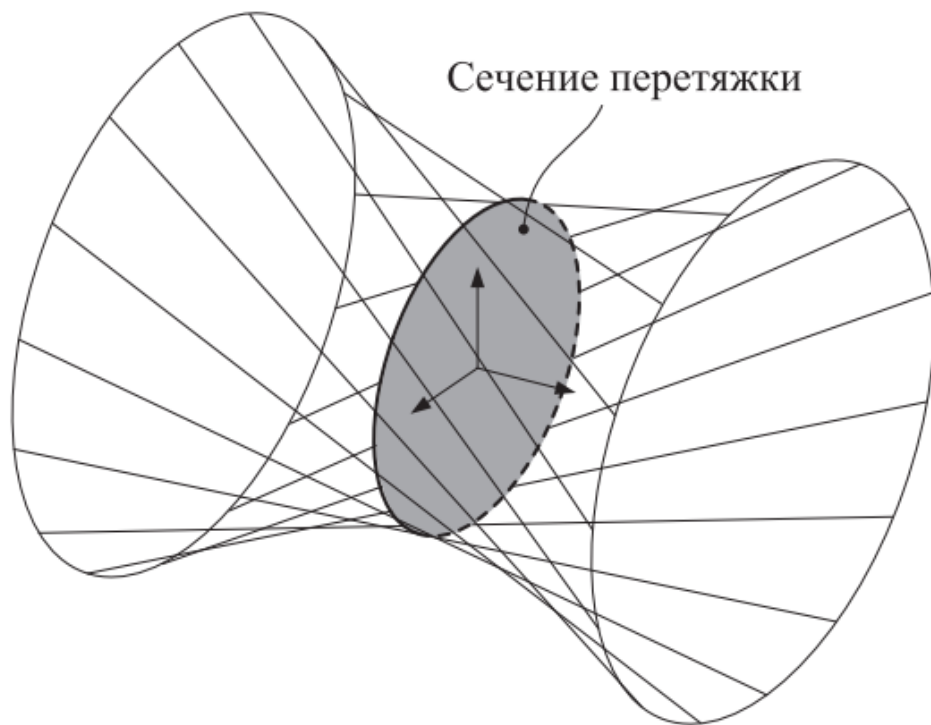


Рисунок 2 – Лучевой пакет

Для определения параметров каждого лучевого пакета на выходе ЛОС используются известные алгоритмы расчета хода луче через ОС [8,9].

Метод лучевых пакетов дает адекватные с волновой теорией результаты, несмотря на базирование на принципах геометрической теории.

Выводы по главе:

В данной главе были рассмотрены основные принципы преобразования ЛИ оптическими системами, позволяющие сделать следующие выводы:

1. разработаны методы расчета распределения поля и параметров лазерного пучка на выходе идеальной ЛОС;
2. существующие методы (расчетные и аналитические) позволяют описать искажение основной моды лазерного пучка с малыми искажениями выходного поля.

Глава 2

Правило *ABCD* для Гауссова пучка

Соотношения матричной оптики с большим успехом используются в описании свойств оптических систем и гауссовых пучков. Правило *ABCD*, введенное Когельником, позволяет просто и удобно сформулировать дифракционную теорию распространения гауссовых пучков в квазиоптическом приближении как в свободном пространстве, так и через системы идеальных линз. То есть задача распространения гауссовых пучков сводится к решенной задаче распространения лучей в геометрической оптике. В рамках матричной оптики полная матрица системы записывается в виде произведения матриц элементов, из которых данная система состоит, например, преломляющая или отражающая поверхности, пустой оптический промежуток, измеряемый вдоль оптической оси между двумя такими поверхностями. Используя такие матрицы, решаются (в квазиоптическом приближении) многочисленные задачи лазерной оптики: вычисление параметров резонаторов по заданным параметрам пучка на выходном зеркале; решение обратной задачи согласования оптических систем; расчет линзовых оптических волноводов, оптимальную фокусировку ЛИ на мишени и т.д.

Применение *ABCD* правила оправдано в случае многомодовых лазеров, так как радиус кривизны волнового фронта одинаков для всех мод резонатора и перетяжки всех мод такого пучка совпадают внутри резонатора и при внешней фокусировке [16].

При описании геометрического построения изображений матричным способом необходимо учитывать основные допущения геометрической оптики, а именно, во-первых, длину волны света считать пренебрежимо малой и, второе, распространение света описывается с помощью отдельных лучей.

В 1965 году Когельник в своей работе [19], в которой представлено важное обобщение метода, предлагает матрицу преобразования лучей использовать,

помимо описание геометрической оптики параксиальных лучей, в описании распространения лазерного пучка света с дифракционным углом расходимости.

2.1 Матрица преобразования луча

При описании прохождения параксиального луча через центрированную систему линз необходимо ввести систему декартовых координат: ось Oz , которая будет совпадать с оптической осью системы и с главным направлением, вдоль которого распространяются лучи света (слева направо), ось Oy , имеющая направление вверх и перпендикулярная ей ось Ox .

Так как луч проходит через различные оптические преломляющие поверхности системы, его траектория будет состоять из последовательности прямых линий. Каждая прямая определяется координатами одной принадлежащей ей точки и углом, который составляет данная прямая линия с осью Oz . Если плоскость $z = const$ (ОП), то луч определяется по отношению к ОП двумя параметрами: высотой, на которой данный луч пересекает ОП, углом, который он составляет с осью Oz . Угол α измеряется в радианах и является положительным, если он соответствует вращению против часовой стрелки от положительного направления оси z , к направлению распространения света вдоль луча (рисунок 3).

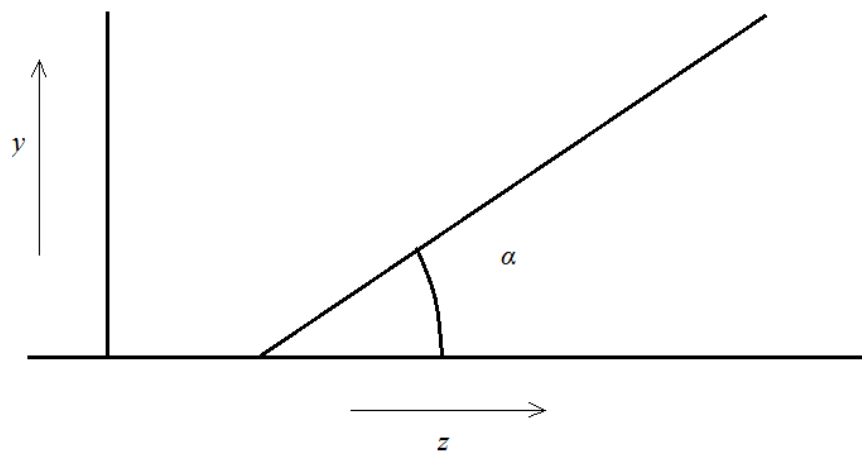


Рисунок 3 – Распространение луча в плоскости Ouz

В процессе расчета более удобным на каждом этапе выбирать новую ОП. То есть параметры луча непрерывно переносятся в одной ОП на другую, в зависимости от рассматриваемого элемента системы. Когда же необходим полный расчет системы в целом, то встает вопрос о полной матрице преобразования лучей, которая будет преобразовывать все необходимые параметры луча от выбранном входной ОП к выходной.

Для проведения расчетных действий удобнее заменить угол α соответствующим ему направляющим косинусом ($n \sin \alpha$), где n – показатель преломления среды, в которой распространяется луч. По закону Снеллиуса, оптический направляющий косинус (V) при пересечении поверхности двух оптически различных сред не изменяется.

Поэтому, для исследования поведения прохождения луча через систему преломляющих линз необходимо рассмотреть основные два процесса:

1. Перемещение между двумя преломляющими поверхностями – оптический промежуток. В данном случае луч проходит по прямой линии от одной преломляющей поверхности к другой. Эта область характеризуется толщиной t и показателем преломления n .

2. Преломление на граничной поверхности между двумя областями различными показателями преломления. Для определения величины отклонения прошедшего луча, достаточно знать величину радиуса кривизны преломляющей поверхности и два значения показателя преломления граничащих сред.

При прохождении луч пересекает сначала ОП₁ и имеет значения параметров y_1 и V_1 . Далее он проходит через оптический элемент и достигает ОП₂ с параметрами y_2 и V_2 . Задача сводится к составлению уравнения, которое устанавливает связь между величинами y_1 , V_1 и y_2 , V_2 , а также свойствами оптического элемента, расположенного между ОП₁ и ОП₂.

Уравнения для оптических элементов (преломляющая поверхность и оптический промежуток) являются линейными и записываются в матричной форме как:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

в котором определитель $(AD - BC) = 1$.

То есть каждому элементу ОС можно поставить свою унимодулярную матрицу преобразования лучей. Для получения общей матрицы преобразования лучей, которая описывает всю оптическую систему, необходимо перемножить в правильной последовательности все матрицы элементарных перемещений и преломлений, которые существуют в системе (матрица обхода). Такая система может быть представлена разнообразными конфигурациями, от простой тонкой линзы до сложной ОС.

2.2 Матрица перемещения луча T

На рисунке 4 приведен пример распространения луча, проходящего слева направо путь d между двумя опорными плоскостями. Угол σ , под которым распространяется луч не изменяется на всем протяжении перемещения, а расстояние по Oz меняется. Считается, что распространение при $d > 0$ – положительное.

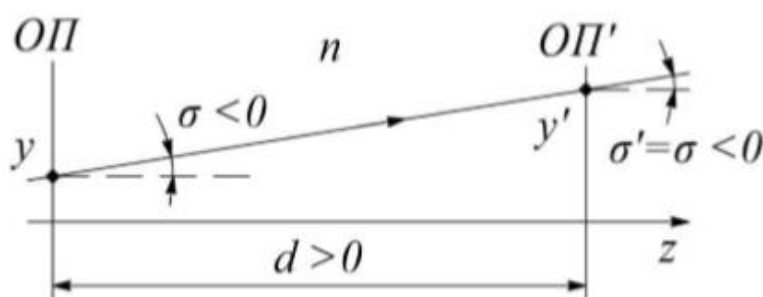


Рисунок 4 – Перемещение луча

Уравнение перемещения луча между плоскостями ОП и ОП':

$$y' = y + \left(\frac{d}{n} V_1\right), \quad (7)$$

где V_1 – оптический направляющий косинус, выражение $\frac{d}{n}$ – приведенная толщина оптического промежутка. Угол $\sigma = \sigma'$, следовательно:

$$V_2 = y_1 + (V_1). \quad (8)$$

Полученные уравнения в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} y' \\ v' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\delta d}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ v \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} y \\ v \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\delta d}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \text{матрица перемещения}$$

Преобразование (9) является справедливым как для положительно распространяющегося луча, так и в отрицательном.

2.3 Матрица преломления луча R

Для нахождения матрицы преломления необходимо рассмотреть распространение лучей на кривой поверхности, которая разделяет две области с показателями преломления n_1 и n_2 . На рисунке 5 приведена поверхность с положительным значением кривизны, причем показатель преломления $n > n'$.

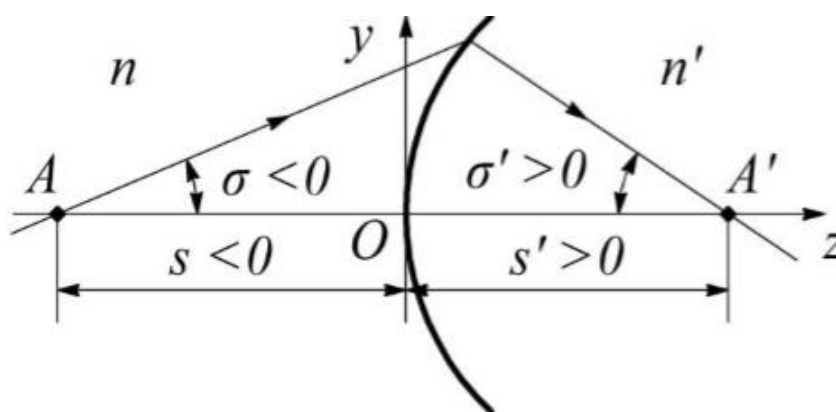


Рисунок 5 – Преломление луча

Учитывая закон Снеллиуса для данного случая преломления луча, матрица выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} A' \\ S' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ S \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $\Phi = \left(\frac{\delta' n' - \delta n}{r_0} \right)$ – оптическая сила преломляющей поверхности.

Данная матрица описывает преломление луча в других случаях, при перестановке граничащих сред, изменении знака кривизны поверхности, смены знаков величины A и S .

В случае прохождения луча через плоскую преломляющую поверхность, радиус кривизны которой R равен бесконечности, а как следствие, значение оптической силы равно нулю, определитель матрицы преломления принимает значение нуля.

2.4 Система поверхностей

Для оптической системы, состоящей из k сферических поверхностей (рисунок б) на основании полученных результатов можно записать матрицу M преобразования лучей между опорными плоскостями ОП₁ и ОП _{k} , проходящими через вершины крайних поверхностей:

$$M = R_k \cdot T_{k-1} \cdot R_{k-1} \cdot \dots \cdot T_1 \cdot R_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (11)$$

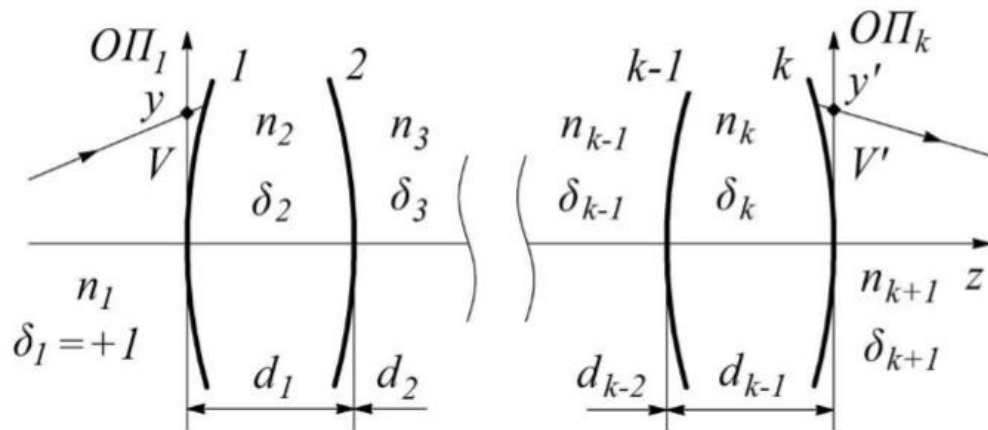


Рисунок б – Система поверхностей

и преобразование параметров луча:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Вывод по главе: применение принципов лучевых матриц позволяет быстро и просто решить задачу распределения светового луча, распространяющегося в различных средах, лучевые матрицы которых известны. А также закон $ABCD$ способствует определению правил преобразования гауссова пучка в произвольной линзовой системе.

Глава 3 Гауссов пучок в свободном пространстве

При описании и анализе оптических явлений используются плоские электромагнитные волны, так как они являются наиболее простым видом волн. У плоской волны формы фазовой поверхности и амплитуды неизменны в пространстве и во времени. Однако реальные световые пучки всегда ограничены в поперечных направлениях. У такого пучка дифракция приводит к постоянному изменению в пространстве амплитуды и к искривлению фазовой поверхности. Эти особенности пучка необходимо учитывать при описании его распространения [21].

3.1 Свойства одномодового Гауссова пучка электромагнитных волн

Световые пучки, сформированные резонатором, не относятся ни к плоской, ни к сферической видам волн. Поэтому необходимо рассмотреть монохроматическое волновое поле, которое имеет характер пучка и зависит от параметра перетяжки, выяснить некоторые свойства, важные для применения [22].

Распределение фазы поля вблизи выделенного направления, в данном случае оси Oz , имеет вид сферической волны. Амплитуда в плоскости $z = const$ характеризуется распределением Гаусса, а радиус распределения равен σ_0 .

Необходимо найти решение скалярного волнового уравнения в свободном пространстве:

$$\psi(x, y, z, t) = U(x, y, z, t) \cdot e^{i(kz - \omega t)}, \quad (13)$$

где $U(x, y, z, t)$ – амплитуда волны, зависящая от координат.

Расписывая (13) в параксиальном приближении по компонентам параболическое уравнение:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + 2ik \frac{U}{z} = 0, \quad (14)$$

где $|\vec{k}| = k = \omega/c = \text{const}$ – волновое число в вакууме, $k = \omega/c \cdot n = k \cdot n$ – в среде, z – переменная распространения, x, y – поперечные координаты.

Решая амплитудное уравнение (14), представляя сложную волну как суперпозицию плоских волны:

$$U(x, y, z,) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) \cdot e^{i(k_x x + k_y y + \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z)}, \quad (15)$$

где учтено, что $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \rightarrow k_z = k \sqrt{\left(1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}\right)}$, а $r^2 = x^2 + y^2$. В плоскости $z = 0$:

$$U(\vec{r}, 0,) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) \cdot e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x, k_y \quad (16)$$

распределение амплитуды задается как гауссово:

$$U(\vec{r}, 0,) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma_0^2}} = e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_0^2}} = \iint_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) \cdot e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x, k_y \quad (17)$$

Используя обратное преобразование Фурье амплитуда волны:

$$G(k_x, k_y,) = \frac{1}{(2\pi)^2} = \iint_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) \cdot e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x, k_y \rightarrow \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2} - ik_x x} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_0^2} - ik_y y} dy$$

$$\text{Обозначая } \alpha = \frac{1}{2\sigma_0^2}, \beta = k_x \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha x^2 + i\beta x} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{4\alpha}} - \text{табличный}$$

интеграл, тогда:

$$G(k_x, k_y) = \frac{\sigma_0^2}{2\pi} e^{-\frac{\sigma_0^2(k_x^2 + k_y^2)}{2}} \quad (18)$$

Таким образом, решение амплитудного уравнения (14) является описанием в полупространстве $z > 0$ поля, амплитуда которого в плоскости $z = 0$ определением распределения (17), тогда из (15) и (18) искомое уравнение принимает вид:

$$U(\vec{r}, z,) = \frac{\sigma_0^2}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\sigma_0^2(k_x^2)}{2} + ik_x x} e^{-\frac{\sigma_0^2(k_y^2)}{2} + ik_y y} e^{ikz \sqrt{1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}}} dk_x, k_y. \quad (19)$$

Интеграл (19) не выражается через элементарные функции, однако он вычисляется в хорошем приближении, если раскладывать входящий в него корень в ряд по степеням отношения:

$$\sqrt{1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2}} \cong 1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k^2} \quad (20)$$

При малых значениях ширины гауссова распределения l/σ_0 в пространстве волновых чисел, быстро убывают k_x^2 и k_y^2 , гауссовы множители нарезают высокие пространственные частоты, делая их взнос в значение интеграла меньше с увеличением σ_0 . Таким образом, для получения хорошего приближения достаточно ограничиться в (20) только квадратичными членами, тогда:

$$U(\vec{r}, z,) = \frac{\sigma_0^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\sigma_0^2(k)}{2} k_x^2 + i k_x x} dk_x \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\sigma_0^2(k) + iz}{2} k_y^2 + i k_y y} dk_y \quad (21)$$

или из табличного интеграла $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha x^2 \pm i\beta x} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{4\alpha}}$ →

$$U(r, z,) = \frac{l_0}{l_0 + iz} e^{-\frac{kr^2}{2(l_0 + iz)}}, \quad (22)$$

где $l_0 = \sigma_0 k$.

Выражая $l_0 + iz = \sqrt{l_0^2 + z^2} \cdot e^{i \arctg \frac{z}{l_0}}$ и подставляя в (22):

$$U(r, z,) = \frac{l_0}{l_0 + iz} e^{-\frac{kr^2}{2(l_0 + iz)}} e^{-i \arctg \frac{z}{l_0}} \quad (23)$$

Учитывая, что $l_0 = k\sigma_0$ и $\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}}$ уравнение (23) принимает вид:

$$U(r, z,) = \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + z^2}} e^{-\frac{kr^2 z}{2(l_0 + iz)}} e^{-i \arctg \frac{z}{l_0}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (24)$$

Тогда, решением скалярного волнового уравнения в свободном пространстве (13) будет иметь решение:

$$\begin{aligned} \Psi(x, y, z, t) \cdot e^{i(kz - \omega t)} &= \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + z^2}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} e^{i\left[\left(kz + \frac{kr^2 z}{2(l_0^2 + z^2)}\right) - \arctg \frac{z}{l_0} - \omega t\right]} = \\ &= \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + z^2}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} e^{i\left[\left(1 + \frac{r^2}{2(l_0^2 + z^2)}\right)kz - \arctg \frac{z}{l_0} - \omega t\right]} \end{aligned} \quad (25)$$

Обозначая $n = 1 + \frac{r^2}{2(l_0^2 + z^2)}$ и подставляя в (25):

$$\Psi = \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + z^2}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} e^{i\left[(nkz - \omega t) - \arctg \frac{z}{l_0}\right]}, \quad (26)$$

где $A = \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + z^2}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$ – амплитуда волны.

Интенсивность пучка пропорциональна квадрату амплитуды: $I \sim A^2$, при коэффициенте пропорциональности равном единице:

$$I = A^2 = \frac{l_0^2}{l_0^2 + z^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (27)$$

Если предположить, что:

1. $r = 0 \rightarrow I = \frac{l_0^2}{l_0^2 + z^2}$, если

- $z^2 \ll l_0^2 \rightarrow I \cong \frac{l_0^2}{l_0^2} \approx 1$ – интенсивность на оси постоянна;
- $z = l_0 \rightarrow I = \frac{1}{2}$ – интенсивность на оси уменьшится в 2 раза;
- $z^2 \gg l_0^2 \rightarrow I \cong \frac{l_0^2}{z^2}$ – интенсивность на оси изменяется как у сферической волны.

2. $r \neq 0, z = 0 \rightarrow I = e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}}$ – изменяется по Гауссу.

- $z = 0, \sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}} = \sigma_0$, тогда интенсивность $I = e^{-\frac{r^2}{\sigma_0^2}}$
- $r = \sigma_0 \rightarrow I = e^{-1}$ – интенсивность уменьшается в e раз. $r = \sigma_0$ – радиус перетяжки.

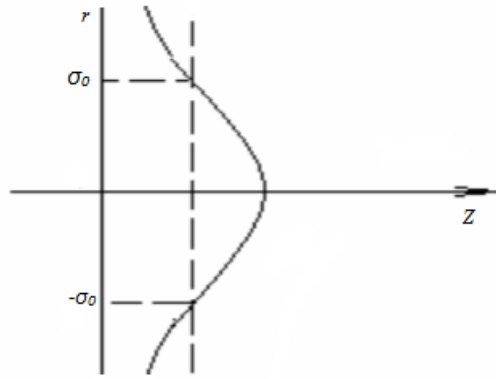


Рисунок 7 – радиус перетяжки

$$3. \quad r \neq 0, \quad z \neq 0 \rightarrow I = \frac{l_0^2}{l_0^2 + z^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}},$$

- $r = z \rightarrow I = \frac{l_0^2}{l_0^2 + z^2} e^{-1}$ – интенсивность на расстоянии $r = \sigma$ от оси уменьшается в e раз по сравнению с интенсивностью на оси в сечении $z = const$.

То есть интенсивность пучка на оси определяется множителем $\frac{l_0^2}{l_0^2 + z^2}$, поверхность $z^2 = \sigma^2$ определяет поверхность, на которой интенсивность в сечении $z = const$ в e раз меньше интенсивности на оси в том же сечении, тогда радиус пучка в сечении $z = const$ по уровню интенсивности e^{-1} :

$$r = \sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}} \quad (28)$$

Если выражение (28) возвести в квадрат:

$$r^2 = \sigma^2 = \sigma_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{l_0^2}\right) \rightarrow \frac{r^2}{\sigma_0^2} - \frac{z^2}{l_0^2} = 1 - \quad \text{уравнение} \quad \text{однополостного}$$

гиперboloида.

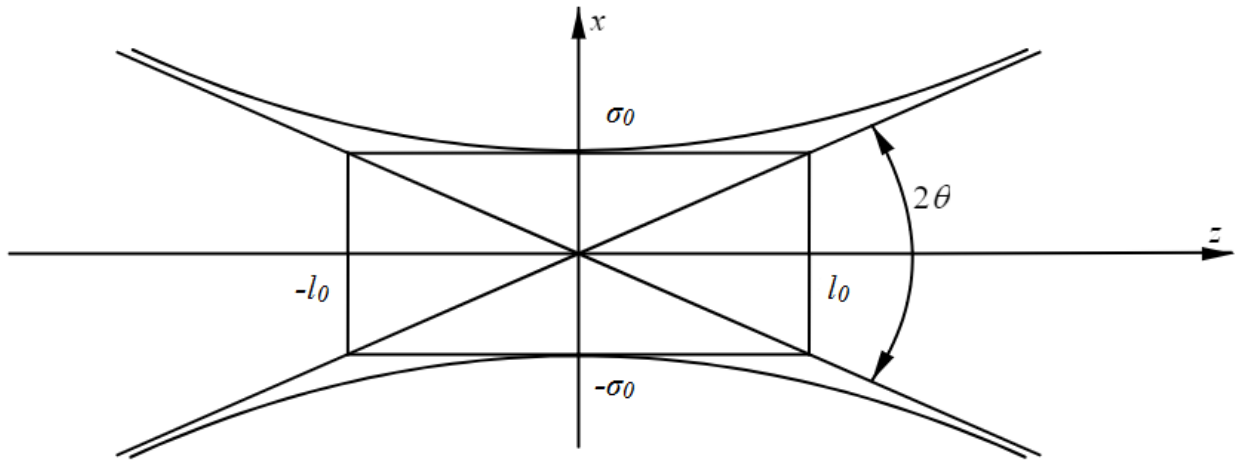


Рисунок 8 – Однополостный гиперboloид

(σ_0 –перетяжка пучка, l_0 – половина расстояния между зеркалами
конфокального резонатора θ –угол наклона асимптоты)

Угол наклона асимптоты: $tg\theta = \frac{\sigma_0}{k\sigma_0^2} = \frac{\lambda}{2\pi\sigma_0} = \frac{\lambda}{\sigma_0}, \lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$.

Угол наклона касательной в произвольной точке в сечении $z = const$:

$$tg\alpha = \frac{dr}{dz} = \frac{d\sigma}{dz} = \frac{d}{dz} \left[\sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}} \right] =$$

$$= \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} \frac{2z/l_0^2}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}}} = \frac{\sigma_0 z}{l_0^2 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}}}$$

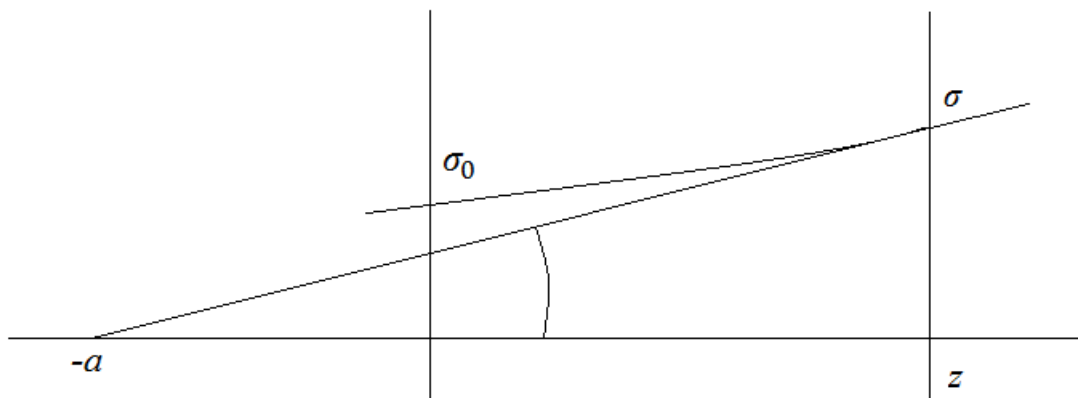


Рисунок 9 – Меридиональное сечение пучка

(σ_0 – перетяжка пучка, a –точка пересечения касательной с осью Z)

Точка пересечения касательной с осью Oz :

$$\sigma = (z - a)tg\alpha, \rightarrow$$

$$a = z - \frac{tg\alpha}{\sigma} = z - \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}} \cdot \frac{l_0^2 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}}}{\sigma_0 z} = -\frac{l_0^2}{z} \quad (29)$$

Радиус кривизны фронта в сечении $z = const$.

$$R = z + \frac{l_0^2}{z} \quad (30)$$

Согласно выражению (30) в каждой точке z фронт пука можно рассматривать как сферический с центром в точке $-\frac{l_0^2}{z}$. Если:

- $z = 0 \rightarrow R = 0 + \frac{l_0^2}{z} = \infty$ – фронт волны плоский;
- $z \rightarrow \infty \rightarrow R = z$ – радиус увеличивается, вблизи оси фронт также плоский;
- $z = \pm l_0 \rightarrow R = \pm 2l_0$ – максимальная кривизна. При помещении зеркал в этих точках с данной кривизной получается конфокальный резонатор, $z = \pm l_0$ – точки максимальной кривизны фронта.

Таким образом, для полного задания всех характеристик монохроматического гауссова пучка с длиной волны λ достаточно знать один параметр, половину расстояния между зеркалами конфокального резонатора лазера l_0 , тогда:

- $\sigma_0 = \sqrt{\lambda l_0}$, где $\lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$;
- $\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{l_0^2}}$;
- $R = z + \frac{l_0^2}{z}$
- $tg\theta = \frac{\lambda}{\sigma_0}$;
- $tg\alpha = \frac{z}{l_0}$.

3.2 Расчет хода Гауссова пучка через оптическую систему

Падающий пучок характеризуется параметрами l_0 и расстоянием z от перетяжки до линзы.

Так как $\lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$, $l_0 = k\sigma_0^2$, отсюда следует, что

$$\sigma_0^2 = \frac{l_0}{k} = \frac{l_0}{2\pi} \lambda = \lambda l_0 \quad (31)$$

Радиус сечения падающего пучка в плоскости линзы:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{l_0^2}\right) = \lambda l_0 \left(1 + \frac{z^2}{l_0^2}\right). \quad (32)$$

Радиус кривизны падающего сферического фронта в плоскости линзы:

$$R = z + \frac{l_0^2}{z}. \quad (33)$$

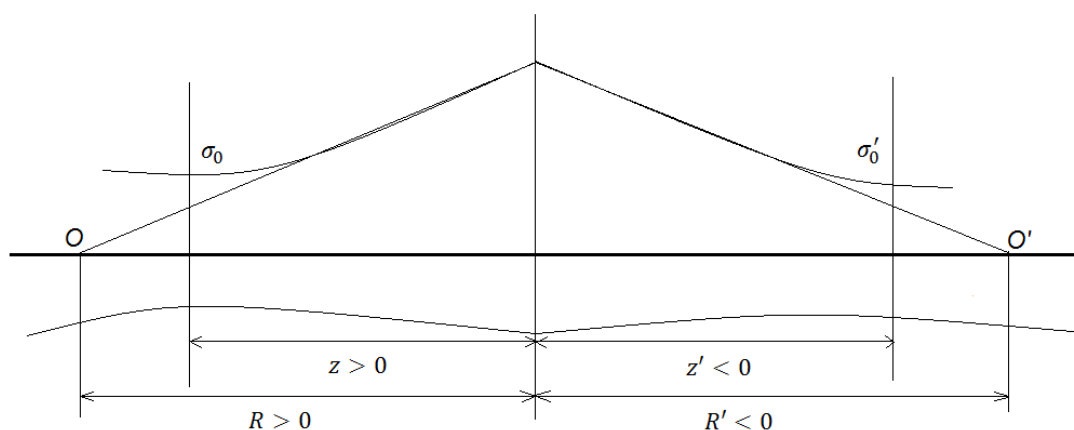


Рисунок 10 – Ход гауссова пучка через тонкую линзу

(σ_0 – перетяжка пучка, O – центр сферического фронта с радиусом R , σ' – радиус сечения преломленного пучка в плоскости линзы, R' – радиус кривизны сферического фронта преломленного пучка в плоскости линзы, O' – центр кривизны сферического фронта с радиусом R').

С точки зрения параксиальной оптики точку O' является изображением точки O , тогда, согласно формуле отрезков и с учетом правила знаков:

$$-\frac{1}{R'} - \frac{1}{-R} = \frac{1}{f'} \rightarrow R' = \frac{f'R}{f'-R} \quad (34)$$

Для преломленного пучка:

$$\sigma'^2 = \sigma^2 = \sigma_0'^2 \left(1 + \frac{z'^2}{l_0'^2}\right) = \lambda l_0' \cdot \frac{l_0'^2 + z'^2}{l_0'^2} = \lambda \frac{l_0'^2 + z'^2}{l_0'} \rightarrow l_0'^2 + z'^2 = \frac{l_0'}{\lambda} \sigma^2 \quad (35)$$

подставляя в (33)

$$R' = z' + \frac{l_0'^2}{z'} = \frac{z'^2 + l_0'^2}{z'} = \frac{l_0'}{z'} \cdot \frac{\sigma^2}{\lambda}, \quad (36)$$

Из (36) $\frac{l_0'}{z'} = \frac{\lambda R'}{\sigma^2}$, подставляя в выражение (36):

$$R' = z' \left(1 + \frac{l_0'^2}{z'^2}\right) = z' \left[1 + \left(\frac{\lambda R'}{\sigma^2}\right)^2\right], \quad (37)$$

отсюда:

$$\bullet \quad z' = \frac{R'}{1 + \left(\frac{\lambda R'}{\sigma^2}\right)^2} \quad (38)$$

$$\bullet \quad l_0' = z' \frac{\lambda R'}{\sigma^2} = \frac{\frac{\lambda R'^2}{\sigma^2}}{1 + \left(\frac{\lambda R'}{\sigma^2}\right)^2} \quad (39)$$

$$\bullet \quad \sigma_0'^2 = \lambda l_0', \quad \text{tg} \theta' = \frac{\lambda}{\sigma_0'}, \quad z = f'. \quad (40)$$

Из (32) следует, что

$$\sigma^2 = \lambda l_0 \left(1 + \frac{f'^2}{l_0^2}\right) = \lambda l_0 \left(\frac{l_0^2 + f'^2}{l_0^2}\right) = \lambda \frac{l_0^2 + f'^2}{l_0} \quad (41)$$

Так как $R = f' + \frac{l_0^2}{f'} = \frac{f'^2 + l_0^2}{f'}$, тогда выражение (34) примет вид:

$$R' = \frac{f' R}{f' - R} = \frac{\frac{f'^2 + l_0^2}{f'} f'}{f' - \frac{f'^2 + l_0^2}{f'}} = -\frac{f'^2 + l_0^2}{l_0^2} f' \rightarrow z' = -f'.$$

Вывод по главе:

В данной главе находилось решение волнового уравнения в диффузионном приближении, описывающее монохроматическое волновое поле, имеющее характер пучка и зависящего от параметра σ . Были выяснены основные его свойства, важные для применения. Было рассмотрено преобразование пучка при прохождении через тонкую линзу.

Глава 4 Результаты проведенного исследования

В соответствии с вычислениями, представленными в главе 4, необходимо в программе *Mathcad* смоделировать ход гауссова пучка через систему поверхностей. Применяя матричный аппарат, существенно упрощающего расчеты распределения светового луча, находятся параксиальные характеристики системы; параметры падающего и прошедшего пучка.

Оптическая система, используемая в качестве примера в работе, состоит из двух линз с равными радиусами сферических поверхностей.

В приложении А представлен алгоритм расчета гауссова пучка.

4.1 Анализ параметров прошедшего пучка

В таблице 1 представлены значения зависимости параметров расстояние от перетяжки прошедшего пучка до последней поверхности z'_k от расстояния от перетяжки падающего пучка до первой поверхности z_1 .

Таблица 1– Зависимость параметров гауссова пучка $z'_k(z_1)$

№	Расстояние от перетяжки падающего пучка до 1-ой пов-ти z_1	Расстояние от перетяжки прошедшего пучка до последней пов-ти z'_k
1.	100	-56,166
2.	$s'f'$	-42,886
3.	$s'f' + f'$	-55,922
4.	$s'f' + 2f'$	-58,198
5.	$s'f' + 3f'$	-56,47
6.	$s'f' + 4f'$	-54,408
7.	$s'f' + 5f'$	-52,698
8.	$s'f' + 6f'$	-51,36
9.	$s'f' + 7f'$	-50,312
10.	$s'f' + 8f'$	-49,479

11.	$s'f' + 9f'$	-48,806
12.	$s'f' + 10f'$	-48,254
13.	$s'f' + 11f'$	-47,792
14.	$s'f' + 12f'$	-47,402
15.	$s'f' + 13f'$	-47,068

На рисунке 11 представлен график зависимости: $z'_k(z_1)$

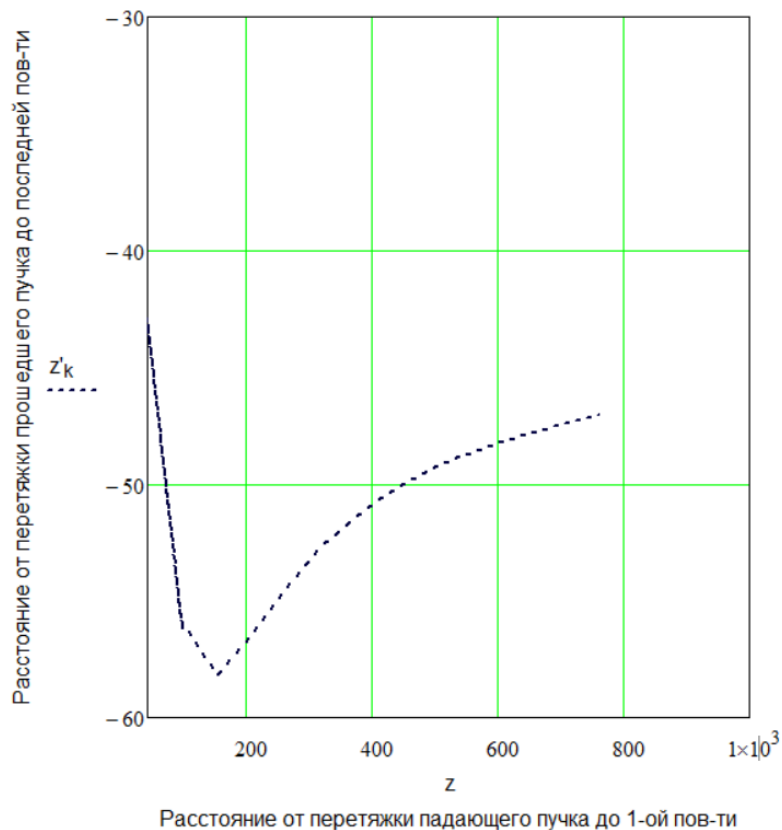


Рисунок 11 – Зависимость параметров гауссова пучка $z'_k(z_1)$

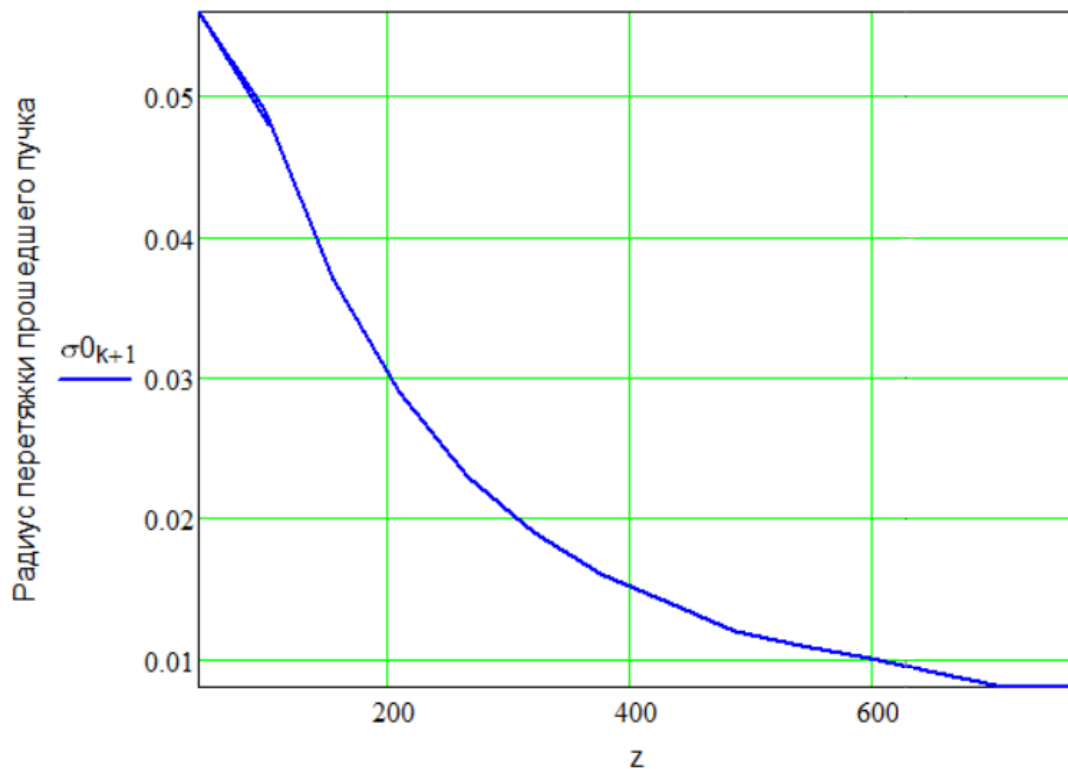
В таблице 2 представлены значения зависимости параметров радиуса перетяжки прошедшего пучка σ_{k+1} от расстояния от перетяжки падающего пучка до первой поверхности z_1 .

Таблица 2– Зависимость параметров гауссова пучка $\sigma_{k+1}(z_1)$

№	Расстояние от перетяжки падающего пучка до 1-ой пов-ти z_1	Радиус перетяжки прошедшего пучка σ_{k+1}
1.	100	0,048

2.	$s'f'$	0,056
3.	$s'f' + f'$	0,049
4.	$s'f' + 2f'$	0,037
5.	$s'f' + 3f'$	0,029
6.	$s'f' + 4f'$	0,023
7.	$s'f' + 5f'$	0,019
8.	$s'f' + 6f'$	0,016
9.	$s'f' + 7f'$	0,014
10.	$s'f' + 8f'$	0,012
11.	$s'f' + 9f'$	0,011
12.	$s'f' + 10f'$	0,01
13.	$s'f' + 11f'$	0,009
14.	$s'f' + 12f'$	0,008
15.	$s'f' + 13f'$	0,008

На рисунке 12 представлен график зависимости: $\sigma_{k+1}(z_1)$



Расстояние от перетяжки падающего пучка до 1-ой поверхности

Рисунок 12 – Зависимость параметров гауссова пучка $\sigma_{k+1}(z_1)$

В таблице 3 представлены значения зависимости параметров радиуса прошедшего пучка в заданной плоскости наблюдения σ_{k+1} от расстояния от перетяжки падающего пучка до первой поверхности z_1 .

Таблица 3– Зависимость параметров гауссова пучка $\sigma_{k+1}(z_1)$

№	Расстояние от перетяжки падающего пучка до 1-ой пов-ти z_1	Радиус прошедшего пучка в заданной плоскости наблюдения σ_{k+1}
1.	100	1,963
2.	$s'f'$	1,728
3.	$s'f' + f'$	1,949
4.	$s'f' + 2f'$	2,541
5.	$s'f' + 3f'$	3,31
6.	$s'f' + 4f'$	4,159
7.	$s'f' + 5f'$	5,047
8.	$s'f' + 6f'$	5,958
9.	$s'f' + 7f'$	6,882

10.	$s'f' + 8f'$	7,815
11.	$s'f' + 9f'$	8,754
12.	$s'f' + 10f'$	9,696
13.	$s'f' + 11f'$	10,642
14.	$s'f' + 12f'$	11,59
15.	$s'f' + 13f'$	12,54

На рисунке 13 представлен график зависимости: $\sigma_{k+1}(z_1)$

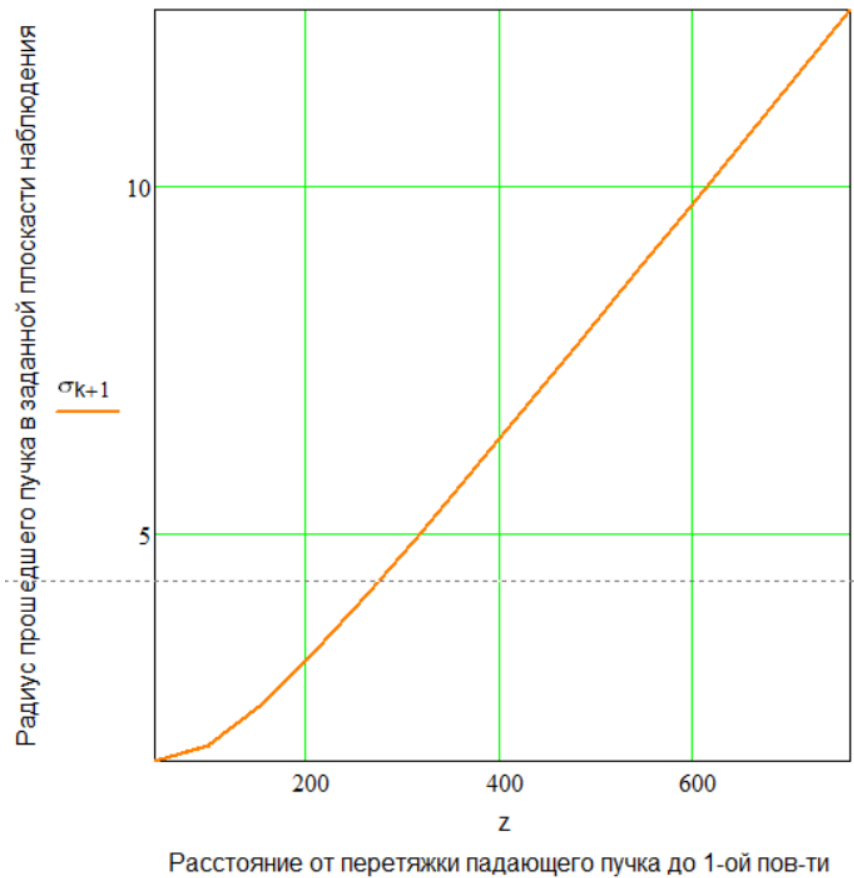


Рисунок 13 – Зависимость параметров гауссова пучка

В таблице 3 представлены значения зависимости параметров расходимости прошедшего пучка $\theta_{k+1}(z_1)$ от расстояния от перетяжки падающего пучка до первой поверхности z_1 .

Таблица 4– Зависимость параметров гауссова пучка $\theta_{k+1}(z_1)$

№	Расстояние от перетяжки падающего пучка до 1-ой пов-ти z_1	Расходимость прошедшего пучка θ_{k+1}
1.	100	7,148
2.	$s'f'$	6,203
3.	$s'f' + f'$	7,096
4.	$s'f' + 2f'$	9,274
5.	$s'f' + 3f'$	12,059
6.	$s'f' + 4f'$	15,119
7.	$s'f' + 5f'$	18,317
8.	$s'f' + 6f'$	21,592
9.	$s'f' + 7f'$	24,913
10.	$s'f' + 8f'$	28,264
11.	$s'f' + 9f'$	31,636
12.	$s'f' + 10f'$	35,022
13.	$s'f' + 11f'$	38,419
14.	$s'f' + 12f'$	41,824
15.	$s'f' + 13f'$	45,235

На рисунке 13 представлен график зависимости: $\theta_{k+1}(z_1)$

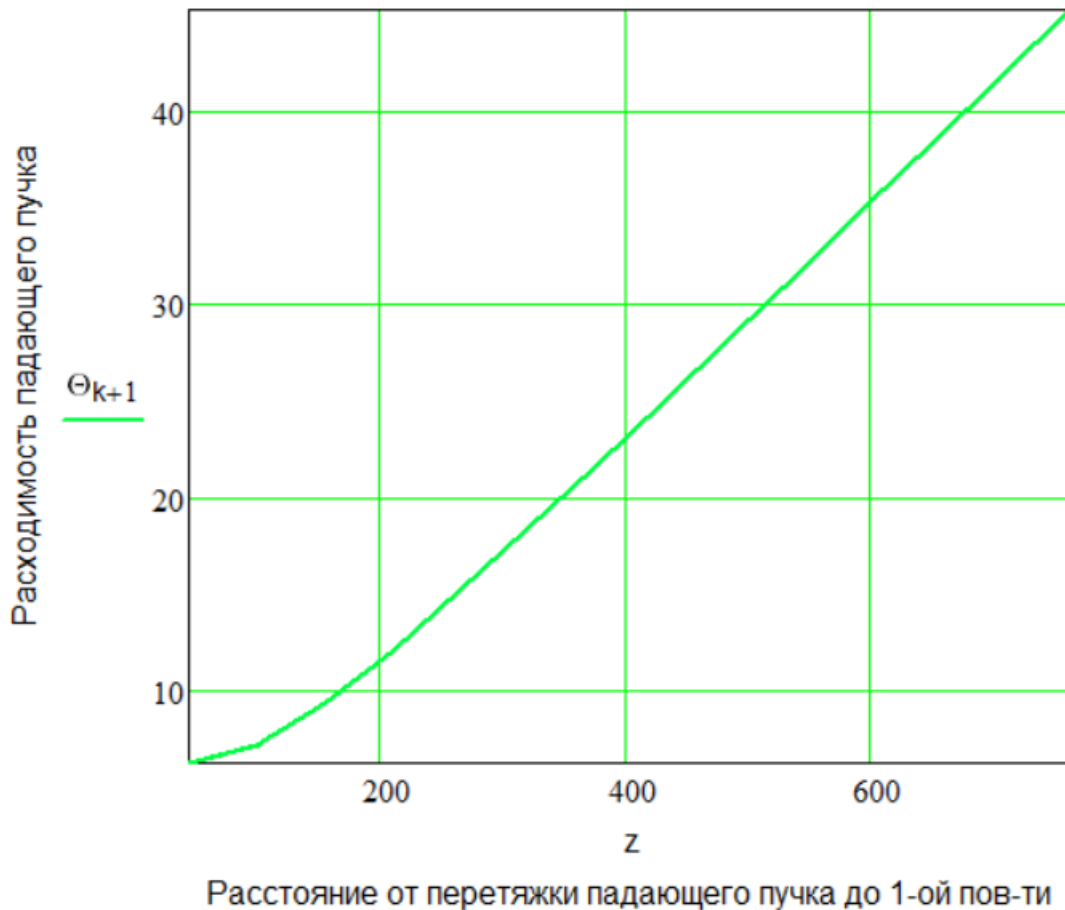


Рисунок 14 – Зависимость параметров гауссова пучка θ_{k+1}

Вывод по главе: в зависимости от расстояния перетяжки падающего пучка до первой поверхности вычислены значения таких характеристик как:

- радиус перетяжки прошедшего пучка;
- расстояние от перетяжки прошедшего пучка до последней поверхности;
- радиус пучка в заданной плоскости наблюдения;
- расходимость прошедшего пучка.

Преобразование параметров гауссового пучка описывается формулами лазерной оптики, поэтому перетяжку преобразуемого пучка, имеющую плоский фронт и гауссово распределение амплитуды, нельзя рассматривать как предмет для оптической системы. В классической оптике, если предмет расположен в передней фокальной плоскости его изображение находится в бесконечности, а в лазерной оптике при расположении перетяжки входного пучка в передней фокальной плоскости, перетяжка выходного пучка будет расположена в задней фокальной плоскости (табл. 1, рис.11).

Радиус перетяжки прошедшего пучка с увеличением расстояния z_1 уменьшается (рис.12). Радиус прошедшего пучка в заданной плоскости и расходимость падающего пучка (рис. 13, 14) с увеличением z_1 растет.

Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию свойств прохождения гауссова пучка через систему оптических поверхностей. Работа заключается в математическом моделировании в программе *Mathcad* процесса прохождения пучка и вычисления его характеристик.

Появление лазеров способствовало становлению и интенсивному развитию новых научных направлений. Одним из этих направлений является лазерная оптика — раздел оптики, изучающий вопросы формирования лазерного излучения оптическими резонаторами и преобразования его оптическими системами, а также вопросы синтеза таких систем, обеспечивающих формирование лазерного пучка с требуемыми параметрами. В настоящее время это направление вполне сформировалось и продолжает развиваться, способствуя улучшению характеристик лазеров и расширению областей их применения.

Данный раздел ВКР содержит оценку коммерческого потенциала разработки алгоритма математического расчета, анализ потенциальных потребителей и конкурентных решений. Рассмотрены перспективы и альтернативы проекта, отвечающего современным требованиям ресурсоэффективности и ресурсосбережения, планирования работ, определения ресурсной (ресурсосберегающей) и финансовой эффективности проекта.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями проекта могут являться университеты, научные лаборатории. Заказчиком от школы ИШНПТ НИ ТПУ выступает преподаватель отделения материаловедения для дальнейшего внедрения в комплекс лабораторных по дисциплине «Прикладная оптика».

Ниже представлена диаграмма сегментирования рынка потребителей в зависимости от статуса пользователя. Потребитель здесь может выступать как студент, инженер исследователь в научной лаборатории, преподаватель учебного заведения.

Диаграмма сегментирования рынка услуг

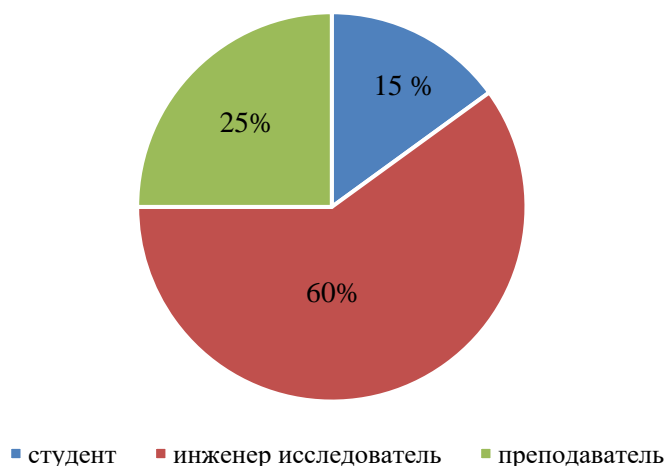


Рисунок 15 – Диаграмма сегментирования рынка услуг в зависимости от статуса потребителя

Для обоснования эффективного внедрения разработки ниже приведена таблица, отображающая динамику использования продукта.

Таблица 5 – Карта сегментирования

Динамика использования	Студент	Преподаватель	Инженер - исследователь
Максимальная			
Минимальная			
Разовая			

Таким образом, из карты сегментирования следует, что основным потребителем на рынке выступает инженер - исследователь. Поэтому, будет целесообразнее, выбрать в качестве основного сегмента продажи научные институты и лаборатории.

5.2. SWOT-анализ

SWOT — представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. **SWOT**-анализ применяют для исследования

внешней и внутренней среды проекта. Для того что бы найти сильные и слабые стороны, разрабатываемого проекта, проведем *SWOT*–анализ в табл. 6.

Таблица 6 – Итоговая матрица *SWOT*- анализа

	<p>Сильные стороны проекта (С):</p> <p>С1. Экономичность и энергоэффективность разработки;</p> <p>С2. Актуальность проекта;</p> <p>С3. Продолжительный срок службы;</p> <p>С4.Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны проекта (СЛ):</p> <p>СЛ1.Направленность разработки под конкретную оптическую систему;</p> <p>СЛ2. Обязательное наличие на ЭВМ программы <i>Mathcad</i> версии, не позднее использованной в разработке;</p> <p>СЛ3. Вероятность появления новых методик;</p> <p>СЛ4. Использование в основе разработке сложного математического аппарата, затрудняющего понимание некоторых физических принципов.</p>
<p>Возможности (В):</p> <p>В1. Внедрения в учреждения высшего образования</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на разработку;</p> <p>В3. Расширение перечня функций разработки;</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>Математическая модель позволяет исследователю оптимально быстро проанализировать результаты расчета преобразования пучка оптическими системами, что позволяет сэкономить время, ресурсы, расходы. Внедрение в научные лаборатории способствует появлению дополнительного спроса на разработку, так как она</p>	<p>Необходимость анализа дополнительной оптической системы способствует возможности расширения функций разработки, то есть увеличению вариаций алгоритма программы, и, как следствие, повышения спроса на нее.</p>

	дает исследователю возможность предварительного анализа.	
Угрозы (У): У1. Усовершенствование имеющихся или появление новых методов исследования; У2. Отсутствие спроса на разработку; У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации разработки; У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования	Кризисная ситуация в стране - это вероятность отсутствие спроса на разработку. Продолжительный срок службы может способствовать переизбытку рынка.	Актуальность темы может привести к появлению новых методик исследования и к усовершенствованию старых.

Рассматриваемый метод исследования имеет достаточно большие перспективы развития. Актуальность проекта, продолжительный срок службы, внедрения разработки в учреждения высшего образования, а также научные центры и лаборатории, подтверждают конкурентоспособность проекта и необходимость дальнейшего анализа возможностей разработки. Наиболее важной слабой стороной проекта является внедрение новых методик расчета. Поэтому необходимо усовершенствовать методику расчета гауссова пучка, увеличивать возможности программного алгоритма.

5. 3 Планирование комплекса работ по проекту

5.3.1 Планирование перечня работ

В данном пункте описывается полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Для выполнения проекта формируется группа, в состав которой входят инженер-светотехник и руководитель проекта (таблица — 7).

Таблица 7 — Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Составление технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Моделирование и расчёт параметров гауссова пучка	2	Создание алгоритма расчета в программе <i>Mathcad</i>	Инженер-исследователь
	3	Выполнение расчетов в программе согласно исходным данным	
Обобщение и оценка результатов	4	Анализ полученных результатов и выводы	Руководитель проекта, инженер-исследователь
Составление отчета	5	Оформление отчёта по проекту	Инженер-исследователь
Утверждение проекта	6	Сдача проекта заказчику	Руководитель проекта, инженер-исследователь

5.3.2 Определение трудоёмкости работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости проектирования, поэтому важным моментом является определение трудоёмкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ — ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ — минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ — максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 5.6 работ требуются специалисты:

- Инженер-исследователь (И);
- Руководитель проекта (Р).

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} — продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ — ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ — численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.4 Разработка графика выполнения проекта

В качестве графика можно использовать диаграмму Ганта — горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для построения графика длительность каждого из этапов работ устанавливается в рабочих днях






Данные для построения графика представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Временные показатели проведения научного исследования

Номер этапа	Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $t_{\text{раб}}$
		t_{min} , чел.-дни	t_{max} , чел.-дни	$t_{\text{ожн}}$, раб. дни		
1	Составление технического задания	2	3	2,4	Р	3
2	Моделирование и расчёт параметров гауссова пучка	13	18	15	И	15
3	Обобщение и оценка результатов	7	9	7,8	И, Р	8
4	Составление отчета	9	10	7,4	И	8
5	Утверждение проекта	2	4	2,8	И, Р	3
Итого:						37

По результатам расчетов строится диаграмма Ганта, (таблица 9).

Таблица 9 – Диаграмма Ганта

Номер этапа	Этап работы	Испол нител и	Т _{к,р} аб.дн	Продолжительность выполнения работ									
				Май				Июнь					
				7	14	21	28	7	14	21	28		
1	Составлен ие техническ ого задания	Р	3										
2	Моделиро вание и расчет параметро в освещенн ости	И	15										
3	Обобщени е и оценка результат ов	Р	8										
		И											
4	Составлен ие отчета	И	8										
5	Утвержде ние проекта	Р	3										
		И											

Примечание: И- инженер-исследователь, Р- руководитель проекта

5.5 Бюджет проекта

При планировании бюджета проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

В процессе формирования бюджета проекта используется следующая группировка затрат по статьям:

- аренда офисного помещения;
- затраты на электроэнергию;

- лицензия на программу;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

5.5.1 Расчет материальных затрат проекта

Данная статья включает стоимость всех материалов и ресурсов, используемых при разработке проекта:

- офисные расходы: аренда помещения, канцелярия, электроэнергия, средства связи, интернет;
- лицензия программы;

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}$$

где m — количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении проекта;

$N_{расхи}$ — количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i — цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками). Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов

материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки не потребовались.

Офисные затраты (аренда+канцелярия+интернет) = 20 000 руб.

Стоимость локальной лицензии *Mathcad* на год составляет 40282 руб.

5.5.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Величина расходов на заработную плату определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Расчет полной заработной платы осуществляется следующим образом:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата; $Z_{доп}$ — дополнительная заработная плата (12-15 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) исполнителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата одного работника;

T_p — продолжительность работ, выполняемых работником, раб. д.

$Z_{дн}$ — среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_{тс} + Z_{допл} + Z_{рк}}{F_d},$$

где F_d — количество рабочих дней в месяце (26 при шести дневной рабочей неделе, 22 при пяти дневной рабочей неделе), раб. д.;

$Z_{тс}$ — заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$Z_{допл}$ — доплаты и надбавки, руб.;

$Z_{рк}$ — районная доплата (30%), руб.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 10.

Таблица 10 — Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$Z_{допл}^*$, руб.	$Z_{рк}$, руб.	$Z_{м}$, руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р}$, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	25 000	3 000	8400	36 400	1 400	9	12 600
Инженер	25 000	3000	8400	36 400	1 400	27	37 800
Итого $Z_{осн}$, руб.							50 400

*Расчет дополнительной заработной платы, размер которой составляет 12 – 15% от основной, представлен в таблице 11.

Таблица 11 — Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{доп}$	$Z_{тс}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.
Руководитель	0,15	25 000	3 750
Инженер	0,15	25 000	3 750
Итого, руб.		50 000	7 500

5.5.3 Отчисления во внебюджетные фонды

В данном пункте отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда и медицинского страхования от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ — коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На основании закона пп.1 ч1. Ст. 5 №212-ФЗ для организаций и ИП на УСН в 2014 году ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды — 30%.

Таким образом, отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot 132\,285 = 39\,685,5 \text{ руб.}$$

5.5.4 Накладные расходы

В статью накладных расходов вошла стоимость печати, а также затраты на электроэнергию.

1. Стоимость одной печатной страницы установилась на уровне 1,5 рублей, всего сделано 200 страниц печати. Тогда расходы на печать и ксерокопирование составят:

$$П = 1,5 \cdot 200 = 300 \text{ рублей}$$

2. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = Ц \cdot N \cdot n \cdot t_{зан.ч.},$$

где Ц — стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, р.;

N — мощность оборудования, кВт;

n — количество единиц оборудования одного вида, ед.;

$t_{зан.ч.}$ — время занятости оборудования, ч.;

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 12.

Таблица 12— Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Ц, р.	N, кВт	n	$t_{зан.ч.}$, ч.	Э, руб.
Компьютер (ПК)	3,4	0,4	1	1000	1360

Сумма накладных расходов составила: $300 + 1360 = 1\,660$ р.

5.6 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта.

Таблица 13 – план управления коммуникациями проекта

№	Передача информации	Источник	Адресат	Когда
1.	Предоставление проектной	Руководитель проекта	Инженер-исследователь	После получения ТЗ от заказчика

	документации для анализа: Определение содержания и рамок проекта; Базовое расписание			
2.	Анализ и выработка рекомендаций о степени детализации Определение базовых показателей хода исполнения проекта	Инженер-исследователь	Руководитель проекта	После анализа
3.	Предоставление проектной документации для анализа	Руководитель проекта	Инженер-исследователь	После завершения предварительного планирования; после получения задания на детализацию
4.	Анализ и коррекция документов	Инженер-исследователь	Руководитель проекта	После предоставления документов; контрольные точки
5.	Предоставление плана проекта	Руководитель проекта	Инженер-исследователь	После согласования с инженером
6.	Предоставление календарного отчета о ходе исполнения проекта (еженедельный отчет исполнителя): Поставленные задачи и ход исполнения Прохождение контрольных точек	Инженер-исследователь	Руководитель проекта	Один раз в неделю
7.	Предоставление отчета о ходе исполнения проекта: 1.Результаты деятельности за отрезок: - выполнение задач; -достижение результата 2.Последовательность работ: -соблюдение последовательности 3.Выполненные работы: -процент выполнения	Руководитель проекта	Заказчик	Один раз в неделю, за три дня до контрольной точки
8.	Предоставление отчета по проекту: Завершенный проект	Инженер-исследователь	Заказчик	За неделю до установленных сроков

		Руководитель проекта		
9.	Анализ и замечания по проекту	Заказчик	Инженер-исследователь Руководитель проекта	После получения отчета
10.	Коррекция проекта и оформление итоговой документации	Инженер-исследователь	Руководитель проекта	После анализа
11.	Сдача проекта	Руководитель проекта	Заказчик	За день до установленных сроков

5.6.1 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 14 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Низкое качество оборудования	На качество	3	4	Высокий	Поиск поставщика качественного оборудования	Плохой мониторинг рынка, ненадежный поставщик
2	Нарушение сроков сдачи проектов	На расписание	2	2	Низкий	Увеличение сроков сдачи проекта, согласование сроков с заказчиками	Недооценка времени выполнения проекта, Выход из строя рабочего оборудования
3	Превышение стоимости реализации проекта	На стоимость	2	4	Средний	Согласование переоценки с заказчиком. Заложить возможное превышение стоимости в проект	Увеличение тарифов на монтажные работы, увеличение стоимости на оборудование

4	Низкая квалификация рабочих	На качество	1	3	Низкий	Найм эксперта и/или повышение квалификации рабочих перед выполнением проекта	Плохой подбор рабочего персонала
---	-----------------------------	-------------	---	---	--------	--	----------------------------------

5.7 Формирование сметы затрат проекта

Рассчитанная величина затрат проекта является основой для формирования сметы затрат, которая при формировании договора с заказчиком защищается проектной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку ОУ для уличного освещения. Затраты на проект приведены в таблице 15.

Таблица 15 — Смета затрат проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Затраты на лицензию	40,282	28
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	57,5	42
3. Отчисления во внебюджетные фонды	39,026	29
4. Накладные расходы	1,66	1,2
Бюджет затрат проекта	138,468	100

Исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию проекта составят 138468 рублей, большая часть которых приходится на приобретение лицензии и оплату труда.

Выводы по главе:

1. Потенциальным потребителем проекта могут являться университеты, научные лаборатории, научные центры.

2. Из карты сегментирования можно сделать вывод, что предложенный алгоритм по исследованию гауссова слабо развита. Поэтому данное направление имеет большие перспективы.

3. *SWOT*-анализ выявил сильные и слабые стороны проекта, которые делают проект конкурентоспособным по сравнению с другими методами освещения. Актуальность проекта, продолжительный срок службы, внедрения разработки в учреждения высшего образования, а также научные центры и лаборатории, подтверждают конкурентоспособность проекта и необходимость дальнейшего анализа возможностей разработки. Наиболее важной слабой стороной проекта является внедрение новых методик расчета. Поэтому необходимо усовершенствовать методику расчета гауссова пучка, увеличивать возможности программного алгоритма.

3. При планировании комплекса работ по проекту была построена диаграмма Ганта, которая координирует работу исполнителей в ходе выполнения исследования.

4. Для планирования бюджета были подсчитаны общие затраты на реализацию проекта, сумма которых составила 138468 рублей.

Глава 6 Социальная ответственность

Целью выпускной квалификационной работы является исследование свойств прохождения гауссова пучка через систему оптических поверхностей. Работа заключается в математическом моделировании в программном комплексе *Mathcad* процесса прохождения пучка и вычисления его характеристик.

В данном разделе рассматриваются условия труда учебной аудитории. Рабочее место расположено на втором этаже здания (20 корпус ТПУ), имеет естественное и искусственное освещение. Общая площадь помещения 80м². Площадь на одно рабочее место с персональным компьютером составляет не менее 4м², а объем – не менее 14 м³. В аудитории имеется 10 персональных компьютеров.

Цель данного раздела: проанализировать опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть в процессе выполнения выпускной работы в учебной аудитории и решить вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих технических документов.

6.1 Производственная безопасность

Работы на электронно-вычислительных машинах проводятся в помещении, соответствующем требованиям санитарных правил и норм. В таблице 16 приведены опасные и вредные факторы.

Таблица 16 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при лабораторных и камеральных работах

Этапы работ	Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ с измен. 1999 г.)		Нормативные документы
		Вредные	Опасные	
1	2	3	4	5

Камеральный	Обработка информации на ПК (построение графиков, диаграмм; обработка базы данных; написание анализа)	1. Освещенность рабочей зоны; 2. Микроклимат в помещении; 3. Степень нервно-эмоционального напряжения; 5. Монотонный режим работы; 6. Шум; 7. ЭМИ.	1. Короткое замыкание.	ГОСТ 12.1.004-91; ГОСТ 12.1.005-88; СанПиН .2.4.548-96; СНиП 2.04.05-91; СНиП 23-05-95; ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. ГОСТ 12.1.019 -79
-------------	--	---	------------------------	---

6.1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (производственная санитария)

Освещенность рабочей зоны

Среди технических требований к рабочему месту особенно важным является требование к освещенности, которая значительно влияет на эффективность трудового процесса. Недостаточная освещенность может возникать при неправильном направлении света на рабочее место при естественном освещении и при неправильном выборе осветительных приборов при искусственном освещении. Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения и приводит к утомляемости организма. Поэтому необходимо обеспечить оптимальное сочетание общего и местного освещения.

Естественное освещение должно удовлетворять СНиП II-4-79 «Строительные нормы и материалы» (Глава 4 «Естественное и искусственное освещение»). Нормы естественного освещения установлены с учетом обязательной регулярной очистки стекол световых проемов не реже двух раз в год (для помещений с незначительным выделением пыли, дыма и копоти). Учитывая, что солнечный свет оказывает благоприятное воздействие на

организм человека, необходимо максимально продолжительно использовать естественное освещение.

Так как естественный свет непостоянен, может резко изменяться даже в течение нескольких минут, то естественное освещение нормируется по коэффициенту естественной освещенности (КЕО), который определяется по формуле:

$$e_N = e_n * m_N, \text{ где}$$

N - Номер группы обеспеченности естественным светом;

e_n - значение КЕО по табл.1 и 2 из СНиП 23-05-95;

m_N - коэффициент светового климата.

В соответствии с характером выполняемых работ, освещенность рабочего места по СНиП II-4-79 должна быть 200 Лк – общая освещенность и 300 лк – комбинированное освещение.

Искусственное освещение подразделяется на общее и местное. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должен быть 300-500 лк. Местное освещение не должно создавать блики на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк (СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещен) [8].

Для общего искусственного освещения помещений следует использовать, как правило, разрядные источники света, отдавая предпочтение при равной мощности источникам света с наибольшей световой отдачей и сроком службы.

6.1.2 Микроклимат в помещении

Параметры микроклимата в значительной степени влияют тепловое самочувствие человека и, следовательно, на его работоспособность, а также и на надежность работы вычислительной техники. С целью создания нормальных условий для персонала установлены нормы производственного микроклимата. В производственных помещениях, в которых работа на ПЭВМ является основной, согласно [9] должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата, как

показано в таблице 17. В данной лаборатории созданы настоящие условия, удовлетворяющие нормам микроклимата с ВДТ и ПЭВМ.

Таблица 17 – Оптимальные нормы микроклимата для помещений с ВДТ и ПЭВМ (СанПиН 2.2.4.548 – 96)

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура С ⁰		Относительная Влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Фактические	Оптимальные	Фактические	Оптимальные	Фактические	Оптимальные
1	2	3	4	5	6	7	8
Холодный Теплый	1а (легкая)	23	22-24	45	40-60	0.1	0.1
	1а (легкая)	25	23-25	45	40-60	0.1	0.1

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата должны быть использованы защитные мероприятия: системы местного кондиционирования воздуха, воздушное душирование, компенсация неблагоприятного воздействия одного параметра микроклимата изменением другого, спецодежда и другие средства индивидуальной защиты, перерывы в работе.

6.1.3 Степень нервно-эмоционального напряжения

В психологии труда утомление рассматривается как особое, своеобразно переживаемое психическое состояние, включающее следующие компоненты:

1. Чувство слабосилия. Утомление сказывается в том, что человек чувствует снижение работоспособности, даже когда производительность труда еще сохраняется на прежнем уровне.

2. Расстройство внимания. В случае утомления внимание отвлекается, становится вялым, малоподвижным, или наоборот, хаотически подвижным, неустойчивым.

3. Расстройства в сенсорной области. Таким расстройствам под влиянием утомления подвергаются рецепторы, которые принимают участие в работе.

4. Нарушение в моторной сфере. Утомление сказывается в замедлении или беспорядочной торопливости движений, расстройстве их ритма, в ослаблении точности и координированности движений, их деавтоматизации.

5. Ухудшение памяти и мышления.

6. Ослабление воли.

7. Сонливость - как выражение охранного торможения.

Для снятия общего утомления, улучшения функционального состояния нервной, сердечно-сосудистой, дыхательной систем, а также мышц плечевого пояса, рук, спины, шеи и ног, следует проводить физкультпаузы.

6.1.4 Монотонный режим работы

Одним из видов психофизиологических опасных и вредных производственных факторов является монотонность труда.

Монотонность труда – показатель напряженности трудового процесса, характеризующийся выполнением одних и тех же кратковременных приемов (движений) или восприятием небольшого объема профессионально значимой информации в течение всего рабочего времени. Монотонность имеет два признака: число приемов в многократно повторяющейся операции и продолжительность выполнения повторяющихся операций, выраженная в секундах.

Длительная работа с высоким темпом на фоне монотонности приводит к развитию гипертензивных реакций и заболеванию мышц и опорно-двигательного аппарата при большом статическом и динамическом напряжении с выполнением часто повторяющихся, однообразных или высокодифференцированных движений.

Для избегания монотонности труда следует расширить круг обязанностей, усложнить работу или обогатить ее такими функциями и обязанностями,

которые способны сыграть роль стимулов. При работах с высокой степенью монотонности рекомендовать периодическое (2 - 3 раза в час) кратковременное (2 - 3 мин.) ускорение (на 5 - 10%) темпа работы и кратковременное увеличение освещения (на 1 - 2 мин.) на (20%), начиная со второго часа работы. При зрительно-напряженных работах с целью снятия локального утомления глаз и улучшения кровообращения во время перерывов и пауз делать легкий самомассаж чистыми руками закрытых век и кожи вокруг глаз (10-29 минут).

6.1.5 Шум

Длительное воздействие шума снижает остроту слуха и зрения, повышает кровяное давление, утомляет центральную нервную систему, в результате чего ослабляется внимание, увеличивается количество ошибок в действиях рабочего, снижается производительность труда. Воздействие шума приводит к появлению профессиональных заболеваний и может явиться причиной несчастного случая.

Органы слуха человека воспринимают звуковые колебания с частотой 16–20000 Гц. Колебания с частотой ниже 20 Гц (инфразвук) и выше 20000 Гц (ультразвук) не вызывают слуховых ощущений, но оказывают биологическое воздействие на организм. Гигиенические нормативы шума определены ГОСТ 12.1.003 – 83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1 .8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий».

Для снижения шума в помещениях проводятся следующие основные мероприятия:

- уменьшение уровня шума в источнике его возникновения;
- звукопоглощение и звукоизоляция, установка глушителей шума;
- рациональное размещение оборудования.

Электромагнитное излучение (ЭМИ).

Основным вредным фактором, воздействию которого подвергается инженер-исследователь при работе за компьютером, является электромагнитное

излучение. Оно пагубно влияет на костные ткани, ухудшает зрение, повышает утомляемость, а также способствует ослаблению памяти и возникновению онкологических заболеваний.

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 и представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	<i>в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц</i>	25 В/м
	<i>в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц</i>	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	<i>в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц</i>	250 нТл
	<i>в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц</i>	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 В/м

6.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению (производственная санитария)

Электрический ток

Специфическая опасность электроустановок – токоведущие проводники оборудования, оказавшегося под напряжением в результате повреждения изоляции, не подают каких-либо сигналов, которые предупреждают человека об опасности. Реакция человека на электрический ток возникает лишь при протекании последнего через тело человека.

Электрический ток представляет собой скрытый тип опасности, т.к. его трудно определить в токо- и нетоковедущих частях оборудования, которые являются хорошими проводниками электричества. Смертельно опасным для жизни человека считают ток, величина которого превышает 0,05А, ток менее 0,05А – безопасен (до 1000 В).

Для предотвращения электротравматизма большое значение имеет правильная организация работ, т.е. соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок и правил устройства электроустановок.

Для предотвращения электротравм соблюдаются требования, предъявляемые к обеспечению электробезопасности работающих на ПЭВМ:

1) все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должно питаться от одной фазы электросети;

2) корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;

3) для отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный пункт с автоматами и общим рубильником;

4) все соединения ПЭВМ и внешнего оборудования должны проводиться при отключенном электропитании.

Основными мероприятиями, направленными на ликвидацию причин травматизма, относятся:

1) систематический контроль за состоянием изоляции электропроводов, кабелей, изоляционных трубок;

2) разработка инструкций по техническому обслуживанию и эксплуатации средств вычислительной техники и контроль за их соблюдением;

3) соблюдение правил противопожарной безопасности.

6.2.1 Короткое замыкание

Одним из видов физических опасных факторов является повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека. Короткое замыкание – это непредусмотренное нормальным режимом работы замыкание между фазами.

Короткие замыкания в электропроводах чаще всего происходят из-за нарушения изоляции токопроводящих частей в результате механических

повреждений, старения изоляции, воздействия на нее влаги и агрессивных сред. При возникновении короткого замыкания общее сопротивление в электрической сети уменьшается, это приводит к увеличению тока по сравнению с нормальными условиями работы.

Чтобы не допустить возникновения пожара при коротком замыкании следует выполнить следующие правила и требования:

- Тщательно проверять исправность электропроводки, постоянно следить за их исправностью, за целостностью розеток, вилок и электрошнуров. Удлинитель после использования следует отключать от розетки. Нельзя прокладывать кабель удлинителя под коврами и через дверные пороги.

- Не оставлять без присмотра находящиеся под напряжением компьютеры, принтеры и другие электронагревательные приборы административных и других помещениях.

6.3 Экологическая безопасность (Охрана окружающей среды)

Эксплуатация далеко не самая сложная операция с персональным компьютером, с точки зрения экологии, самая сложная операция – это утилизация.

6.3.1 Правила утилизации компьютеров:

1) создание комиссии на предприятии, имеющем технику, подлежащую утилизации. Это внутренняя комиссия, которая создается для коллективного принятия решения о том, какая именно техника может быть списана.

2) Составление экспертного заключения о том, что техника действительно «отжила свое» и должна быть списана. В качестве эксперта может выступать как независимый специалист, так и сотрудник компании, имеющий диплом, подтверждающий его компетентность в работе с данной техникой.

3) Составление акта технической экспертизы, подтверждающего, что техника уже вышла из строя и не подлежит ремонту либо же что ремонт её уже нецелесообразен.

4) Утилизация техники на соответствующем предприятии, имеющем право на переработку компьютеров.

5) Получение официального подтверждения в виде документа, сообщающего о том, что техника была утилизирована в соответствующем порядке и опасные отходы не будут загрязнять окружающую среду.

Такие металлы, как свинец, сурьма, ртуть, кадмий, мышьяк входящие в состав электронных компонентов переходят под воздействием внешних условий в органические и растворимые соединения и становятся сильнейшими ядами. Утилизация пластиков, содержащих ароматические углеводороды, органические хлорпроизводные соединения является насущной проблемой экологии, поэтому вся оргтехника должна утилизироваться по правилам.

Отдельного положения, регулирующего утилизацию именно техники и компьютеров, в законодательной базе нет. Утилизация и переработка осуществляются согласно общим положениям. Списанные компьютеры относятся к отходам и должны быть утилизированы в порядке, указанном в законодательстве в сфере обращения с отходами. Если техника содержит в себе опасные для окружающей среды вещества – тяжелые металлы, соли, – она подпадает под категорию опасных отходов.

6.3.2 Правила утилизации макулатуры

С учетом того, что наиболее значительную часть твердых бытовых отходов (до 40% в развитых странах) составляет макулатура – бумажные и картонные отходы, картон, типографские изделия, деловые бумаги, актуальным является осуществление их утилизации для повторного использования в промышленном производстве, что является наиболее экономически эффективным способом обращения с отходами.

Макулатура относится к 5-му классу опасности отходов, то есть к самому низкому. Для работы с такими материалами не требуется обладать лицензией или специальным разрешением.

На первом этапе макулатуру превращают в целлюлозную массу, для этого ее сортируют по маркам (цвету, степени загрязнения, длине волокон целлюлозы); режут и измельчают; замачивают и делают первичный роспуск; очищают от примесей.

При дальнейшей обработке получают сырье для изготовления качественной бумаги различной фактуры и другой ценной для промышленности продукции. На втором этапе делают вторичный роспуск; тонкую очистку от примесей; химическую и механическую обработку.

На финальной стадии такой обработки сырье готово для производства бумаги высокого качества, а также кровельных и изоляционных материалов.

6.3.3 Правила утилизации люминесцентных ламп

Люминесцентные трубки представляют собой вакуумную стеклянную колбу, наполненную парами ртути и покрытую изнутри люминофором. При действии на ртутные пары электрических разрядов получается свечение, богатое ультрафиолетовыми лучами, люминофор преобразует ультрафиолетовое излучение газового разряда в видимое.

Ртуть в любом своем состоянии обладает кумулятивными свойствами, и наряду с общетоксическим действием оказывает гонадотоксический, эмбриотоксический, тератогенный, мутагенный, иммунодепрессивный и канцерогенный эффекты.

При замене перегоревших ламп немедленно после удаления отработавшей ртутьсодержащей лампы из светильника каждая отработавшая ртутная лампа или люминесцентная трубка должна быть упакована в индивидуальную тару из гофрокартона или картонную коробку.

Передача отработанных ртутьсодержащих ламп на обезвреживание (демеркуризацию) осуществляется в соответствии с договором, заключенным со специализированным предприятием, имеющим лицензию на деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I-IV классов опасности.

Механизм переработки может проходить химическим или термическим методом. В зависимости от технологического оборудования утилизация для ламп дневного света может осуществляться сухим, гидromеталлургическим, термическим и термовакуумным способом.

Утилизация люминесцентных ламп предусматривает несколько технологических процессов, которые позволяют получить безопасные отходы для захоронения и сырье для дальнейшего использования.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Нередко, при определенных работах, в помещении возникает опасность пожара.

Здание, в котором располагается наша рабочая аудитория по пожарной опасности относится к категории В – производства, связанные с обработкой или применением твердых сгораемых веществ и материалов (компьютерная техника, предметы мебели).

Условия развития пожара в зданиях и сооружениях во многом определяются степенью их огнестойкости. Степенью огнестойкости называется способность здания в целом сопротивляться разрушению при пожаре. Здания и сооружения по степени огнестойкости подразделяются на пять степеней. Степень огнестойкости здания зависит от возгораемости и огнестойкости основных строительных конструкций и от пределов распространения огня по этим конструкциям.

Степень огнестойкости здания II согласно. Основные части зданий I, II степени огнестойкости являются несгораемыми и различаются только

пределами огнестойкости строительных конструкций. В зданиях II степени максимальный предел распространения огня, составляющий 40 см, допускается только для внутренних несущих стен (перегородок).

В исследуемом помещении обеспечены следующие средства противопожарной защиты:

- «План эвакуации людей при пожаре»;
- Памятка соблюдения правил техники пожарной безопасности;
- Системы вентиляции для отвода избыточной теплоты от ЭВМ;
- Углекислотный огнетушитель (ОУ-3-ВСЕ);
- Система автоматической противопожарной сигнализации.

6.5 Правовые и организационные мероприятия по обеспечению безопасности

При разработке данного раздела учитывались необходимые нормы и требования законов Российской Федерации при работе за компьютером.

6.5.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

В соответствии с пунктом 13.1 статьи 13 Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 № 118". О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03" лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке.

Нормальная продолжительность рабочего времени согласно статье 91 Трудового кодекса РФ не может превышать 40 часов в неделю. Согласно статье 92 Трудового кодекса РФ сокращенная продолжительность рабочего времени

при проведении работ профессионально связанных с эксплуатацией ПЭВМ не предусмотрена.

В соответствии с Типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере ТОИ Р-45-084-01, продолжительность непрерывной работы с компьютером без регламентированного перерыва не должна превышать двух часов. При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к различным видам трудовой деятельности, за основную работу с компьютером следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Согласно статье 111 Трудового кодекса РФ при шестидневной рабочей неделе работникам предоставляются один выходной день в неделю – воскресенье.

6.5.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место – это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности инженера, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера, обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении. При правильной организации рабочего места производительность труда инженера возрастает с 8 до 20 процентов.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03 (рабочее место для выполнения работ, в положении сидя) конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места инженера должны быть соблюдены следующие основные условия:

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;
- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Рабочая поза сидя вызывает минимальное утомление инженера. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

Вывод по главе:

В части «Социальная ответственность» были проанализированы опасные и вредные факторы при данном виде организационной деятельности и решены вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативно-технических документов.

Заключение

У пучка, использующегося в описании пучка когерентного излучения с дифракционной расходимостью, энергия сосредоточена в приосевой области и спадает на периферии согласно функции Гаусса. Пучок представляет в действительности наиболее близкое приближение, допускающееся дифракцией к лучу или к параксиальным лучам. Данное приближение, введённое в математическом смысле, позволяет более полно и детально описать свойства оптических систем.

В работе рассмотрены и изучены основные методы расчета гауссова пучка. Представлено математическое обеспечение, реализованное в среде *Mathcad*, позволяющее автоматизировать математические расчеты параметров гауссового пучка.

Список использованной литературы:

1. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождетсвин В.Н. Оптико – электронные квантовые приборы // М.: Радио и связь – 1982. – 456 с.
2. Пахомов И.И., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов // М.: Радио и связь – 1986. – 152 с.
3. ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч.1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки – Введ. 01.01.2010. – М.: Стандартиформ. – 2010. – 152 с.;
4. Пахомов И.И. Расчет преобразования лазерного пучка в оптических системах // М.: МВТУ – 1984. – 54 с.;
5. Маркузе Д. Оптические волноводы // М.: МИР – 1974. – 457 с.;
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука – 1970. – 856 с.;
7. Быков В.П., Силичев О.О., Лазерные резонаторы // М.: Физматлит – 2004. – 320 с.;
8. Апенко М.И. Прикладная оптика // М.: Машиностроение – 1992. – 480 с.;
9. Русинов М.М., Граматин А.П., Иванов П.Д. Вычислительная оптика// М.: ЛКИ – 2008. – 423 с.;
10. Пашковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева // М.: Наука. - 1983. - 384 с.;
11. Носов П.А., Павлов В.Ю., Пахомов И.И., Широнков А.Ф. Абберационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков // Оптический журнал: наука и инновации. – 2011. – №9. – С.34-44;
12. Цибуля А.Б., Чертов В.Г., Шерешев А.Б. Пространственная структура лазерных пучков и геометрическая оптика // Оптико-механическая промышленность – 1977. – №10. – С.66-72;
13. Быков В.П., Ванштейн Л.А. Геометрическая оптика открытых резонаторов// ЖЭТФ – 1964. – №8. – С.508-517;

14. Кравцов Ю.А. Об одной модификации метода геометрической оптики //Изв. вузов. Радиофизика – 1965. – №4. – С. 664-673;
15. Кравцов Ю.А. Модификация метода геометрической оптики для волны, просачивающейся через каустику //– Изв. вуз. Радиофизика – 1965. – №4. – С.659-667
16. Джерард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику // М.: Мир. - 1978. - 341 с.;
17. Родионов С.А. Матричный аппарат гауссовой оптики в окрестности произвольного луча // Оптика и спектроскопия – 1981. – №5. – С.969-976;
18. Гончаренко А.М. Гауссовы пучки света // Минск: Наука и техника. - 1977. - 144 с.;
19. Когельник Х., Ли Т. Резонаторы и световые пучки лазеров // ТИИЭР. - 1966. - №10;
20. Бутиков Е.И. Оптика // учеб. пособие. – СПб.: Лань. – 2012. – 608 с.;
21. Агапов Н.А. Прикладная оптика // учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017.
22. Скроцкий Г.В. Свойства одномодового гауссового пучка электромагнитных волн // Материал IX всесоюзной школы по голографии. – 20 с.;
23. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика // М.: Мир. – 1978. – 341 с.;
24. Виноградова М.Б. Теория волн // учеб. пособие. – М.: Наука. – 1979. – 383с.;
25. Пахомов И.И. Геометрические преобразования гауссового пучка // Изв. вузов «Приборостроение». – 1981. – №2. – С.76-81.

Приложение А

Расчет хода гауссова пучка через нетелескопическую систему

Радиусы поверхностей, мм:	Эксцентриситеты:	Осевые толщины, мм:	Показатели преломления:
$r_1 := 100$	$e_1 := 0$	$d_1 := 10$	$n_1 := 1$
$r_2 := -100$	$e_2 := 0$	$d_2 := 10$	$n_2 := 1.5$
$r_3 := 100$	$e_3 := 0$	$d_3 := 10$	$n_3 := 1$
$r_4 := -100$	$e_4 := 0$	$d_4 := 1000$	$n_4 := 1.5$
$k := 4$	количество поверхностей		
$\lambda_0 := 0.63 \cdot 10^{-3}$	длина волны в вакууме, мм		
$z_1 := 100$	расстояние от перетяжки падающего пучка до первой поверхност		
$\sigma_{01} := 0.1$	радиус перетяжки падающего пучка		

Расчет параксиальных характеристик

$$i := 1 .. k$$

$$\beta_i := \frac{\epsilon_{i+1} d_i}{n_{i+1}}$$

$$\gamma_i := \begin{cases} 0 & \text{if } r_i = 0 \\ \frac{\epsilon_i n_i - \epsilon_{i+1} \cdot n_{i+1}}{r_i} & \text{if } r_i \neq 0 \end{cases}$$

$$m_{2,i-1} := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_i & 1 \end{pmatrix}$$

$$m_{2,i} := \begin{pmatrix} 1 & \beta_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M := \prod_{j=2 \cdot k - 1}^1 m_j$$

$$f := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ \frac{n_1}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$f' := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ \frac{-\epsilon_{k+1} n_{k+1}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$sF := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ n_1 \cdot \frac{M_{2,2}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$s'F' := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ -\epsilon_{k+1} n_{k+1} \cdot \frac{M_{1,1}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$sH := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ n_1 \cdot \frac{M_{2,2} - 1}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$s'H' := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ \epsilon_{k+1} n_{k+1} \cdot \frac{1 - M_{1,1}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$sN := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ \frac{n_1 \cdot M_{2,2} - \epsilon_{k+1} n_{k+1}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$s'N' := \begin{cases} 0 & \text{if } M_{2,1} = 0 \\ \frac{n_1 - \epsilon_{k+1} n_{k+1} \cdot M_{1,1}}{M_{2,1}} & \text{if } M_{2,1} \neq 0 \end{cases}$$

$$j := 1 .. k + 1$$

$$\lambda_j := \frac{\lambda_0}{n_j}$$

$$\lambda \lambda_j := \frac{\lambda_j}{2 \cdot \pi} \quad \text{Расчет гауссовых характеристик}$$

$$\begin{aligned}
\text{Res} := & \left| \begin{aligned}
I_{01} &\leftarrow \frac{(\sigma_{01})^2}{\lambda\lambda_1} \\
\sigma_1 &\leftarrow \sigma_{01} \cdot \sqrt{1 + \frac{(z_1)^2}{(I_{01})^2}} \\
RF_1 &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } z_1 = 0 \\ z_1 + \frac{(I_{01})^2}{z_1} & \text{if } z_1 \neq 0 \end{cases} \\
a_1 &\leftarrow -RF_1 \\
\text{tg}\Theta_1 &\leftarrow \frac{\lambda\lambda_1}{\sigma_{01}} \\
\Theta_1 &\leftarrow (\text{atan}(\text{tg}\Theta_1)) \cdot \frac{180 \cdot 60}{\pi} \\
\text{tg}\alpha_1 &\leftarrow \frac{z_1}{I_{01}} \\
\alpha_1 &\leftarrow (\text{atan}(\text{tg}\alpha_1)) \cdot \frac{180}{\pi} \\
\text{for } j \in 1..k & \\
& \left| \begin{aligned}
a'_j &\leftarrow \frac{(\epsilon_{j+1} \cdot \eta_{j+1})}{\frac{(\epsilon_j \cdot \eta_j)}{a_j} - \gamma_j} \\
RF'_j &\leftarrow -a'_j
\end{aligned} \\
& \left| \begin{aligned}
z'_j &\leftarrow \frac{RF'_j}{1 + \left[\frac{\lambda\lambda_{j+1} \cdot RF'_j}{(\sigma_j)^2} \right]^2} \\
I_{0j}' &\leftarrow \frac{\left[\frac{\lambda\lambda_{j+1} \cdot (RF'_j)^2}{(\sigma_j)^2} \right]}{1 + \left[\frac{\lambda\lambda_{j+1} \cdot RF'_j}{(\sigma_j)^2} \right]^2} \\
\sigma_{0j}' &\leftarrow \sqrt{\lambda\lambda_{j+1} \cdot I_{0j}'} \\
\sigma_j &\leftarrow \sigma_{0j}' \cdot \sqrt{1 + \frac{(z'_j)^2}{(I_{0j}')^2}}
\end{aligned}
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{tg}\Theta_{j+1} &\leftarrow \frac{\lambda\lambda_{j+1}}{\sigma 0'_j} \\
\Theta_{j+1} &\leftarrow (\text{atan}(\text{tg}\Theta_{j+1})) \cdot \frac{180 \cdot 60}{\pi} \\
\text{tg}\alpha_{j+1} &\leftarrow \frac{z'_j}{l0'_j} \\
\alpha_{j+1} &\leftarrow (\text{atan}(\text{tg}\alpha_{j+1})) \cdot \frac{180}{\pi} \\
z_{j+1} &\leftarrow d_j + z'_j \\
\text{RF}_{j+1} &\leftarrow z_{j+1} + \frac{(l0'_j)^2}{z_{j+1}} \\
a_{j+1} &\leftarrow -\text{RF}_{j+1} \\
\sigma 0_{j+1} &\leftarrow \sigma 0'_j \\
\sigma_{j+1} &\leftarrow \sigma 0_{j+1} \cdot \sqrt{1 + \frac{(z_{j+1})^2}{(l0'_j)^2}}
\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix}
\sigma 0 \\
\sigma' \\
z' \\
l0' \\
\Theta \\
\alpha \\
\text{RF}' \\
\text{RF} \\
a' \\
\sigma
\end{pmatrix}$$

$$\sigma 0 := \text{Res}_1 \quad \sigma' := \text{Res}_2 \quad z' := \text{Res}_3$$

$$l0' := \text{Res}_4 \quad \Theta := \text{Res}_5 \quad \alpha := \text{Res}_6$$

$$\text{RF}' := \text{Res}_7 \quad \text{RF} := \text{Res}_8 \quad a' := \text{Res}_9 \quad \sigma := \text{Res}_{10}$$

Параметры падающего пучка

$\sigma_0 = 0.1$	радиус перетяжки падающего пучка, мм
$z_1 = 100$	расстояние перетяжки падающего пучка до первой поверхности, (отчет вправо - больше нуля, отчет влево - меньше нуля)
$\sigma_1 = 0.142$	радиус падающего пучка на передней поверхности, мм

Параметры прошедшего пучка

$\sigma_{k+1} = 0.048$	радиус перетяжки прошедшего пучка, мм
$z'_k = -56.166$	расстояние от перетяжки прошедшего пучка до последней поверх (отчет вправо - больше нуля, отчет влево - меньше нуля)
$\sigma'_k = 0.126$	радиус прошедшего пучка на задней поверхности, мм
$\sigma_{k+1} = 1.963$	радиус прошедшего пучка в заданной плоскости наблюдения, мм
$\Theta_{k+1} = 7.148$	расходимость прошедшего пучка, мин.
$\alpha_{k+1} = -67.565$	фаза вектора E прошедшего пучка на задней поверхности, град.

Параксиальные характеристики оптической системы

$f = -55.42$	переднее фокусное расстояние, мм
$f' = 55.42$	заднее фокусное расстояние, мм
$s_F = -42.886$	передний фокальный отрезок, мм
$s'_F = 42.886$	задний фокальный отрезок, мм
$s_H = 12.534$	передняя главная точка, мм
$s'_H = -12.534$	задняя главная точка, мм
$s_N = 12.534$	передняя узловая точка, мм
$s'_N = -12.534$	задняя узловая точка, мм
$\Theta_1 = 3.447$	расходимость падающего пучка, мин.
$\alpha_1 = 45.077$	фаза вектора E падающего пучка на передней поверхности, град.

Приложение Б

The research of the Gaussian beam passage through an optical system

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ6Б	Чагдурова Е.Б.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Агапов Н.А.	д.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Парнюгин А.С.	к.п.н.		

Introduction

For efficient use of laser radiation, it is necessary to know the properties of the laser, the features of beam propagation and the possibility of its transformation. Controlling the propagation of a laser beam is an important problem, which is solved practically.

The emergence of the laser facilitated the introduction of the concept of a Gaussian beam. The laser radiation is a narrow beam. The diffraction divergence of such beams is small, and the amplitude varies slowly with the longitudinal coordinate. These light beams are Gaussian, since the amplitude of such beams in the transverse plane varies according to the Gaussian law, and the phase surface is curved as the beam propagates. Gaussian beams most completely and simply characterize the properties of laser beams. Therefore, there is a necessity for a detailed study of Gaussian light beams.

Objective: to consider methods for calculating the conversion of laser radiation by optical systems.

Chapter 1 State and prospects for the development of methods for calculating the conversion of laser radiation by optical systems

The emergence of optical quantum generators led to the start and rapid development of new scientific directions. One of these areas is laser optics, which studies the formation of laser radiation by optical resonators and conversion by optical systems, as well as the synthesis of such systems that ensure the formation of a laser beam with the required parameters. At present, this direction has been fully formed and continues to develop, contributing to the improvement of the characteristics of lasers and the expansion of their application areas.

Gaussian beams, which are formed by stable resonators, play an important role in the theory of laser optics. It was established in [1, 2] that the distribution of the field amplitude in space does not change for Gaussian beams propagating in free space, but the scale of distribution changes which determines the transverse dimension of the beam.

Moreover, the beam, which is at a distance z from the cross-section of the Gaussian beam constriction, has a spherical wave front whose radius of curvature is described by the expression:

$$R_{\Phi}(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_k}{z} \right)^2 \right], \quad (1)$$

z_k – a beam confocalization parameter is the longitudinal distance from the beam constriction, on which the beam size increases in $\sqrt{2}$ time.

Expression (1) shows that the radius of curvature of the wave front of a Gaussian beam varies from $2z_k$ to infinity [1, 2].

The radius of curvature of the wave front in the section of the waist and in the far zone at $z \rightarrow \infty$ is equal to infinity. As a result, Gaussian beams formed by a stable laser cavity have properties that are not inherent in radiation originating from thermal, luminescent sources.

In most practical cases, the parameters of the laser beam formed by the resonator do not correspond to those required for solving a particular problem. Therefore, a beam emanating from the resonator is transformed by an external (outside the resonator) optical system and laser optical system.

In this paper, the problem of converting a laser beam by an optical system is as follows: from the given parameters and characteristics of the beam at the entrance to the optical system and its design parameters (r, d, n) it is necessary to determine the distribution of the complex field amplitude $\psi(x, y, z)$ in the plane of analysis z and the spatial parameters of the transformed beam.

This problem can be solved both strictly and approximately. In an approximate version of the solution, various assumptions are introduced. When considering laser optical system (LOS) components ideal (without aberrations), and also in the absence of diffraction, the solution was obtained in the paraxial approximation [4, 5]. The methods of geometric and wave optics are used to refine the solution in the paraxial approximation, while complicating the model by taking into account the aberrations of LOS or simultaneously with the diffraction effects. To do this, it used the scalar and vector theories of diffraction. [1,5 - 7]. The scalar method of diffraction theory is used in cases when it is necessary to know the exact structure of the electromagnetic field of a laser beam transformed by an optical system or when the beam diaphragm plays an important role, which is not taken into account in geometric optics.

The vector theory of diffraction is based on Maxwell's equations, that is, on a full description of the electromagnetic field, and it is used when the assumptions of the remaining methods are unacceptable.

1.1 Wave methods for describing the transformation of a Gaussian beam by an ideal optical system

The ideal optical system does not introduce additional distortions into the shape of the wave front, that is, it does not change the phase of the beam according to

quadratic laws [1, 5]. When the beam passes through a thin lens with a back focal length, and the complex amplitude of the output field has the form:

$$\psi'(\xi, \eta) = \psi(\xi, \eta) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda f'} (\xi^2 + \eta^2) \right], \quad (2)$$

where ψ, ψ' the distribution of the complex amplitude of the field at the input and output of the lens, respectively, ξ, η – transverse coordinates on the lens.

Since for all modes the dependence of changes of radius of curvature of the wave front (1) and the confocalization parameter of the beam is the same, the investigation of the transformation of a multimode beam of an ideal VOC is limited to the consideration of the fundamental mode [1, 2, 8]. The spatial parameters of a Gaussian beam with the wavelength λ of radiation are the size of the waist σ_0 , (by level $1/e^2$ from the axial intensity); confocalization parameter z_k ; angular divergence $2\theta_0$ (by level $1/e^2$ of the axial intensity). In addition, the position of the constriction of the input beam is given by magnitude (its deletion concerning front LOS focus) or a segment z_p (its deletion concerning the first LOS surface).

At present, the following methods are used to determine the parameters of a Gaussian beam at the output of an ideal LOS:

1. Method of variants [2,8];
2. *ABCD* - method [1,2,7];
3. The conjugate plane method [1,2].

In the method of variants and *ABCD* - method, the parameters of a Gaussian beam in an arbitrary section are described by a complex number: V , the complex curvature parameter of Kogelnik $1/q$. In the cross section of the beam, the complex quantity is determined by the beam dimensions and by the radius of curvature of the wave front. When the Gaussian beam propagates in free space and when it is transformed by an optical system, the variants and the complex curvature parameter vary in accordance with the relations given in [2, 7, 8]. The advantage of using these methods is the compactness of the recording of analytic expressions in complex form.

1.2. Geometric description of the transformation of a Gaussian beam by an optical system

In this case, the ray packet method [2] is used. By combining the center of the coordinate system with the center of the constriction of the Gaussian beam, for the field intensity distribution at an arbitrary point (x, y, z) , we obtain:

$$\bar{I}_{00}(x, y, z) = \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{z_k}{z^2 + z_k^2} (x^2 + y^2) \right] \quad (3)$$

The surface of cylindrical coordinates system (ρ, φ, z) is equal relative intensity:

$$\frac{\rho^2}{\rho_0^2} - \frac{z^2}{z_k^2} = 1, \quad (4)$$

where $\rho^2 = x^2 + y^2$, $\rho_0^2 = x_0^2 + y_0^2$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ is a distance from the observation point in the beam to the beam axis, and ρ_0 – beam size at cross-section ($z = 0$), which corresponds to the level of power density as the point of observation (x, y, z) .

Expression (4) describes a single-sheeted hyperboloid of revolution, so that a laser beam with a relative intensity distribution of the field (3) can be regarded as a set of embedded hyperboloids of revolution of the kind (4) with the same confocal parameter and different beam dimensions in the cross-section of the waist ρ_0 , corresponding to different energy levels (Figure 1).

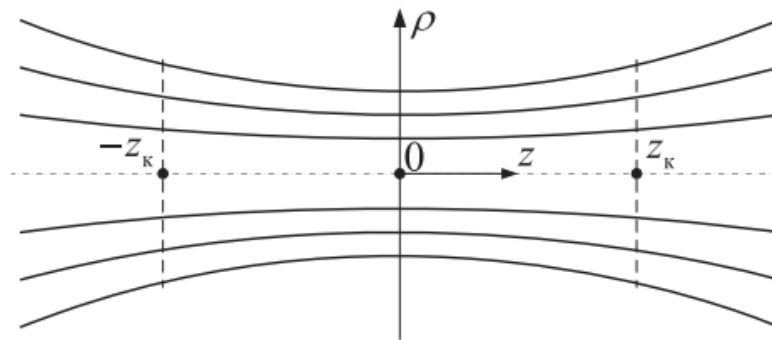


Figure 1 - Lines of equal relative intensity

Expressions of directing vectors of hyperboloid of one sheet

(2) \vec{v}_1 and \vec{v}_2 straight-line generators:

$$\vec{v}_{1,2} = \left\{ \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{xz}{z_k} \pm y \right); \frac{\rho_0^2}{\rho^2} \left(\frac{xz}{z_k} \mp y \right); z_k \right\} \quad (5)$$

The family of all rays with directing vectors \vec{v}_1 or \vec{v}_2 , which belong to a single-sheeted hyperboloid (Figure 2) is called a beam bundle.

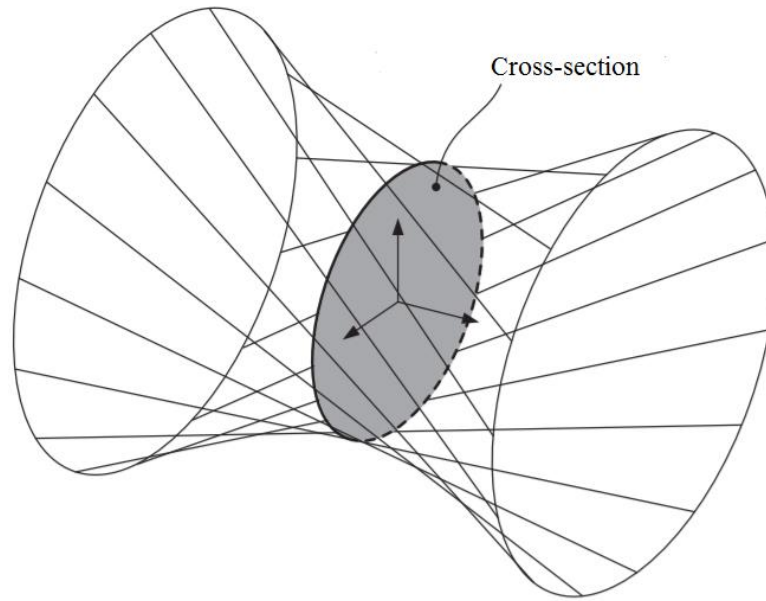


Figure 2 – Beam bundle

To determine the parameters of each beam packet at the output of LOS, known algorithms for calculating the ray path through optic system are used [8].

The method of ray packets yields appropriate results within the wave theory, despite of the fact that is based on the principles of geometric theory.

Chapter 2 The *ABCD* rule for a Gaussian beam

Matrix optics is used with success in describing the properties of optical systems and Gaussian beams. The *ABCD* rule, imposed by Kogelnik allows easy and convenient to word the diffraction theory of propagation of Gaussian beams into quasi-optical approximation both in free space and through the ideal lens system. That is, the problem of propagation of Gaussian beams comes down to the solved problem of propagation of rays in geometric optics. Within the framework of matrix optics, the complete matrix of the system is written as the product of matrix elements of which

the system consists, for example, a refracting or reflecting surface, an empty optical gap measured along the optical axis between two such surfaces. Using such matrices, numerous problems of laser optics are solved (in the quasi-optical approximation: calculating the parameters of the resonators from the given beam parameters at the output mirror, solution of the inverse problem of harmonization of optical systems, calculation of lens light waveguides, optimal focusing of the laser irradiance on the target, etc.

The usage of the ABCD rule is justified in the case of multimode lasers, since the radius of curvature of the wave front is the same for all modes of the resonator and the constriction of all the modes of such a beam coincide inside the resonator [8].

When describing the geometric construction of images by the matrix method, it is necessary to take into account the basic assumptions of geometrical optics, namely, firstly, the wavelength of light is considered negligible and, secondly, the propagation of light is described with the help of individual beams.

In 1965 Kogelnik in his work [1] proposes to use a transformation matrix in description of the laser beam with the diffraction angle of divergence.

2 .1. Transformation matrixes

When describing the passage of a paraxial beam through a centered lens system, it is necessary to introduce a Cartesian coordinate system: the Oz axis , which will coincide with the optical axis of the system and with the main direction along which the light rays propagate (from left to right), the Oy axis having an upward direction and Ox , which perpendicular axis to Oz .

Since the beam passes through various optical refractive surfaces of the system, its trajectory will consist of a sequence of straight lines. Each straight line is determined by the coordinates of one point belonging to it and the angle that this straight line makes with the Oz axis. If the plane $z = const$ (support plane), the ray is determined by its ratio to the support plane by two parameters: the height at which the ray intersects the support plane, the angle it makes with the Oz axis. The angle α is measured in radians

and is positive if it corresponds to a counter-clockwise rotation from the positive direction of the z -axis, to the direction of light propagation along the beam (Figure 3).

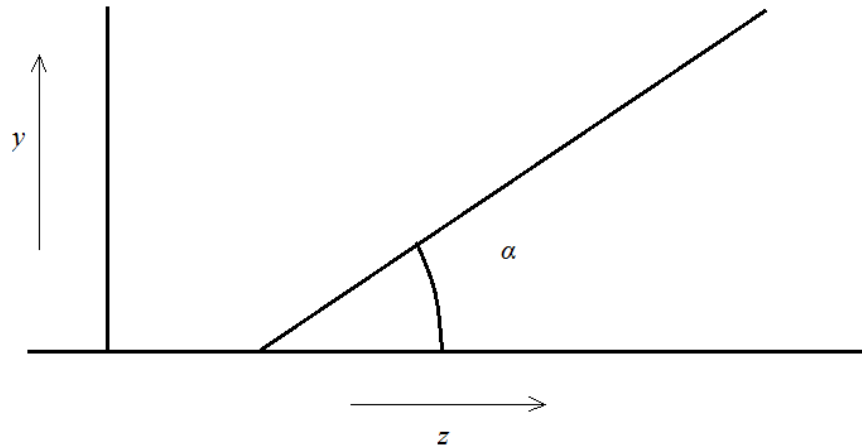


Figure 3 - Propagation of a ray in the plane Oyz

In the calculation process it is more convenient at each stage to choose a new support plane. That is, the beam parameters are continuously transferred one support plane to another, depending on the considered element of the system. When a complete calculation of the system as a whole is needed, the question arises of a complete matrix of ray transformation, which will convert all the necessary beam parameters from the selected input support plane to the output one.

To conduct the calculation operations, it is more convenient to replace the angle α corresponding to it by the directing cosine ($n \sin \alpha$), where n - refractive index of the medium in which the beam propagates. According to Snell's law, the optical directing cosine (V) does not change when crossing the surface of two optically different media.

Therefore, to study the behavior of the beam through the system of refractive lenses, it is necessary to consider two main processes:

1. The movement between two refractive surfaces is an optical gap. In this case, the ray passes in a straight line from one refractive surface to the other. This area is characterized by a thickness t and the refractive index n .

2. Refraction on the boundary surface between two regions by different refractive indices. To determine the magnitude of the deviation of the transmitted ray,

it is sufficient to know the radius of curvature of the refracting surface and the two values of the refractive index of the neighboring media.

When passing, the ray intersects first SP_1 and has the values of the parameters y_1 and V_1 . Then it passes through the optical element and reaches SP_2 with parameters y_2 . The problem is reduced to the formulation of an equation that establishes a connection between the dimensions y_1 , V_1 and y_2 , V_2 , as well as the properties of the optical element located between SP_1 and SP_2 .

Equations for optical elements (refractive surface and optical gap) are linear and written in matrix form as:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ V_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

in which the determinant $(AD - BC) = 1$.

That is, each element of the OS can make unimodular matrix of ray transformation. To obtain a common matrix of ray transformation, which describes the entire optical system, it is necessary to multiply all the matrices of elementary displacements and refractions that exist in the system (the bypass matrix) in the correct sequence. Such a system can be represented by a variety of configurations, from a simple thin lens to a complex OS.

2.2. The displacement matrix rays T

Figure 2 shows an example of a ray propagating from the left to the right path d between two support planes. The angle σ under which the beam propagates does not change over the entire length of the displacement, and the distance along Oz changes. It is believed that the distribution of $d > 0$ is positive.

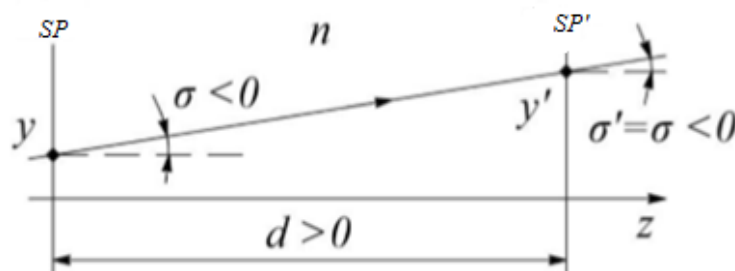


Figure 4 - Moving the beam

The equation of beam displacement of the ray between the planes SP and SP':

$$y' = y + \left(\frac{d}{n} V_1\right), \quad (7)$$

where V_1 is optical directional cosine, expression $\frac{d}{n}$ is reduced thickness of the optical gap Angle = σ' , Consequently:

$$V_2 = y_1 + (V_1), \quad (8)$$

The resulting equations in the matrix form:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\delta d}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\delta d}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ is displacement matrix}$$

The transformation (9) is valid both for positive and negative beam.

2.3. The refractive index of the ray R

To find the refraction matrix, it is necessary to consider propagation of rays on a surface curve that separates two regions with refractive indices n_1 and n_2 . Figure 5 shows a surface with a positive curvature, and the refractive indexes

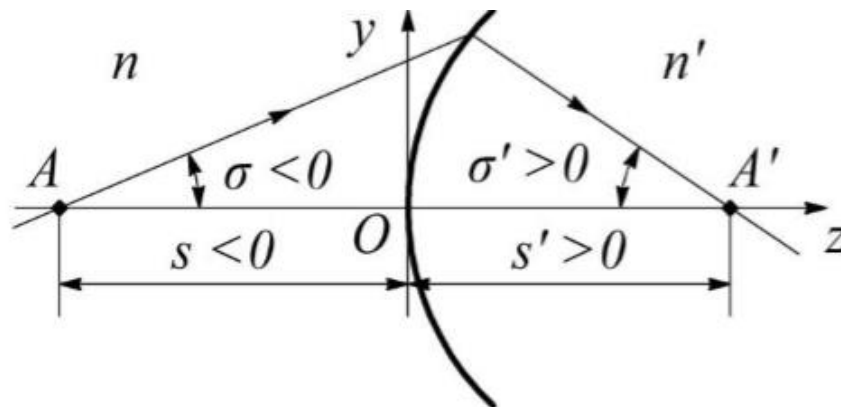


Figure 5 - Beam refraction

Considering Snell's law for the given case of beam refraction, the matrix looks like this:

$$\begin{pmatrix} A' \\ S' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ S \end{pmatrix}, \quad (10)$$

where $\Phi = \left(\frac{\delta' n' - \delta n}{r_0} \right)$ is optical strength of the refractive surface.

This matrix describes the refraction of the beam, in other cases permutation of adjoining media, the change the sign of curvature of the surface, change of the signs of magnitude.

In the case of a ray passing through a plane-refracting surface whose radius of curvature is R is equal to infinity, consequence, the value of the optical force is equal to zero, the determinant of the refraction matrix takes the value zero.

2.4. Surface system

For an optical system consisting of k spherical surfaces (Figure 4), based on the results obtained, we can write the matrix M ray transformations between the reference planes SP_1 and SP_k passing through the vertices of the outer surfaces:

$$M = R_k \cdot T_{k-1} \cdot R_{k-1} \cdot \dots \cdot T_1 \cdot R_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (11)$$

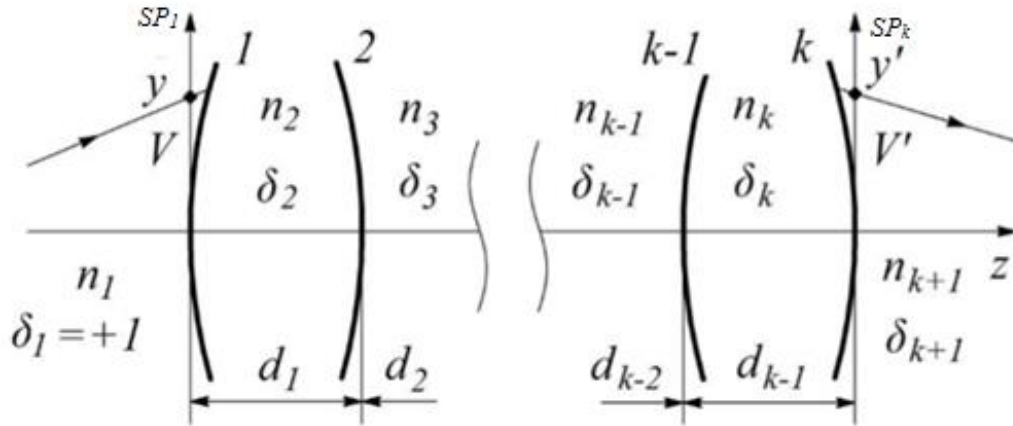


Figure 6 - Surface system

and transformation of beam parameters:

$$\begin{pmatrix} y' \\ V' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} y \\ V \end{pmatrix} \quad (12)$$

Conclusion

The considered methods of calculating the conversion of laser radiation by optical systems allow us to draw the following conclusions:

1. Methods for calculating the field distribution and the parameters of the laser beam at the output of an ideal LOS.
2. The developed methods (analytical and design) allow describing the distortion of the main mode of a laser beam and carrying out synthesis of LOS with small distortions of the output field.

In this connection, it seems important to develop methods for calculating the complex amplitude of the field at the output of the optical system for multimode laser radiation and separately for higher transverse modes.

References

1. Kogilnik H. Li T. // Proc. of the IEEE – 1966.-Vol.54. –P.1312–1329
2. Palma C., Bagini V. Expansions of general beams in Gaussian beams // Opt. Commun. – 1995. –Vol. 116. –P. 1–7.
3. Jacques Amaud. Representation of Gaussian beams by complex rays// Applied Opt. –1985. –Vol.24. –P.538-543.
4. Friberg A.T., Sudol R.J. Propagation parameters of Gaussian Schell–model beams // Opt. Commun. –1992. –Vol. 41. – P.383-387.
5. Simon R., Suflarshan E.C.G., Mukunda N. Generalized rays in first–order optics: transformation properties of Gaussian Schell – model fields // Phys. Rev. A. – 1984. – Vol. 29. – P. 3237-3279. Turunen J. Friberg A.T. Matrix representation of Gaussian Schell – model beams in optical systems // Optics and Laser and ABCD ray matrices // Opt. Lett. – 1991. – Vol. 16. – P. 196 – 198.
6. Belanger P.A. Beam propagation and the ABCD ray matrices // Opt. Lett. – 1991. – Vol. 16. – P. 196 – 198.
7. Gori F. II Opt. Commun. – 1983. – Vol. 46. – P. 149.
8. Gerard A., Burch J.M. Introduction to matrix methods in optics – 1978. –P 341.