

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

Институт физики высоких технологий
Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»
Кафедра лазерной и световой техники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка лабораторных макетов оптоволоконных датчиков

УДК 681.586.57

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В21	О. А. Никонова		

Руководитель

Должность	ФИО	Уч. степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЛИСТ	И. Ю. Зыков	к. ф.-м. н. доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. менеджмента	Е.А. Грахова			

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
зав. каф. ЛИСТ	А. Н. Яковлев	к. ф.-м. н. доцент		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники
P8	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике
P10	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности

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

Институт физики высоких технологий
Направление 12.03.02 «Оптотехника»
Кафедра лазерной и световой техники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ЛИСТ

_____ А. Н. Яковлев

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме

бакалаврской работы

Студенту

Группа	ФИО
4В21	Никоновой Ольге Александровне

Тема работы

Разработка лабораторных макетов оптоволоконных датчиков	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом готовой работы:	06. 06. 2016 г.
--------------------------------------	-----------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы [непрерывный, периодический, циклический и т. д.]; вид сырья и материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования [эксплуатации] объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)	Объект исследования – волоконно-оптические датчики. Предмет исследования – лабораторный макет на основе волоконо-оптического датчика. В работе создается оптическая и электрическая схемы макета, разрабатывается функциональная схема и габаритный чертеж, для реализации проекта из оргстекла с помощью материально-технической базы кафедры ЛИСТ ИФВТ НИ ТПУ. Апробация проекта будет проводиться после введения лабораторного макета в методическую базу указанной выше кафедры.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки и техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование	Аналитический обзор литературных источников, в частности зарубежных. Изучение и анализ теоретического материала по данной тематике. Поиск реализуемых в лабораторных условиях датчиков. Создание схемы будущего макета. Приобретение и приготовление необходимого оборудования для создания лабораторного стенда. Конструирование и испытание лабораторного

дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)	стенда.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Функциональная схема, габаритная схема, модель готового макета.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Е.А. Грахова, ассистент каф. менеджмента
Социальная ответственность	О.Б. Назаренко, д. т. н., профессор каф. ЭБЖ
Раздел ВКР на иностранном языке	

Названия разделов, которые должны быть выполнены русским и иностранным языках:

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01. 10. 2015 г.
---	-----------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЛИСТ	И. Ю. Зыков	к. ф.-м. н. доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B21	О. А. Никонова		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО		
4B21	Никоновой Ольге Александровне		
Институт		Кафедра	
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 Оптотехника
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:			
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения		<i>Макет волоконно-оптического датчика для лабораторных работ. Создавался в лаборатории 032 второго корпуса НИ ТПУ. Область применения: в качестве учебного оборудования для магистров кафедры ЛИСТ ИФВТ НИ ТПУ.</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения		<i>Вредные факторы:</i> - недостаток естественного света; - высокий уровень шума; - микроклимат; - напряжение зрительного аппарата; <i>Опасные факторы:</i> - излучение лазерного оборудования; - биологические эффекты (ожоги, кровоизлияние); - высокое напряжение в электрической цепи;	
2. Экологическая безопасность:		<i>Объект не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.</i>	
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:		<i>Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар на рабочем месте. Чтобы</i>	

	<i>избежать возгорания требуется соблюдать меры безопасности.</i> <i>Необходимо предусмотреть средства коллективной защиты и средства пожаротушения.</i>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<i>Рабочее место и расположение лазерных аппаратов обустраивается согласно ГОСТ Р-50723-94, СанПиН 5804-91.</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Проф. Каф. ЭБЖ	О. Б. Назаренко			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B21	О. А. Никонова		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО		
4B21	Никонова Ольга Александровна		
Институт	ИФВТ	Кафедра	ЛИСТ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:			
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих.		1. Заказчиком проекта является ТПУ и выполняется на материально-технической базе кафедры ЛИСТ ИФВТ. 2. Стоимость материально-технических ресурсов определяется в соответствии с информацией, представленной в научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов		Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»	
3. 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 научного уровня проекта; - В качестве оценки потенциала и перспективности реализации научно-исследовательской составляющей проекта провести SWOT-анализ проекта	
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований		- Организация и планирование проекта - Общий бюджет проекта	
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования		Оценка эффективности применения данного проекта после введения его в обучающую программу.	
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):			
1. График расчета бюджета проекта			
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику			

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Е.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B21	Никонова Ольга Александровна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 70 страниц, 17 рисунков, 15 таблиц, 22 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, оптоволокно, лазерный диод, датчик микроперемещений, датчик вибраций.

Объектом исследования являются волоконно-оптические датчики.

Целью работы является разработка лабораторного макета оптоволоконного датчика и его анализ.

Проектирование и сборка макета, а также все эксперименты проводились на материально-технической базе кафедры ЛИСТ ИФВТ НИ ТПУ.

В результате проделанной работы был создан лабораторный макет, пригодный для использования в образовательном курсе волоконной оптики у магистров кафедры ЛИСТ. Были выявлены сильные и слабые стороны разработки для дальнейшего усовершенствования модели.

Степень внедрения: макет волоконно-оптического датчика, созданный на базе кафедры ЛИСТ будет использоваться в качестве лабораторного стенда у магистров данной кафедры в курсе волоконной оптики. Он является более совершенной лабораторной установкой по сравнению с предыдущим аналогом.

Область применения: НИ ТПУ, ИФВТ, кафедра ЛИСТ.

В будущем планируется дальнейшее исключение недостатков имеющейся системы, а также разработка более совершенной системы регистрации сигнала для использования данного макета в качестве датчика вибраций.

Определения

В работе используются следующие термины:

Волоконно-оптический датчик - устройство из области волоконной оптики, созданное для детектирования физических величин

Световод - это устройство, ограничивающее область распространения оптических колебаний и направляющее поток световой энергии в заданном направлении.

OFDR - Optical Frequency Domain Reflectometry, или рефлектометрия частотной области

OTDR - Optical Time Domain Reflectometry, или оптическая рефлектометрия временной области

Лазерный диод – полупроводниковый лазер, построенный на базе диода.

Внутриволоконные брэгговские решетки – это распределенный отражатель, разновидность дифракционной решетки, сформированный в светонесущей сердцевине оптоволокна.

Обозначения и сокращения

ВОД – волоконно-оптический датчик;

ВОДД – волоконно-оптический датчик давления

ОВ – оптоволокно

ВБР – волоконная брэгговская решетка

Нормативные ссылки

СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение

ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

ГОСТ Р-50723-94. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий

ГОСТ Р 50723-94. Знак лазерной опасности и его рекомендуемые размеры

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	13
1. Обзор литературы	15
1.1. Типы волоконно-оптических датчиков.....	16
1.2 Датчики температуры на основе анализа обратно отраженного сигнала	18
1.3. Датчики на основе Брэгговских внутриволоконных решеток	26
1.4. Датчики на основе туннельного эффекта	30
1.5. Датчики температуры на основе полупроводниковых соединений	32
1.6. Амплитудный волоконно-оптический датчик давления.....	34
2. Теоретическая часть.....	37
3. Этап изготовления.....	42
4. Экспериментальная часть.....	48
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	52
5.1 Оценка научного уровня проекта	52
5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности научно-исследовательского проекта.....	53
5.3 Организация и планирование проекта	55
5.4 Линейное планирование	55
5.5 Бюджет проекта.....	57
5.5.1 Расчет материальных затрат	57
5.5.2 Расчет затрат на оборудование	57
5.5.3 Затраты на оплату труда.....	58
5.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы и отчисления во внебюджетные фонды.....	58
5.5.5 Накладные расходы.....	59

5.5.6 Формирование сметы бюджета затрат	60
5.6 Определение ресурсоэффективности проекта	61
Итоги раздела.....	63
6. Производственная безопасность.....	65
6.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.....	65
6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды.....	67
7. Экологическая безопасность.....	69
7.1 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	69
7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	71
Заключение	73
Список информационных источников и литературы.....	76
ПРИЛОЖЕНИЕ А	80

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптический тип датчиков сформировался как научно-техническое направление в начале 80-х годов 20-го века. Потребность в датчиках определяется развитием автоматизированных систем управления, а также внедрением инновационных технологических процессов. Современные датчики обладают высокими метрологическими характеристиками, высокой надежностью, долговечностью, стабильностью параметров, сравнительно небольшими габаритами и массой, незначительным энергопотреблением, совместимостью с микроконтроллерными средствами обработки данных. Именно такими характеристиками обладают волоконно-оптические датчики (ВОД).

Задачей дипломного проекта является разработка лабораторного макета «Оптоволоконный датчик перемещения».

Актуальность исследования. В современной электронной промышленности и приборостроении широко применяют волоконно-оптические измерительные системы.

Создание и совершенствование различных волоконно-оптических устройств и их компонентов, а также технологий изготовления непосредственно оптических волокон наиболее актуально. Применение данных технологий востребовано на производстве мелких деталей, имеющих отражающее покрытие (например, подшипники) для контроля показателей вибрации.

Объект и предмет исследования. Объектом данного исследования являются волоконно-оптические датчики. Предметом исследования выбран лабораторный стенд на основе волоконно-оптического датчика на одном и двух волокнах.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение качества волоконно-оптических измерительных систем за счет применения более совершенных датчиков микроперемещений. Для достижения цели решаются две задачи. Первая задача: рассмотреть известные методы измерения интенсивности излучения, а также способы оценки величины смещения зеркала. Вторая задача: разработать способ определения смещения зеркала на основании изменения величины обратного потока.

Новизна исследования. Разработаны новые структурная и электрическая схема установки для проведения лабораторного практикума «Оптоволоконные датчики перемещения». Предложена измерительная схема на основе подвижных зеркал.

Практическая значимость результатов исследования. Данная разработка вводится в образовательную программу магистерского курса по волоконной оптике, что улучшит разработанную лабораторную и методическую базу.

Реализация и апробация работы. Проведен обзор и сравнительная оценка характеристик различных типов ВОД, а также информационно-измерительных систем (ИИС) на их основе по заданию НПФ «Микроникс», г. Омск. Данные аналитического обзора используются при проведении работ по проектированию датчиков, способных работать в условиях нефтяных и газовых скважин, причем при температурах выше 80°C.

Поскольку данная отрасль более развита за рубежом, исследование современного состояния дел в области волоконно-оптических датчиков базируется, в основном, на информации из англоязычных источников.

Структура выпускной квалификационной работы. Структура ВКР подчинена цели и задачам исследования. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка источников использованной литературы и информационных источников.

1. Обзор литературы

Волоконно-оптические датчики – устройства из области волоконной оптики, созданные для детектирования таких величин как температура или механическое напряжение, а так же вибраций, перемещения, ускорения, вращения, давления, и концентрации химических веществ.

По сравнению с иными видами датчиков, оптоволоконные датчики имеют следующие преимущества:

- 1) электрически пассивные;
- 2) термически стабильные и коррозионностойкие;
- 3) устойчивые к электромагнитным помехам и радиационным воздействиям;
- 4) имеют разнообразные геометрические формы и размеры.

Наиболее распространенным типом датчиков являются датчики с амплитудной модуляцией, в которых внешнее воздействие модулирует интенсивность световой волны в выходном волокне датчика. В состав датчика входит источник света (чаще всего лазерный диод), волоконная линия, фотоэлемент и система модуляции (модуляционный элемент). Если систематизировать ВОД с точки зрения использования в них оптических волокон, то, как было уже замечено, можно грубо подразделить их на датчики, в которых волокно применяется в качестве линии передачи, и датчики, где оно применяется как чувствительный элемент. В ВОД вида «линии передачи» используются как правило многомодовые световоды, а в датчиках сенсорного типа обычно одномодовые.

Главными элементами оптоволоконного датчика считаются: оптоволоконно; излучающие (источник света) и приемные устройства; чувствительный оптический элемент. Кроме того, для связи между главными

компонентами, а также для создания измерительной системы с датчиком, нужны особые линии связи. Затем, для практического использования ВОД нужны компоненты системной техники, которые вместе с оптическими компонентами и линией связи создают измерительную систему.

Сегодняшние оптоволоконные датчики разрешают измерять большое количество физических параметров, таких как давление, температура, расстояние, расположение в пространстве, вращательная скорость, скорость линейного перемещения, колебательные движения, массу, волны (звуковые), уровень жидкости, деформацию и искажения поверхности, коэффициент преломления, электрическое поле и магнитное поле, ток, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т. д.

1.1. Типы волоконно-оптических датчиков

Волоконно-оптические датчики, как вид детекторов, был оформлен как одно из технических направлений совсем недавно: в начале 80-х годов 20-го века. В то же время образовался термин «волоконно-оптические датчики» (optical fiber sensors). Иными словами, ВОД – достаточно молодая область техники.

Необходимость датчиков быстро увеличивается из-за бурного развития автоматизированных систем управления и контроля, введением новых технологических процессов в производстве, переходом к гибким автоматизированным производствам. Кроме высоких требований к метрологическим характеристикам, датчики должны иметь высокую надежность, долговечность, стабильность, малые габариты, массу и энергопотребление, а также совместимость с устройствами микроэлектроники для обработки информации. Таким требованиям максимально удовлетворяют оптоволоконные датчики.

ВОД, исходя из принципа кодирования измеряемой информации, можно условно разделить на следующие большие группы:

– фазовые – это датчики, в которых используется высококогерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра;

– со спектральным кодированием – то есть датчики, где, в отличие от чисто фазовых, используется источник излучения с широким спектром с возможностью анализа всего спектра;

– амплитудные – или датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны;

– туннельные – датчики, где используется эффект туннелирования излучения через малый зазор;

– поляризационные – это датчики, использующие информацию о поляризации световой волны.

Классификация датчиков по принципу действия:

– интерференционные (Майкельсона, Фабри-Перо, Маха-Цандера и т. д.);

– распределенные (используют обратное и прямое рассеяние) ;

– люминесцентные;

– на внутриволоконных решетках;

– комбинированные.

Также можно классифицировать датчики по локализации измеряемого параметра:

– точечные – или датчики, отвечающие за измерения непосредственно в одной локальной точке;

– распределенные – это сенсоры, представляющие результаты измерений вдоль протяженной системы, существенно большей, чем в точечном случае;

– квазираспределенные – они представляют собой сеть точечных элементов, каждый из которых снимает показания в своей точке привязки.

1.2 Датчики температуры на основе анализа обратно отраженного сигнала

Физические воздействия на оптическое волокно (такие как температурные воздействия, давление или сила натяжения) в локальном пространстве меняют характеристики светопропускания и, в итоге, приводят к изменению параметров сигнала обратного отражения. В основе систем измерения, основанных на данных ВОД, используют сравнение спектров и интенсивностей первоначального излучения лазера, а также излучения, которое рассеялось в обратном направлении после того как оно прошло по оптоволокну.

Основные принципы измерения основаны на обнаружении обратного рассеяния света, например, на основе рэлеевского, рамановского и бриллюэновского рассеяний. Подобные системы способны измерять температуру с высокой степенью точности на значительных расстояниях, рисунок 1.1.

Световоды выполнены из легированного кварцевого стекла. Это стекло представляет из себя разновидность двуокиси кремния (SiO_2) с аморфной структурой, обладающей включением кристаллических упорядоченных структур. Воздействия температуры создают вибрации молекулярной решетки. После того как свет падает на молекулы возбужденные термически, происходит взаимодействие между фотонами и электронами. Таким образом, в волокне происходит рассеяние света, известное еще как рамановское рассеяние. У

рассеянного света есть спектральное изменение, эквивалентное частоте резонансных колебаний решетки.

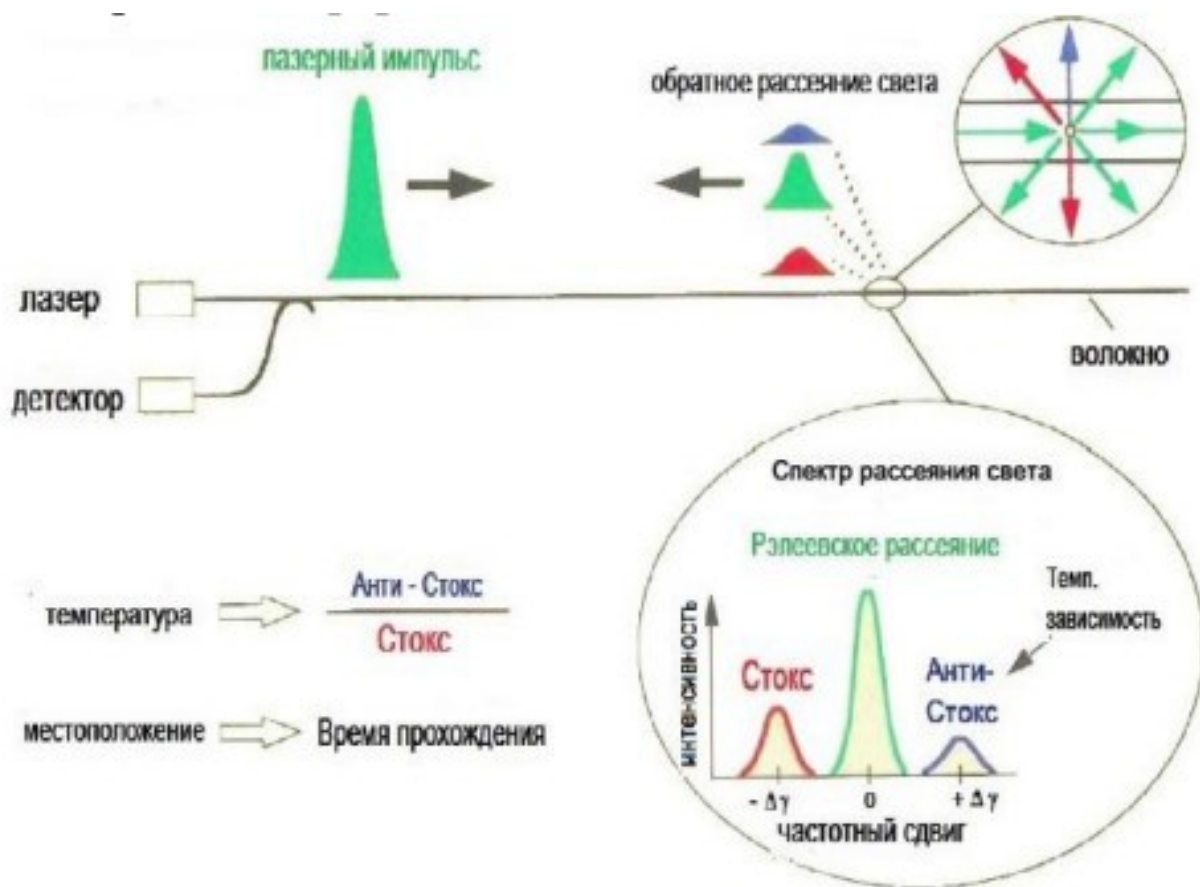


Рисунок 1.1 – Волоконно-оптическое измерение температуры на основе рамановского рассеяния, полученное отношением антистоксовой и стоксовой интенсивностей света

Отраженное рассеяние света состоит из некоторых спектральных компоненток:

- рэлеевское рассеяние, у которого длина волны аналогична используемой в лазерном источнике;
- стоксовы компоненты рамановского рассеяния, у которых длина волны больше, нежели у лазерного источника, при которых происходит испускание фотонов

– антистоксовы компоненты рамановского рассеяния, обладающие меньшей длиной волны в сравнении с рэлеевским рассеянием, при которых происходит поглощение фотонов.

Наблюдается температурная зависимость интенсивности рассеяния антистоксова диапазона, когда в это же время стоксов диапазон практически не зависит от температуры. Локальная температура световода получается из отношения антистоксовой и стоксовой компонент света [1].

Бриллюэновское рассеяние определяет так называемый порог SBS (Stimulated Brillouin Scattering), т. е. предел оптической мощности, которая может быть передана оптоволокну (типичное значение порога SBS для линии в 10 км примерно 6–10 дБм). При превышении данного порога возникает акустическая волна, под действием которой меняется показатель преломления, что в свою очередь вызывает рассеяние света. Интенсивная волна света, распространяющаяся в прямом направлении от источника, взаимодействует с более слабым рассеянным излучением и с молекулярными колебаниями волокна, за счет чего образуются продольные волны показателя преломления, которые движутся со скоростью звука (так называемые акустические фотоны). Часть начальной энергии от источника рассеивается на этих волнах в обратном направлении со сдвигом частоты (волна Стокса), формула (1.1):

$$\vartheta_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2n\gamma_A}{\lambda_0} \quad (1.1)$$

где n – показатель преломления; ω_A – частота акустической волны; γ_A – скорость звука; λ_0 – длина волны в вакууме.

Для длины волны в 1550 нм скорость акустической волны в кварцевом оптоволоке составляет примерно $\vartheta_A \approx 5 \cdot 10^3$ м/с, а само значение сдвига составляет $\vartheta_B \approx 10$ ГГц (порядка 0,1 нм).

Также стоит заострить внимание на зависимости предельного значения оптической мощности от длины оптического волокна (рисунок 1.2).

Кроме того, при использовании импульсных сигналов следует помнить, что при уменьшении длины импульса увеличивается энергия, необходимая для реализации бриллюэновского рассеяния. Это обуславливает уменьшение вероятности проявления данного эффекта при повышении скорости передачи данных.

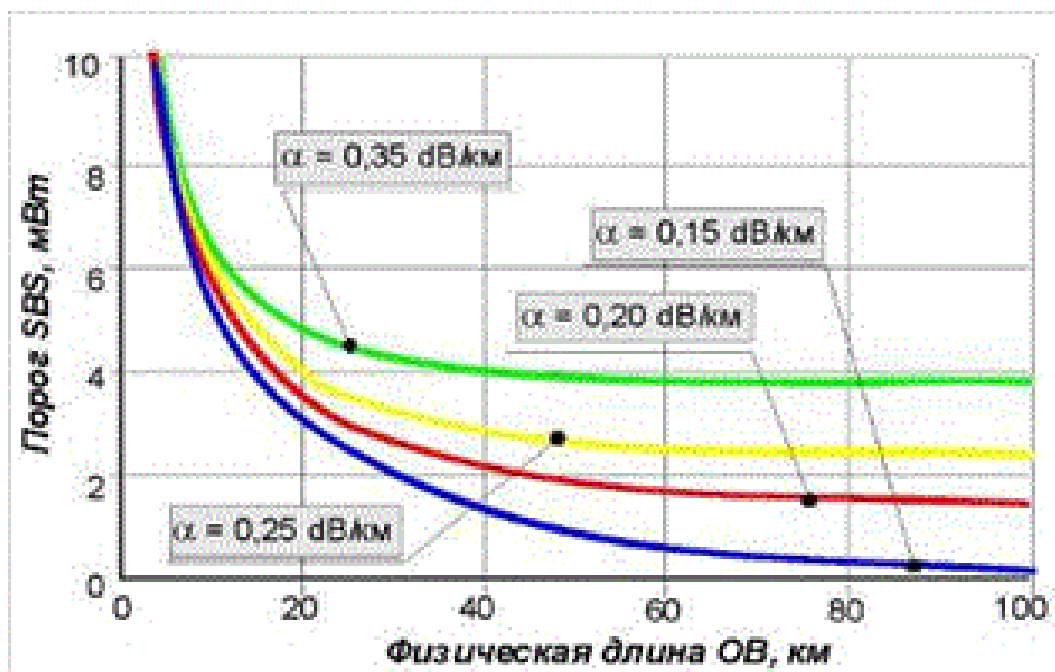


Рисунок 1.2 – Зависимость порога SBS от показателей волокна, где α – показатель ослабления

В таблице 1.1 приведен сравнительный обзор различных технологий волоконно-оптического измерения температуры. Из таблицы видно, что рэлеевское рассеяние показывает лучшую точность, но оно ограничено с точки зрения диапазона длины волокна, который очень важен для контролирования длинных кабелей. Рассеяние Бриллюэна же в свою очередь обеспечивает более широкий диапазон длины с самой высокой температурной чувствительностью и с относительно хорошим временем измерения. Рассеяние Бриллюэна может также измерять деформацию, которая не может быть измерена другими двумя

методами. Тем не менее, невозможно измерить температуру и деформацию одновременно. Поэтому рассеянию Бриллюэна, вероятно, будет отдаваться предпочтение в будущих разработках, в качестве замены рамановского рассеяния.

Таблица 1.1 – Сравнительный обзор различных технологий волоконно-оптического измерения температуры

Тип рассеяния	Релея	Рамана	Бриллюэна
Темп. Чувств., %/°C	0,54	0,8	0,01
Темп. Диапазон, °C	от 5 до 110	от 0 до 70	от -30 до 60
Точность, °C	1	10	1
Пространственное разрешение, м	1	3	от 3 до 5
Диапазон длин волокон, м	170	1000	51000
Время измерения, с	2,5	40	4
Деформация, мкм	-	-	100

Современнейшим оборудованием в системе отслеживания температурного распределения считается распределенный волоконный датчик в основе которого лежат рамановские линии. Этот подход позволяет исключить погрешности, связанные со всевозможными флуктуациями мощности зондирующего лазерного импульса. Системы такого вида способны работать на километровых расстояниях. Пространственное разрешение способно достигать 0,5 м.

Одним из наиболее известных методов обратного рассеяния можно считать OTDR (Optical Time Domain Reflectometry, или оптическая рефлектометрия временной области). В оптическое волокно вводится импульс, мощностью P_0 . Достигая некой локальной неоднородности, он отражается и

поступает обратно на вход. Учитывая, что коэффициент отражения неоднородности равен R , коэффициент затухания оптоволокна равен α и расстояние до неоднородности равно l , можем получить мощность отраженного импульса, формула (1.2):

$$P_r = P_0 R \cdot 10^{\frac{\alpha l}{5}}. \quad (1.2)$$

Длительности входящего и отраженного импульсов будут равны, а временной интервал между ними определяется эквивалентным показателем преломления сердцевины оптоволокна и рассеянием до отражающей неоднородности, формула (1.3).

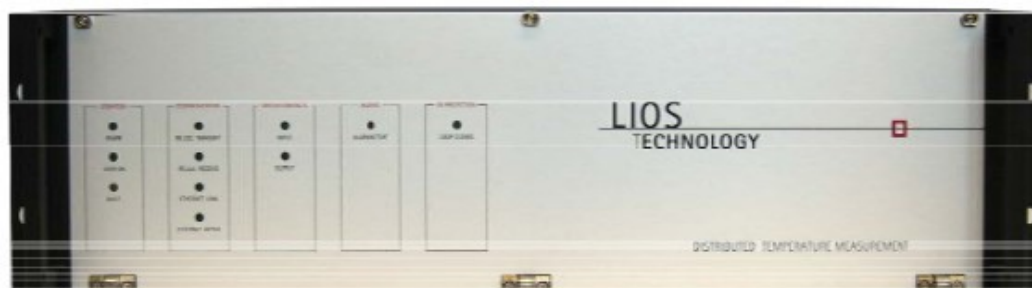
$$t = \frac{2l \cdot n_1}{c}. \quad (1.3)$$

Распределенный в локальной области температурный датчик Рамана с техникой OTDR может реализовываться только с помощью мощных, а значит и дорогих импульсных лазеров (как правило это лазеры с твердым активным веществом) и быстрой, опять же дорогостоящей, техникой передачи сигналов, поскольку по сравнению с рэлеевскими компонентами сигнал рамановского рассеивания слабее примерно на 3 порядка.

Датчик температур Рамана OFDR (OFDR, Optical Frequency Domain Reflectometry, или рефлектометрия частотной области), разработанный на базе компании «LIOS Technology GmbH», работает не в диапазоне времени, как OTDR, а в диапазоне частот, рисунок 1.3.

При использовании метода OFDR получаемая информация докладывает об изменении температуры на локальном участке, если сигнал обратного рассеяния, который обнаруживается в течение всего времени измерения, может быть измерен как функция частоты и в комплексе (как комплексная передаточная функция), а затем подвергается Фурье преобразованию. Значительными достоинствами техники OFDR считаются режим

квазинепрерывного лазерного излучения и обнаружение оптического сигнала обратного рассеивания в узкой полосе, что влечет за собой достижение намного более высокого отношения сигнал/шум, чем при использовании импульсной техники.



■ Модели	OTS20P, OTS40P, OTS60P, OTS80P, OTS100P OTS120P, OTS140P, OTS160P
■ Диапазон	от 2 до 16 км (один конец)
■ Пространственное разрешение	от 1.5 м до 0.5 м
■ Каналы измерения	1, 2, 3, 4, 6, 8 (опции)
■ Температурное разрешение	меньше 1.0 K

Рисунок 1.3 – «LIOS Technology GmbH» температурный датчик Рамана OFDR

Это техническое достоинство позволяет применять относительно дешевые лазерные диоды (полупроводниковые), а также недорогие электронные блоки передачи сигналов. В противовес им идет измерение комбинационного рассеиваемого света (комплексное измерение согласно с величиной и фазой), которое является технически сложным, и сильная затратная часть в связи с использованием блока преобразования Фурье (БПФ), который необходим для обработки сигнала с более завышенными требованиями к линейности электронных блоков.[2].

Структура оптоволоконной системы температурных измерений состоит из блока, формирующего сигнал, с генератором частот, лазера, оптического модуля, блока приема сигнала и блока микропроцессора, и оптоволоконного кабеля (кварцевое волокно) в качестве линейного температурного датчика.

Согласно с методом OFDR, интенсивность когерентного источника излучения в течение промежутка времени измерения генерируются синусообразно, а частота отображается в виде линейной модуляции частот. Частотное отклонение является основной причиной для местного срабатывания рефлектометра.

Модулированный по частоте поток, идущий от лазера, попадает в световод. В любой из точек, расположенных вдоль волокна, возникает комбинационный рассеянный свет, который излучается во всех направлениях. Часть этого света движется обратно, в направлении к блоку, формирующему сигнал. После чего проводится фильтрация спектра обратного рассеивания, преобразование его в электрические сигналы в измерительных каналах, усиление и электронная обработка. Расчет преобразования Фурье проводит микропроцессор.

Как промежуточный результат получают кривые обратного комбинационного рассеивания как функция длины кабеля. У кривых обратного рассеивания амплитуда является пропорциональной интенсивности соответствующего комбинационного рассеяния. Из соотношения кривых обратного рассеивания получают температуру волокна вдоль оптического кабеля. Ограничение термической стойкости стекловолоконного покрытия касается максимального диапазона температуры световодного кабеля. Стандартные волокна, используемые в передаче данных, располагают покрытием из акрила или же покрытием, которое затвердело в результате излучения ультрафиолетового диапазона, и пригодны для диапазона температур до 80°C. Стекловолокно с полиамидным покрытием может использоваться до температуры 400°C максимум.

1.3. Датчики на основе Брэгговских внутриволоконных решеток

Одними из главных и популярных видов ВОД считаются датчики, в основе которых расположены внутриволоконные брэгговские решетки. Эти решетки представляют из себя брэгговское зеркало, а конкретно структуру с определенным периодом показателя преломления, изготовленную собственно в сердечнике оптического волокна. Подобная структура отражает свет в узком спектральном диапазоне.

Как сказано ранее, значимым свойством такой решетки считается способность отражать световой поток в узком спектральном диапазоне.

Создано много разных методов конструирования чувствительных систем на основе брэгговских решеток. В простом случае чувствительная система представляет из себя точечный датчик, который присоединен через оптический разветвитель к источнику светового сигнала и к блоку анализатора, рисунок 1.4.

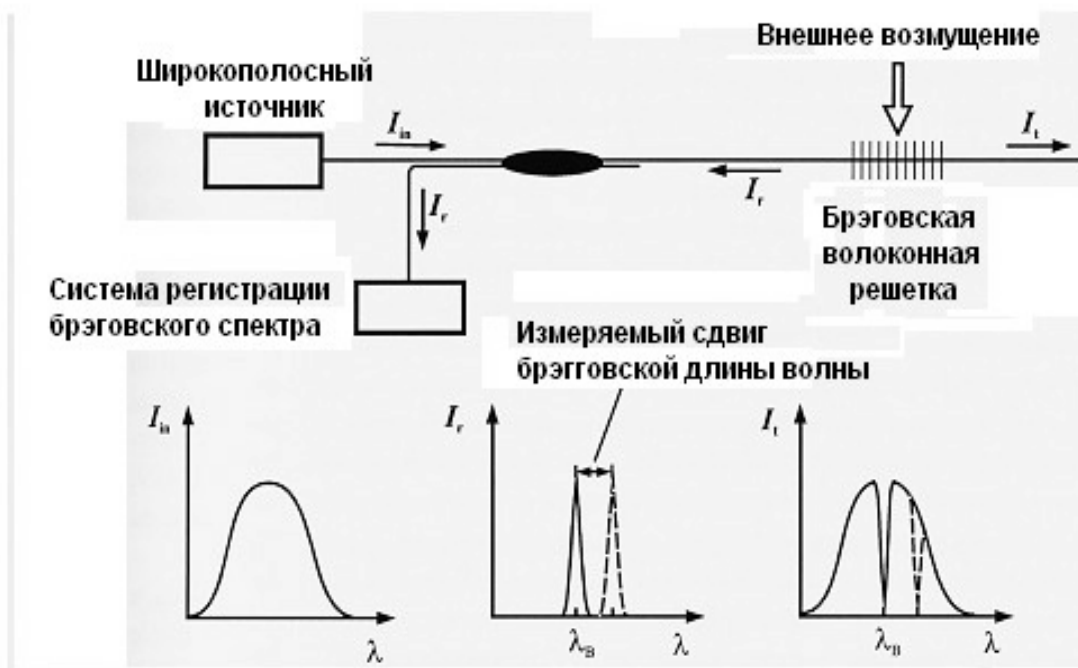


Рисунок 1.4 – Схема простейшего волоконно-оптического брэгговского датчика

Сигнал пришедший от источника излучения отражается чувствительным элементом. Длина волны отраженного света фиксируется блоком анализатора. Обычно этот анализатор представляет из себя спектрометр, работающий в узкой полосе. Также существуют спектрометры различных видов: от стандартных дифракционных, где в роли дисперсионного элемента используют дифракционную решетку, до анализаторов на основе интерферометра Фабри-Перо.

Одно из преимуществ ВОД считается их сравнительно легкая возможность объединения в массивы (мультиплексирование). Существует три основных вида мультиплексирования – по длине волны (Wavelength Division Multiplexing – WDM), частотное мультиплексирование (Frequency Division Multiplexing – FDM) и мультиплексирование по времени (Time Division Multiplexing – TDM).

Мультиплексирование по длине волны

Волоконные решетки являются практически единственным типом сенсорных элементов, которые легко могут быть объединены в массивы путем мультиплексирования по длине волны. Для этого каждый сенсорный элемент записывается со своим уникальным периодом, что позволяет различать их по спектру при анализе и, соответственно, фиксировать показания каждого сенсора отдельно. Количество сенсоров в массиве, в основном, ограничивается спектральной шириной источника и динамическим диапазоном анализатора.

Объединение путем частотного разделения каналов

Объединение сенсоров посредством разделения по частоте. Такое объединение характерно, в основном, для небрэгговских, интерференционных волоконных сенсоров, в которых использование мультиплексирования по длине волны затруднительно. Однако подобное частотное объединение может быть

использовано и для брэгговских сенсорных систем, например, как составная часть более сложной схемы.

Мультиплексирование путем разделения каналов по времени

Мультиплексирование по времени основано на анализе скорости прохождения сигнала по системе. Каждый датчик разделен участком волоконного световода, для прохождения которого сигналу требуется определенное и известное заранее время. Источник посылает короткий импульс в систему. Сигнал на выходе представляет собой ряд импульсов, дифференцированных по времени, каждый из которых несет информацию о состоянии каждого сенсора в отдельности. В чистом виде такая система мультиплексирования также редко используется для объединения брэгговских волоконных датчиков, однако как составная часть более сложной системы встречается довольно часто [3].

Обычно в качестве примеси к кварцевому стеклу в сердцевине оптического волокна использовался германий, который обеспечивал увеличение показателя преломления сердцевины. Однако в начале 90-х годов Константин Голант из «Научного центра волоконной оптики» при «Институте общей физики им. А.М. Прохорова» решил применять для производства волокна плазмохимическую технологию, а в качестве примеси, заменяющей дорогостоящий германий, использовал более дешевый азот.

Первое «азотное» волокно, подходящее для телекоммуникационной индустрии, было получено в 1994 году, а год спустя результаты данных разработок были представлены на крупнейшей международной конференции по оптической связи и опубликованы в ведущих мировых научных журналах. Это четко обозначило приоритеты команды Голанта и привлекло источники финансирования проекта.

В ходе испытаний данного инновационного волокна, ученые решили использовать его как датчик температур на основе брэгговских решеток. Технология размещения решеток в волокне и принципа измерения температуры остались неизменными. Однако результаты испытаний показали, что брэгговская решетка на волокне, легированном азотом, сохраняется при температуре до 1000°C , в то время как на обычных волокнах решетка исчезает при температуре около 300°C [4].

Как показывает анализ зарубежных исследований в области волоконно-оптических датчиков, наибольшее предпочтение отдается именно методу брэгговских решеток, поскольку их температурные пределы много выше, нежели у других методов. Например, в ходе совместного австралийско-индийского проекта, Джон Кэннин, Майкл Стивенсон, Сомна Бэндиподьяй и Кевин Кук улучшили свойства брэгговских решеток путем использования германосиликатного волокна с добавлением бора. Позже, экспериментируя со способами нагрева системы, ученые добились сохранения свойств решетки при температуре 1295°C , однако при этом увеличилась хрупкость самого оптоволокна и было зарегистрировано фрагментарное разрушение волокна. Данная работа открывает еще больший спектр возможностей применения волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток и ставит вопрос уже об улучшении термических свойств непосредственно волокна [5].

Столь высокие показатели термоустойчивости справедливы для лабораторных испытаний, однако в условиях реальных нефтяных или газовых скважин, во-первых, необходима достаточная длина оптического канала связи, во-вторых, не требуются столь высокие температуры (около 100°C). Американский ученый Алан Керси опубликовал в своей статье информацию о разработке датчика Cidra, за основу которого взяты брэгговские решетки, устойчивого к температурам до 200°C , испытанного в реальных условиях. Таким образом, подтверждается актуальность разработок в данном направлении [6].

1.4. Датчики на основе туннельного эффекта

Одним из видов ВОД, в частности ВОД давления, является датчик на основе оптического туннельного эффекта. Его суть заключается в проникновении оптического излучения в материал на глубину порядка длины волны излучения. Изменение состояния материала в пределах данной длины волны ведет к изменению параметров оптического излучения [7].

Рассмотрим простейшую схему действия датчика данного типа, рисунок 1.5.

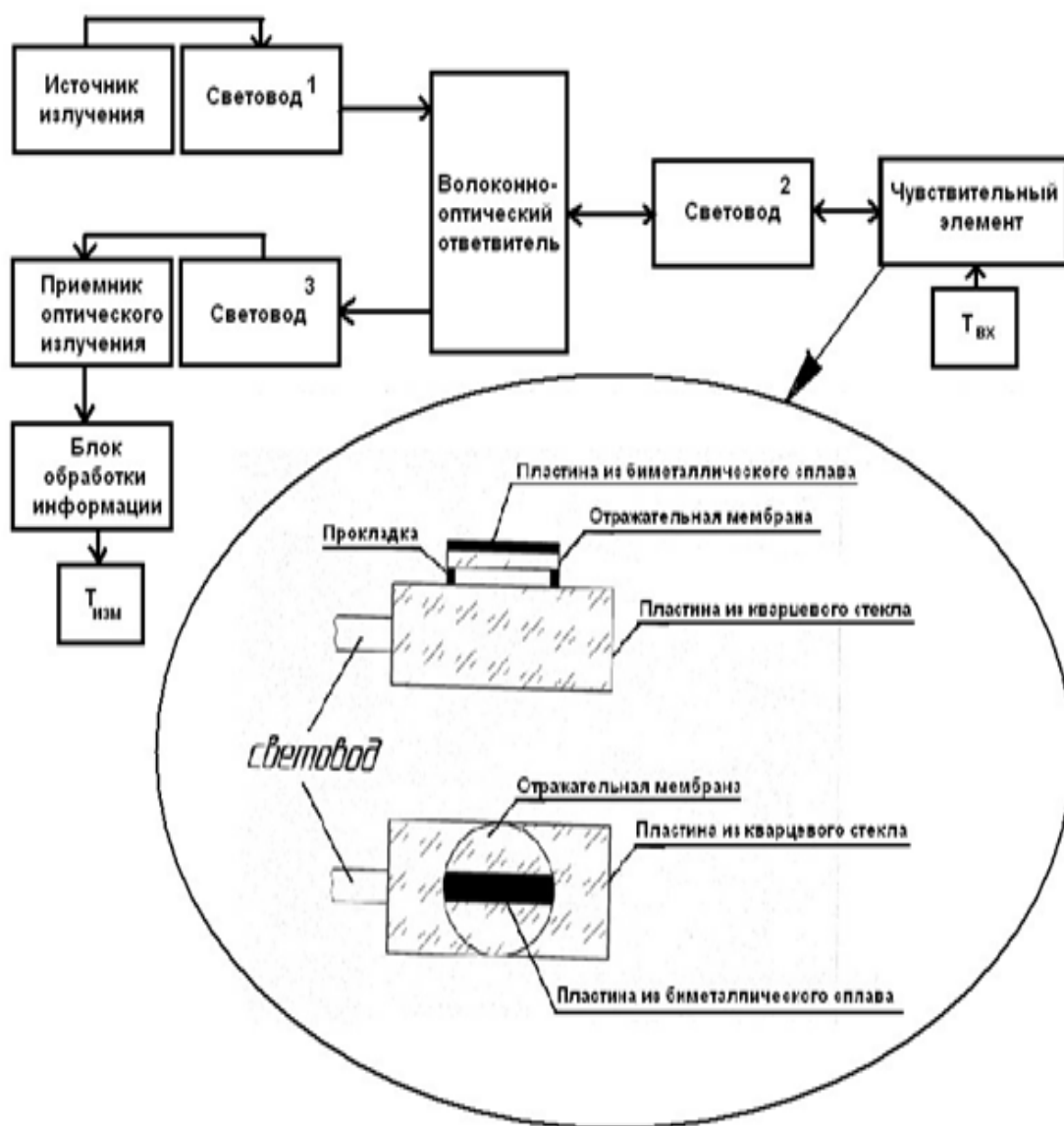


Рисунок 1.5 – Устройство датчика на основе туннельного эффекта

Датчик температуры на основе оптического туннельного эффекта работает следующим образом. Источник оптического излучения генерирует оптическое излучение заданной мощности и подает его в световод 1, который передает оптическое излучение к волоконно-оптическому ответвителю. Волоконно-оптический ответвитель обеспечивает передачу оптического излучения из световода 1 в световод 2. По световоду 2 оптическое излучение вводится в пластину из кварцевого стекла. В зависимости от зазора между пластиной из кварцевого стекла и отражательной мембраной, за счет оптического туннельного эффекта, часть оптического излучения покинет пластину. Зазор между мембраной и пластиной может меняться в результате деформации пластины из биметаллического сплава, возникающей из-за воздействия температуры $T_{ВХ}$, что приводит к изменению потока оптического излучения, передаваемого к приемнику оптического излучения.

Уменьшение зазора приводит к все большему проникновению оптического излучения в отражательную мембрану и поглощению оптического потока. Оптическое излучение, которое останется в пластине из кварцевого стекла, отразившись от грани, расположенной напротив световода 2, вернется обратно в световод 2 и через волоконно-оптический ответвитель попадет в световод 3, а затем на приемник оптического излучения, где преобразуется в электрический сигнал. Блок обработки информации преобразует электрический сигнал в измеренное значение температуры $T_{ИЗМ}$.

Если изменить чувствительный элемент, изъяв из него биметаллическую пластинку, а взамен оставив в нем мембранный блок, в который входят мембрана и несущая ее деталь, штуцер, блок оптических волокон, в котором одни, срезанные под некоторым углом концы подводящих и отводящих оптических волокон расположены во втулке на детали треугольной формы и прижаты крышкой, а другие концы оптических волокон подстыковываются к источнику излучения и приемнику излучения, то данный датчик может служить уже датчиком давления [8].

Датчики данного типа обладают характерными недостатками: высокая температурная погрешность, обусловленная изменением геометрических параметров датчика (в частности, изменение начального расстояния между мембраной и торцом оптических волокон) а также низкая чувствительность преобразования и малая глубина модуляции оптического сигнала в связи с потерями в зоне измерения из-за расхождения светового потока в пределах апертурного угла оптического волокна.

Однако, запатентованный Мурашкиной Т. И. волоконно-оптический датчик давления (RU 2474798) максимально уменьшает данные недостатки и позволяет работать датчику в экстремальных условиях (от минус 100°C до 500°C) [9].

1.5. Датчики температуры на основе полупроводниковых соединений

Одним из видов ВОД температуры могут по праву считаться датчики амплитудного типа, где анализ прошедшего или отраженного света производится за счет температурной зависимости поглощения или отражения среды. При изготовлении этих датчиков обычно используют эффект сдвига края зоны собственного поглощения в полупроводниках от температуры. Сдвиг края зоны собственного поглощения в полупроводниковых компонентах обусловлен зависимостью ширины запрещенной зоны материала от температуры.

В производстве датчиков используется целый ряд полупроводниковых материалов, таких как, к примеру, арсенид галлия (GaAs), фосфид индия (InP), кремний (Si), у которых край зоны собственного поглощения находится в области (спектральной) прозрачности кварцевых оптических волокон в диапазоне от 0,6 до 1,6 мкм. Изменения ширины запрещенной зоны в зависимости от температуры ε_g характеризуются коэффициентом $\chi = d\varepsilon_g/dT$,

где T – температура в градусах Цельсия; ε_g – ширина запрещенной зоны полупроводника. Длина волны λ_g связана с шириной запрещенной зоны соотношением $\lambda_g = hc/\varepsilon_g$. Для указанных выше полупроводниковых материалов значения χ лежат в пределах от (минус 2,4 до 5) 10^{-4} эВ/°К. В таком случае коэффициент сдвига края зоны собственного поглощения в зависимости от температуры составляет, выражение (1.4):

$$k = \frac{d\lambda_g}{dT} = -\frac{hc}{\varepsilon_R^2} \frac{d\varepsilon_g}{dT} = 0.1 + \frac{0.4_{\text{нм}}}{^{\circ}\text{C}}. \quad (1.4)$$

В основу первых температурных датчиков такого вида легли полупроводниковые соединения GaAs и CdTe. Чувствительный элемент этого ВОД выполнен в виде пластины полупроводника, которая зажата между двумя световодами, один из них входной (по нему поступает свет от источника), и выходным, который соединен другим концом с приемным устройством. Датчик работает на длине волны $\lambda = 0,88 \pm 0,15$ мкм. Рабочий температурный диапазон этого датчика составляет от минус 10°С до 300°С, при этом погрешность измерений составляет не более $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а быстродействие не уступает показателю в 2 с. Основными преимуществами датчика можно признать: пассивность, отсутствие чувствительности к электромагнитным полям, дистанционность и защита от помех канала передачи, а также простота изготовления, малый вес и габариты [10].

Как показали исследования, область применения таких датчиков во много раз расширятся, если погрешность измерений составит не более $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от минус 100 до 350°С. Чувствительный элемент представляет собой отрезок световода из полупроводникового материала, выполненный в виде призмы, расположенной на кремниевой подложке. Оптическое согласование чувствительного элемента со световодами осуществляется с помощью канавок, изготовленных на этой же подложке, в которые укладываются и закрепляются световоды.

1.6. Амплитудный волоконно-оптический датчик давления

Известны волоконно-оптические датчики давления, выполненные из оптического волокна, преимущественно многомодового, содержащего участок ввода излучения, собственно чувствительный элемент и участок вывода излучения. Чувствительный элемент таких датчиков состоит из одного или нескольких участков изогнутого с определенным радиусом оптического волокна.

Принцип работы таких датчиков основан на изменении мощности оптического излучения, прошедшего через оптическое волокно (ОВ) при воздействии давления в плоскости изогнутого волокна. Такие датчики относятся к амплитудным датчикам. В волоконно-оптических датчиках в общем случае происходит увеличение сигнала при выпрямлении ОВ или его затухание при уменьшении радиуса изгиба.

Причины изменения мощности оптического сигнала в известных волоконно-оптических датчиках давления (ВОДД) связаны с двумя факторами:

- при изменении радиуса изгиба возникают изменения локальной числовой апертуры распространяющегося по оптоволокну излучения и потери энергии за счет утечки из оптического волокна высших мод;
- при поперечном давлении на ОВ возникают микроизгибные деформации оболочек ОВ, которые приводят к возникновению взаимодействия распространяющихся по оптоволокну мод. За счет взаимодействия мод происходит перекачка энергии из низших мод к высшим и возникновение вытекающих мод, приводящих к потерям энергии. В известных ВОДД для контроля давления используется как первый эффект, так и второй или оба эффекта совместно [11].

Наиболее близким аналогом является известный волоконно-оптический датчик давления, выполненный на основе оптического волокна, содержащего

участки ввода и вывода излучения, а также участок, размещенный в резиновом корпусе прямоугольного сечения, внутри которого размещена проволочная решетка, при этом оптическое волокно проходит по площади корпуса, изгибаясь и переплетаясь с проволокой решетки.

В этом датчике проволочная решетка фактически является чувствительным элементом ВОДД. Кроме того, проволочная решетка армирует резиновый корпус. Под воздействием внешнего давления происходит продавливание резины, вызывающее множественный изгиб волокна в местах пересечения ОВ и проволоки. Этих пересечений в известных ВОДД множество. В совокупности изгибы ОВ приводят к уменьшению мощности сигнала на его выходе.

При создании чувствительного элемента ВОДД прежде всего обеспечивают необходимую чувствительность измерений dA/dP , диапазон изменения зависимости $A = f(P)$, где P – мощность оптического сигнала, A – амплитуда выходного сигнала ВОДД, требуемую погрешность измерений и надежность его функционирования.

Повышение чувствительности и надежности датчика при длительной эксплуатации в условиях больших нагрузок за счет формирования чувствительного элемента датчика с наименьшим количеством изгибов ОВ и минимальными механическими нагрузками в местах изгиба оптоволокна достигается тем, что данный ВОДД содержит участки ввода и вывода излучения, а также участок, размещенный в пропускном канале резинового корпуса прямоугольного сечения. При этом участки ввода и вывода излучения оптического волокна пропущены через металлический рукав, а пропускной канал включает, по меньшей мере, один участок для размещения оптического кабеля параллельно основанию корпуса, выполненный в виде паза с рифленой поверхностью в основании, причем оптическое волокно в пазу прижато к вершинам выступов рифленой поверхности пластиной из термостойкой резины.

Можно сделать вывод, что каждый из методов, рассмотренных в данном обзоре, обладает своими недостатками и преимуществами. Но что касается применения ВОД для индикации микроперемещений, в рассмотренных информационных источниках такое рассмотрение не приводится. Поэтому в ходе дальнейшей работы решаются задачи по разработке и применению высококачественных датчиков микроперемещений.

2. Теоретическая часть

Качество работы любого прибора определяется его высокими характеристиками и параметрами. Для проектируемого вида волоконно-оптического датчика одними из главных его характеристик, по которым можно определить его пригодность для использования в тех или иных целях, является абсолютная и относительная чувствительность.

Для волоконно-оптического датчика микроперемещений под абсолютной чувствительностью понимают изменение сигнала на приемном устройстве (изменение напряжения в нашем случае) при перемещении объекта (зеркала) на какое-либо расстояние:

$$\frac{dU}{dl} \quad (2.1)$$

При перемещении объекта меняется функция пропускания датчика:

$$T = \frac{P_{\pi}}{P_0} \quad (2.2)$$

где P_{π} – мощность, регистрируемая приемником;

P_0 – мощность источника [12]

Изменение функции пропускания датчика при изменении расстояния на dl называется относительной чувствительностью датчика:

$$\eta_{от} = \frac{dP_{\pi}}{dl \cdot P_0} \quad (2.3)$$

Относительная чувствительность зависит от конструкции датчика и позволяет сравнивать датчики различных конструкций. Относительная чувствительность измеряется в мкм^{-1} .

Рассчитаем узел согласования источника света со световодом, поскольку этот узел влияет на абсолютную и относительную чувствительность датчика, и поэтому подлежит тщательному анализу.

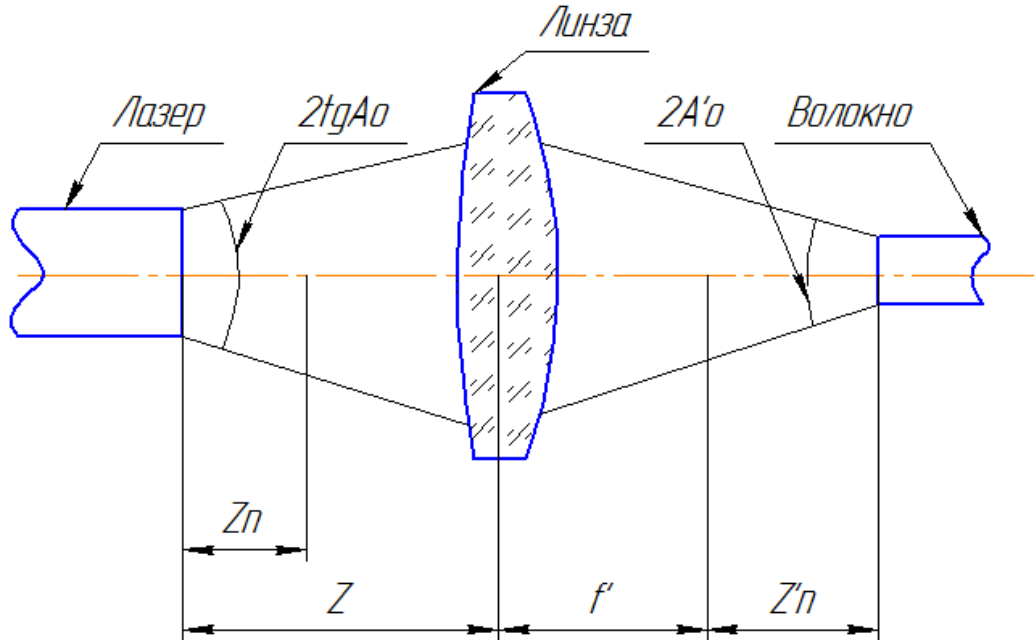


Рисунок 2.1 – Схема узла согласования источника света со световодом

Излучение от лазера фокусируется линзой и вводится в передающее кварц-полимерное волокно с диаметром 1 мм. Найдем $d'_0, 2 \tan A'_0, I'_0$ по формулам:

$$d'_0 = \frac{d_0 \cdot f'}{z - f'}; \quad (2.4)$$

$$2 \tan A'_0 = \frac{d_0}{f'} + 2 \tan A_0 \frac{(z - f')}{f'}; \quad (2.5)$$

$$I'_0 = d_0 \cdot 2 \tan A'_0, \quad (2.6)$$

где d_0 – это диаметр пучка лазера, равный 3 мм; f' – фокусное расстояние линзы, равное 35 мм; $2 \tan A_0$ – угловая расходимость пучка, равная 0,003; z – расстояние от линзы до пучка.

Учитывая, что в дальнейшем для проектируемой схемы понадобится светоделительный куб с размерами 20х20 мм, а также для соблюдения компактности установки, примем расстояние z примерно за 60 мм. Исходя из этого, получим $d'_0 = 4,2$ мм; $2 \tan A'_0 = 0,092$; $I'_0 = 3,09$ (мм · рад).

Основным параметром излучения лазера является яркость источника B , которая определяется по формуле:

$$B = \frac{I}{S \cdot \Omega}, \quad (2.7)$$

где I – мощность источника, S – площадь излучения, Ω – телесная угловая расходимость излучения [13].

Для используемого лазерного диода значение яркости составляет

$$B = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,003} = 3,32 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \right) \quad (2.7)$$

Теоретический расчет узла перехвата отражённого пучка и согласования его с приемником.

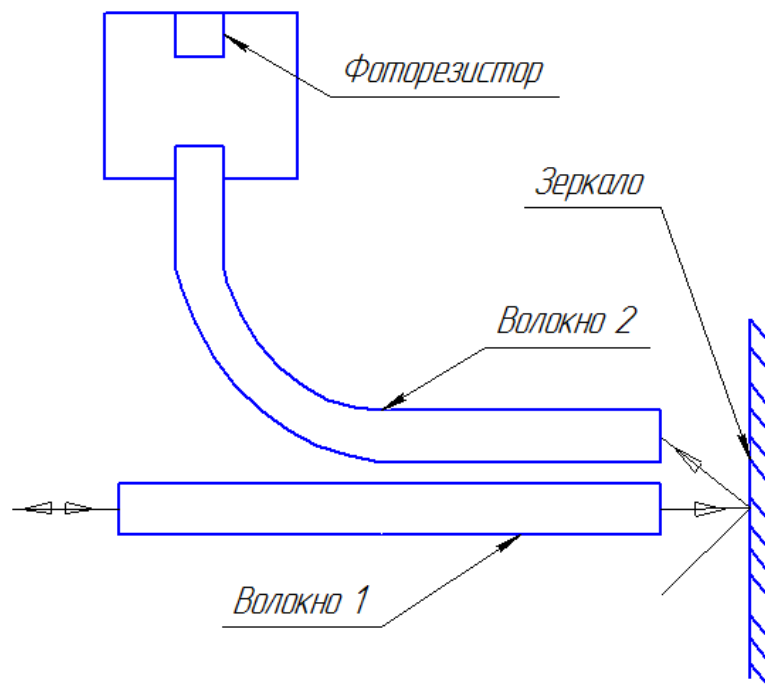


Рисунок 2.2 – Схема узла перехвата отраженного пучка

Излучение от источника попадает на торец волокна 1, которое передает излучение на зеркало. Этот же световод принимает прямо отраженное излучение от зеркала. Излучение, отраженное под углом от зеркала, попадает в световод 2. Оба световода сопряжены с фоторезисторами, которые преобразуют полученный сигнал в электрический и подают его на мультиметры.

При перемещении зеркальной поверхности меняется величина потока, попадающего в световоды, т. е. изменяется величина регистрируемого сигнала. Интенсивность света в первом волокне равна I_0 , расходящийся световой пучок равен $2\varphi_0$, диаметр световода равен d_c . Исходя из этого, интенсивность излучения во втором волокне будет определяться согласно формуле [13]:

$$I_1 = \frac{I_0 \cdot \pi d_c^2}{S \cdot 4} = 6 \frac{I_0 \cdot d_c^2}{(d_c + 2\varphi_0 \cdot 2l)^2}. \quad (2.7)$$

При изменении расстояния Δl , интенсивность света в выходном (втором) волокне будет равна:

$$I_2 = \frac{I_0 \cdot \pi d_c^2}{S \cdot 4} = 6 \frac{I_0 \cdot d_c^2}{(d_c + 4\varphi_0 \cdot (l - \Delta l))^2}. \quad (2.8)$$

Абсолютная чувствительность равна $\frac{\Delta I}{\Delta l}$, где $\Delta I = I_1 - I_2$. Относительная чувствительность равна $\frac{\Delta I}{\Delta l \cdot I_0}$, и когда $d_c \rightarrow 0$, то относительная чувствительность стремится к $\frac{1}{l}$.

Для повышения чувствительности датчика необходимо придерживаться правила исключения шумов [14]. Для этого вводится понятие коэффициента шума, при помощи которого можно определить чувствительность. Он определяется по формуле:

$$N = \frac{I_c}{I_{ш}}, \quad (2.7)$$

где I_c – интенсивность сигнала, находящаяся по формуле 2.7, а $I_{ш}$ – это интенсивность шума, равная $\sqrt{I_c \cdot \Delta f}$.

Отсюда получим, что коэффициент шума находится по формуле:

$$N = \frac{d_c}{d_c + 2\varphi_0 \cdot 2l} \cdot \Delta f \cdot \sqrt{6I_0}. \quad (2.8)$$

Из последнего выражения видно, что для повышения чувствительности необходимо использовать передающий световод с большой числовой апертурой $\tan \varphi_0$ и маленьким диаметром световода d_c .

При анализе узла согласования источника света со световодом можно сделать вывод, что использование лазерного диода может удовлетворять требованиям, применяемым к качеству данной системы. Лазерный диод является малозумящим источником, что повышает чувствительность, и он обладает довольно высокой яркостью и малой угловой расходимостью.

3. Этап изготовления

Структурная схема измерительной системы показана на рисунке 3.1.

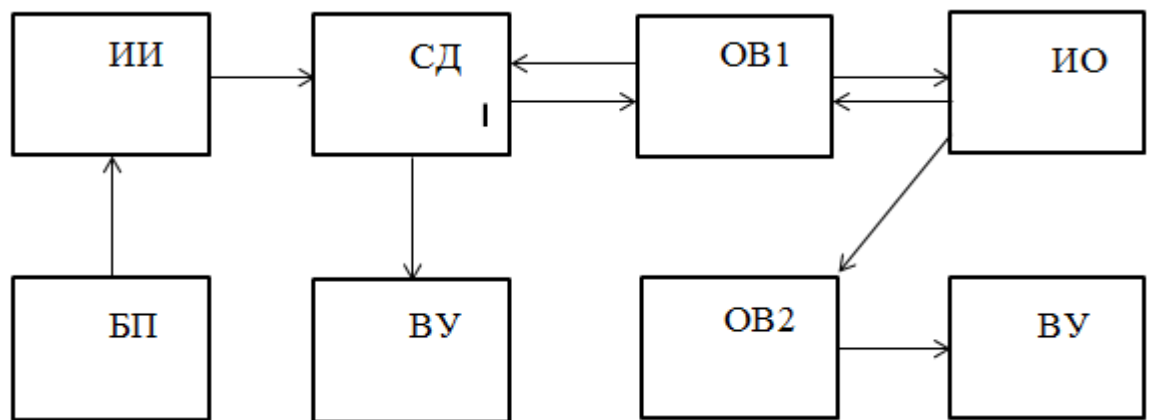


Рисунок 3.1 – Структурная схема измерительной системы

Она состоит из: БП – блок питания; ИИ – источник излучения; СД – светодетектор; ОВ1 – оптоволокно 1, ОВ2 – оптоволокно 2; ИО – исследуемый объект; ВУ – выходное устройство (система фоторезистор-мультиметр).

Блок питания питается от сети переменного тока 220 В и вырабатывает напряжение 3 В для питания лазерного диода, рисунок 3.2.

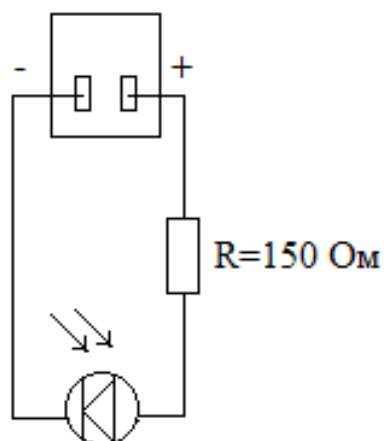


Рисунок 3.2 – Схема питания лазерного диода

В качестве источника излучения используется лазерный диод 1, являющийся источником когерентного монохроматического света,

потребляющим мало мощности. Работа лазерного диода основана на возникновении инверсии в области полупроводникового перехода в результате инжекции носителей заряда. Для его питания была спроектирована и изготовлена схема питания с подключением к USB разьему через резистор с сопротивлением в 150 Ом (рисунок 3.2).

Рассмотрим функциональную схему установки, рисунок 3.3.

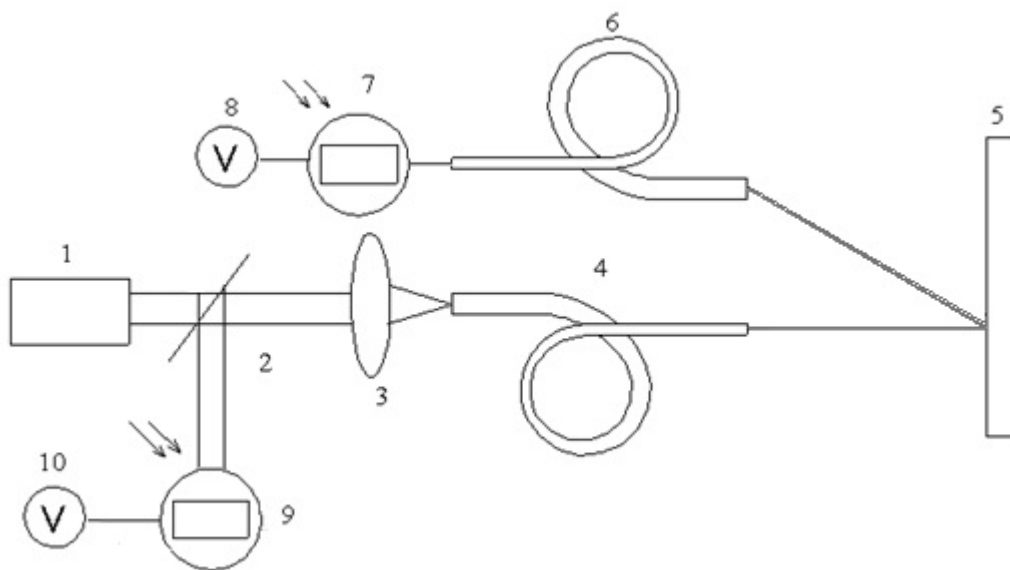


Рисунок 3.3 - Функциональная схема

Излучение от лазерного диода 1 попадает на светоделительный кубик 2. Часть излучения отразится под углом 90° и не будет использоваться в данной системе, другая часть излучения пройдет через кубик – это будет считаться входным сигналом.

Входной сигнал после светоделительного кубика попадает на фокусирующую линзу 3 с фокусным расстоянием 35 мм. Сфокусированный пучок подается на вход оптического волокна 4, пройдя по которому, выводится в направлении исследуемого объекта 5.

Часть отраженного от исследуемого объекта сигнала возвращается на торец волокна 4 и проходит аналогичный обратный путь вплоть до

светоделительного кубика 2. После чего искаженный сигнал попадает на фоторезистор 9 и регистрируется с помощью мультиметра 10.

Помимо прямо отраженного излучения, которое возвращается в волокно 4, часть сигнала отразится под каким-то углом и попадет в волокно 6, пройдя по которому, аналогично предыдущему случаю, попадет на фоторезистор 7, и регистрация сигнала будет проводиться на мультиметре 8. Таким образом, имеем две регистрирующие части: для прямо отраженного излучения и для излучения отраженного под углом, рисунок 3.4.

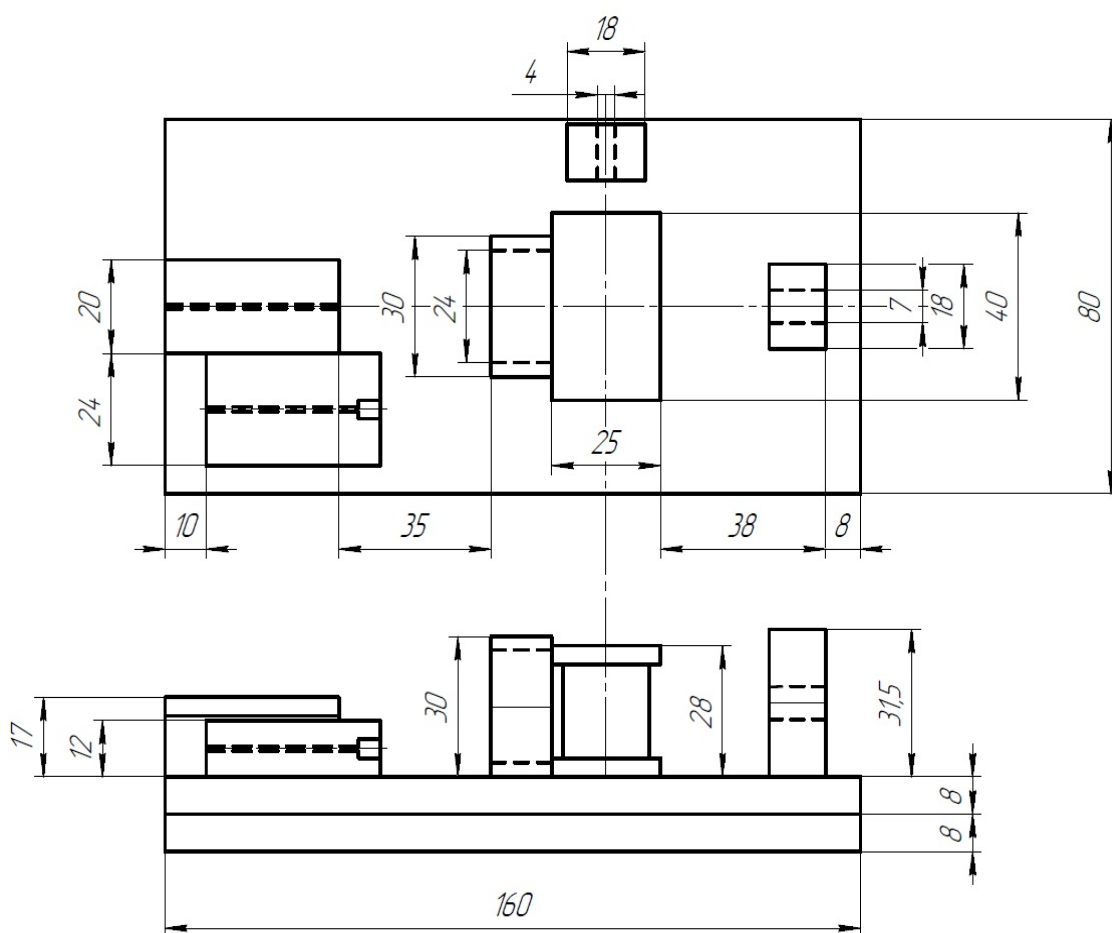


Рисунок 3.4 – Габаритная схема макета

В качестве материала конструкции было выбрано органическое стекло толщиной от 4 до 13 мм. По спроектированной габаритной схеме, изображенной на рисунке 3.4, были вырезаны детали с помощью лазерной установки ТРОТЕК, расположенной на кафедре ЛИСТ. Таким образом были

получены: крепеж лазерного диода, два крепежа фоторезисторов, конструкция для фиксации светоделительного кубика, оправа для короткофокусной линзы и два держателя для оптоволоконна, а также непосредственно подложка, на которой располагаются все детали.

Предварительный вариант крепежей деталей, который можно увидеть на рисунке 3.5, в процессе изготовления макета был изменен.

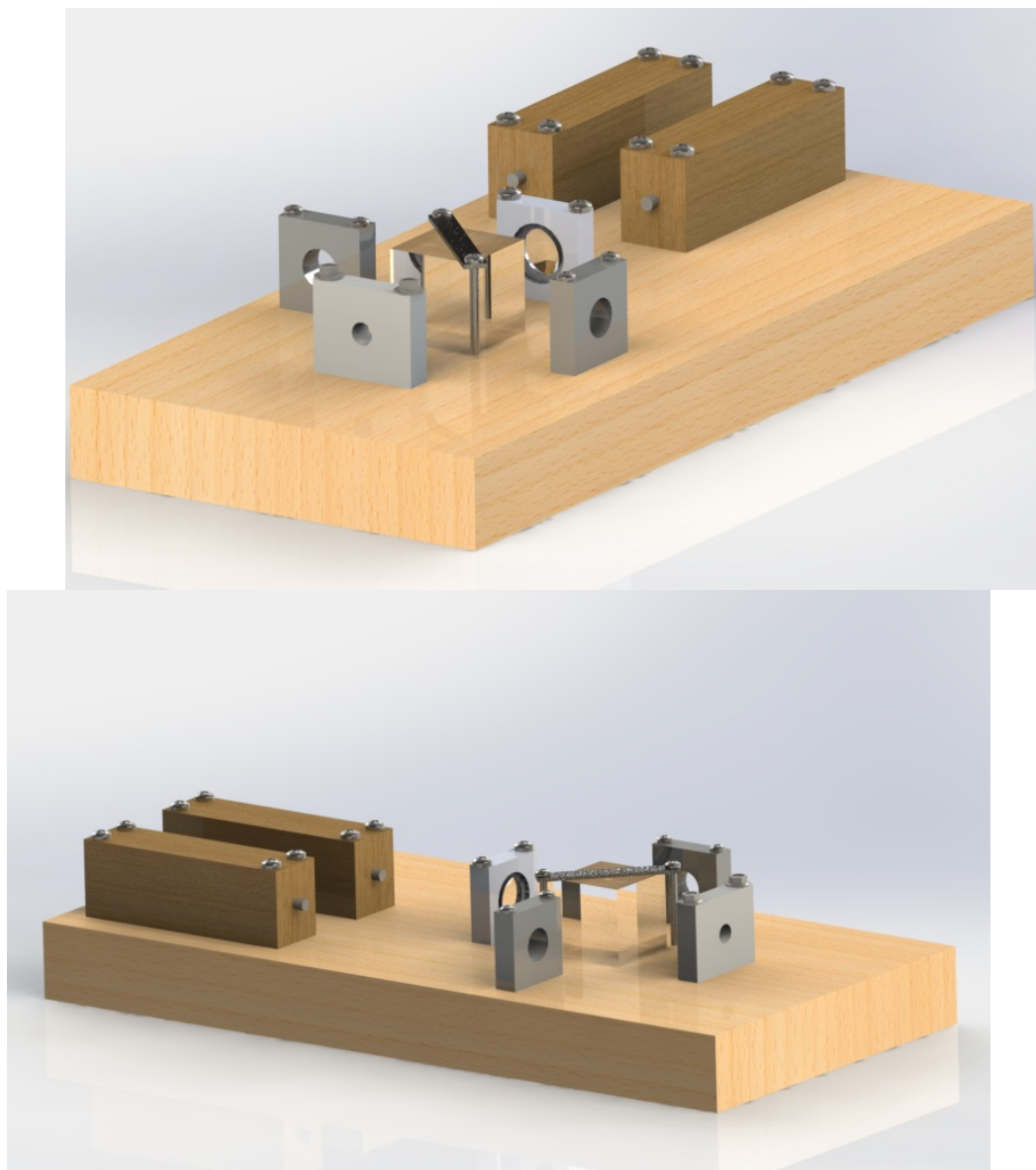


Рисунок 3.5 – 3D-модель лабораторного макета

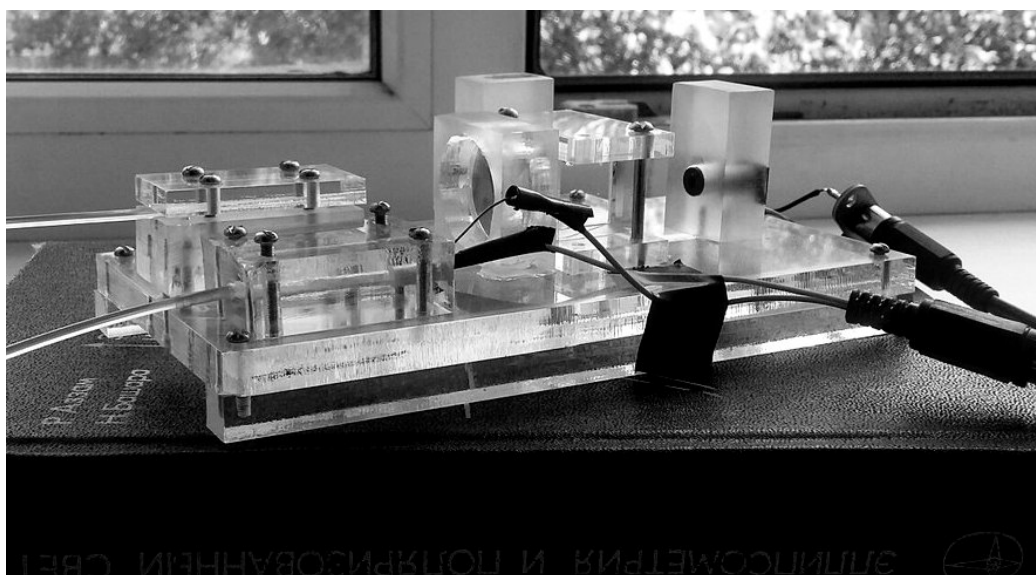
В процессе изготовления макета пришлось столкнуться с некоторыми трудностями, которые впоследствии повлияли на результаты измерений, проводимых с помощью готовой установки.

Во-первых, юстировка оптических деталей системы контролировалась с помощью показаний мультиметра, а также с помощью визуального наблюдения положения лазерного пучка. Это допускает некоторые неточности ввода излучения в оптоволокно, и как следствие искажение получаемого сигнала. Одним из важных этапов конструирования установки являлась установка линзы в оправу. Крепеж проводился с помощью клееного соединения, и точная фиксация линзы во всех плоскостях обеспечена не была, поэтому наблюдаются некоторые отклонения перпендикулярно расположенных плоскостей линзы относительно оптической оси прибора.

Для передачи излучения применяются световоды. Волоконные световоды представляют собой тонкие нити специальной конструкции, изготовленные из материала, прозрачного для вводимого излучения. Внешняя оболочка волоконного световода является защитной, оптические свойства которой принимают во внимание лишь в случаях поглощения его лучей, по тем или иным причинам, вышедшим из оптического волокна. В проектируемых видах датчиков используются кварц-полимерные волокна.

Наиболее трудоемким и требующим тщательности процессом являлась обработка торцов световодов. В промышленных масштабах для этой функции используются специальные приспособления, скалывающие края оптоволокна под необходимым углом (под прямым углом, или под углом Брюстера). Однако в настоящее время материально-техническая база кафедры не располагает таким оборудованием, поэтому скол торцов волокон проводился вручную с помощью бритвы и алмазного резца. Безусловно, такого рода ручная обработка не позволяет добиться высокого качества и влечет за собой дополнительные искажения сигнала, вводимого в оптоволокно.

Конечную сборку макета можно увидеть на рисунке 3.6.



Рисункок 3.6 – Готовый вид лабораторного стенда

4. Экспериментальная часть

В предыдущем разделе была описана сборка измерительной части макета. Крепление зеркала, системы его перемещения и крепление торцов волокон вблизи зеркала не проектируются в данной работе, однако это необходимо для проведения эксперимента и получения результатов измерения. Это означает, что применяемая в данном эксперименте конструкция крепления исследуемого объекта не будет использована в дальнейшей эксплуатации проектируемого лабораторного макета, и будет использована единожды для теста и анализа результатов измерений.

В качестве фиксации оптических волокон были использованы зажимные щипцы на стойке, имеющие резиновые прокладки, чтобы не повредить зажимаемые световоды (рисунок 4.1).

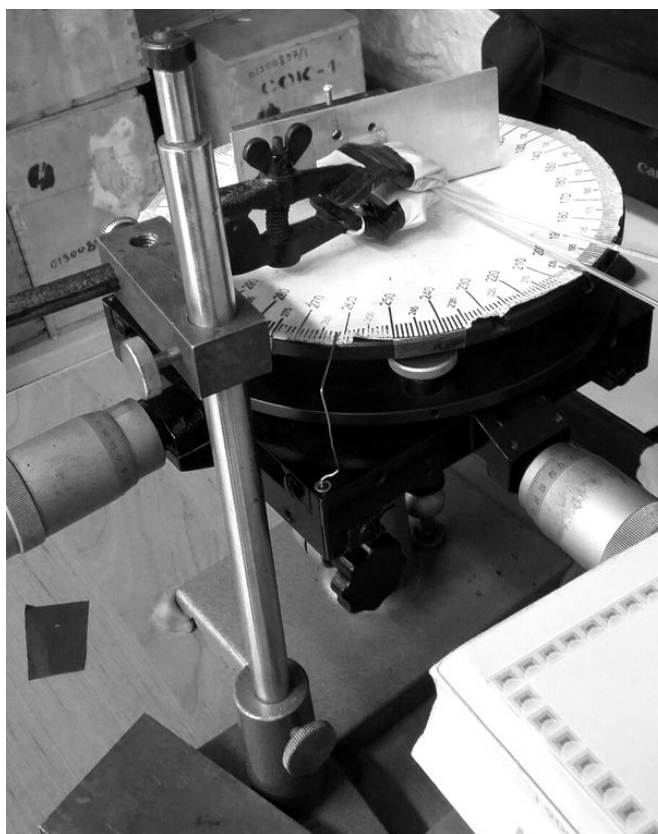


Рисунок 4.1 – Конструкция для фиксации торцов световодов и зеркала

В качестве исследуемого объекта, изменяющего выходящий из лазера световой поток, использовалось металлическое зеркало размером 2х2 см. Зеркало фиксировалось пластичным материалом перпендикулярно поверхности вращающегося столика. Столик установлен на стойке, адаптированной под установку на оптическую скамью. Он способен вращаться вокруг вертикальной оси, а также может двигаться в четырех направлениях, будучи управляемым двумя микрометрическими винтами. Для отсчета угла поворота столика по всей длине его окружности нанесена угловая шкала с ценой деления в один градус.

При выключенном лазере значения фототока на обоих фоторезисторах показывается отклонение приблизительно в 40 мВ. Это значение определяется паразитной засветкой от общего освещения лаборатории и расположенного вблизи монитора персонального компьютера, которую регистрируют чувствительные фоторезисторы. Для исключения этого эффекта вся система измерения была накрыта черной непрозрачной тканью. После этого отклонение исчезло, и оба фоторезистора показывали нулевое значение фототока.

Вращая столик вокруг вертикальной оси, нашли угол, при котором значение фототока на первом фоторезисторе было максимальным и составляло 118 мВ. При этом положении зеркала проводим первый этап измерений: измерение прямо отраженного фототока, прошедшего через первый (входной) световод, при изменении расстояния между торцом оптоволокну и поверхностью зеркала. Результаты измерений занесены в таблицу 4.1, которую можно увидеть в приложении А.

По полученному графику (рисунок 4.2) определим абсолютную чувствительность датчика. Поскольку чувствительность – это тангенс угла наклона касательной, то она будет максимальной на самом крутом участке, коим является участок от 0 до 100 мкм. Соответственно, абсолютная чувствительность датчика будет:

$$\frac{\Delta U}{\Delta l} = \frac{118 - 117}{100 - 0} = 0,01 \left(\frac{\text{мВ}}{\text{мкм}} \right). \quad (4.1)$$

Относительная чувствительность будет равна:

$$\frac{\Delta U}{\Delta l \cdot U_0} = \frac{118 - 117}{100 \cdot 118} = 0,00008 \left(\frac{\text{мВ}}{\text{мкм}} \right). \quad (4.1)$$

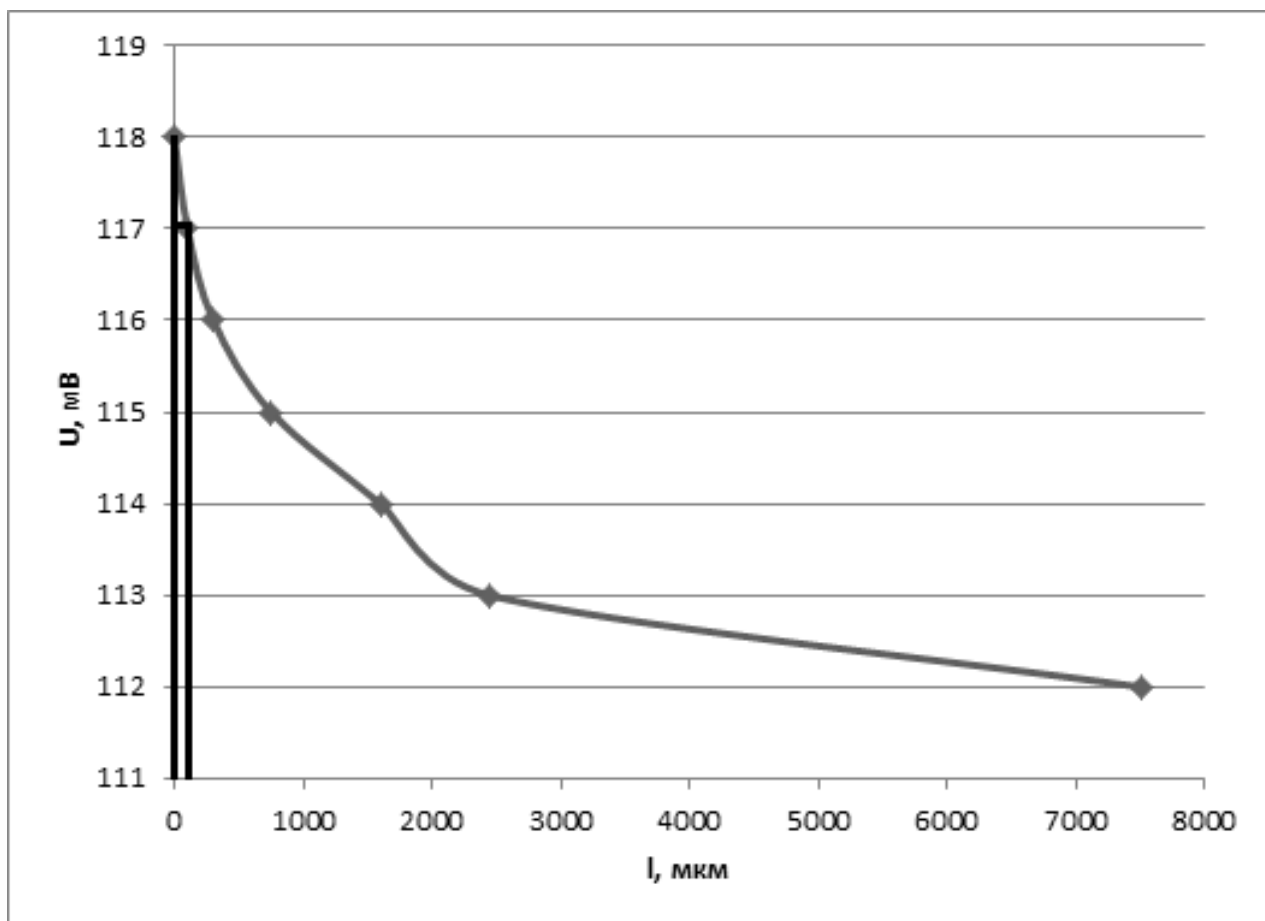


Рисунок 4.2 – График зависимости $U = f(l)$

Наличие второго световода подразумевает регистрацию отраженного от зеркала излучения под углом. Для промера этих параметров торцы световодов были установлены вплотную к отражающей поверхности, а регистрация излучения проводилась в зависимости от угла поворота столика вокруг вертикальной оси. Результаты измерений можно увидеть в таблице 4.2 в приложении А.

Как видно из графика, при повороте зеркала на 12° , максимальное количество света попадает во второй световод. При отклонении от этого значения показания на мультиметре уменьшаются.

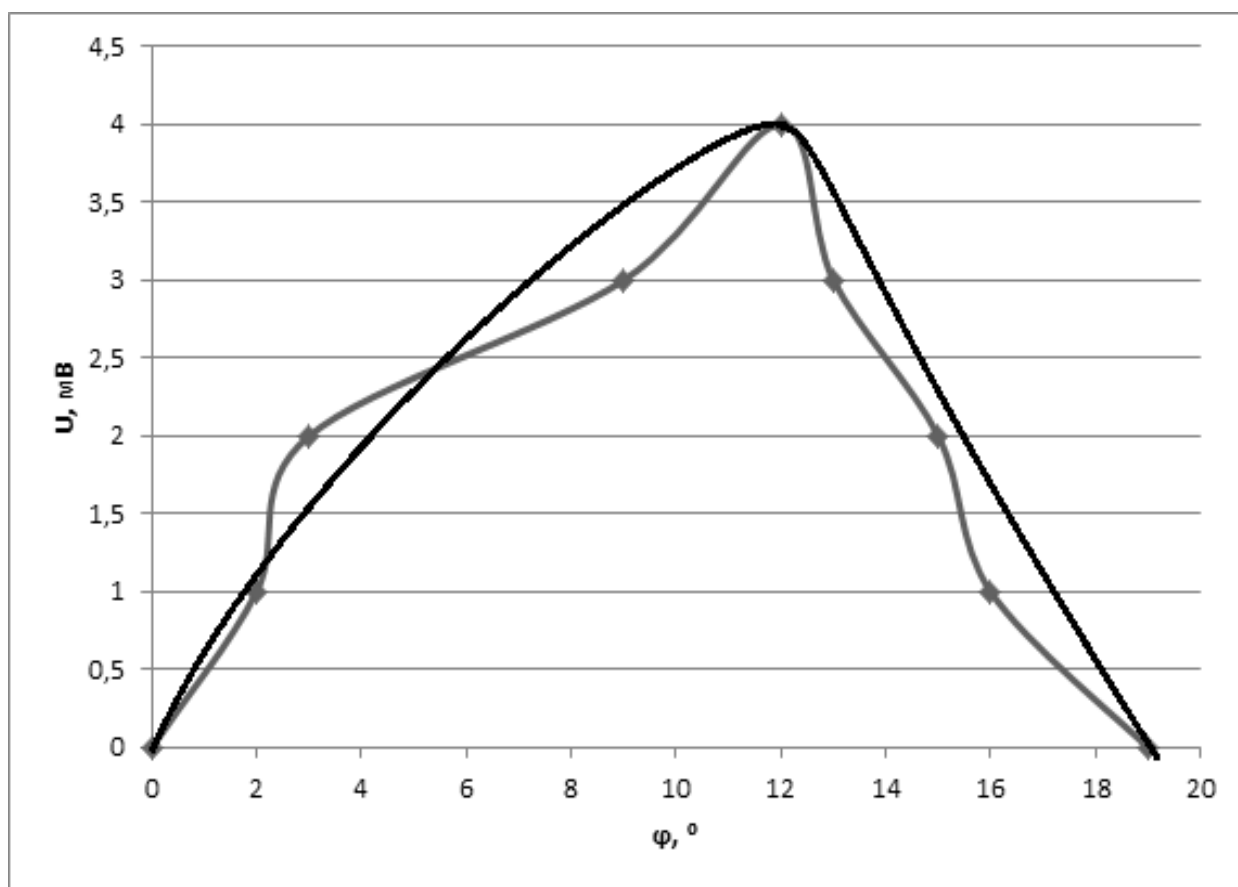


Рисунок 4.3 – График зависимости $U = f(\varphi)$

Данное явление позволяет использовать спроектированный макет в качестве датчика вибраций, который будет регистрировать не только расстояние между торцами волокна и отражающей поверхностью, но и угловое отклонение этой поверхности от начального положения.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

В работе рассматривается создание макета лабораторной работы по курсу «Волоконная оптика» для магистров второго курса обучения выпускающей кафедры. Соответственно, целевой аудиторией, заинтересованной в разработке, являются преподаватели и студенты Томского Политехнического Университета. Данные материалы, будут находиться в открытом доступе, однако право на их использование будет иметь только НИ ТПУ.

Создание лабораторного стенда является финансово и трудозатратным мероприятием, требующим экономической оценки для оптимизации расходов в процессе реализации данного проекта.

5.1 Оценка научного уровня проекта

Количественная оценка научного или научно-технического уровня проекта может быть произведена путем расчета результативности участников разработки по формуле:

$$K_{\text{нy}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{дy}i} \cdot d_i)$$

где $K_{\text{нy}}$ – коэффициент научного или научно-технического уровня;

$K_{\text{дy}i}$ – коэффициент достигнутого уровня i -го фактора;

d_i – значимость i -го фактора;

n – количество факторов.

Результаты расчетов занесем в таблицу 5.1.1.

Таблица 5.1.1 – Оценка научного уровня разработки

Показатели	Значимость показателя	Достиженный уровень	Значение i-го фактора
	d_i	$K_{дy_i}$	$K_{дy_i} \cdot d_i$
2. Перспективность использования результатов	0,4	0,4	0,16
3. Завершенность полученных результатов	0,3	1	0,3
4. Масштаб возможной реализации полученных результатов	0,3	0,4	0,12
Результативность	$K_{ну} = \sum(K_{дy_i} \cdot d_i) = 0,58$		

Масштаб возможной реализации полученных результатов: результаты работы, возможно применить на более широкую в количественном плане аудиторию, но не в качественном.

Перспективность использования результатов: результаты будут использованы в конкретном научном направлении.

Завершенность полученных результатов: полученные результаты не требуют доработки и усовершенствований.

5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности научно-исследовательского проекта

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT – анализ проекта позволяет оценить факторы и явления способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. Для анализа проекта составлена таблица.

Данный этап работы заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 5.2.2 – SWOT анализ проекта

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Новизна разработки для данного круга потребителей; С2. Простота методики выполнения проекта; С3. Результаты данной работы можно применить для более многочисленной аудитории С4. Не требует больших затрат ; С5. Экономичность и экологичность проекта.	В1. Возможность применения в разных лабораторных работах; В2. Возможность применения для обучения студентов других специальностей; В3. Возможность адаптации проекта под другие курсы обучения.
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Проект рассчитан на конкретную аудиторию: студентов-оптиков.	У1. Возможность создание более доступного в цене проекта; У2. Ограниченный спрос на проект.

Из таблицы 5.2.2 видно, что сильные стороны преобладают над слабыми. Причем слабая сторона проекта может быть компенсирована его возможностями во внешней среде, а именно: возможностью применения в других курсах обучения и на других специальностях. Следовательно, данный проект удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

5.3 Организация и планирование проекта

Для выполнения работы собирается рабочая группа из двух человек, в которую входят руководитель проекта (РП) и исполнитель проекта (ИП). Далее составляется поэтапный перечень всех необходимых работ, выбирается оптимальное время их исполнения в рабочих днях и количество задействованных в работе человек. Результаты проделанной работы занесены в таблицу 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Этапы работ

	Описание работы	Исполнитель
	Подготовительный этап (анализ состояния вопроса, подбор научно-технической литературы и ее изучение)	РП, ИП
	Теоретическая разработка темы	ИП
	Проектирование и изготовление макета и средств испытания	ИП
	Экспериментальные работы и испытания	ИП
	Доработка и корректировка теоретической разработки темы по результатам испытаний	РП, ИП
	Обобщения, выводы и предложения по теме, технический отчет, заключительный этап.	ИП

5.4 Линейное планирование

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

Трудоемкость выполнения проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях. Для расчёта 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, чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из расчётов трудоемкости работ, определяется время выполнения каждой i -ой работы (T_{pi}) по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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.

Для примера расчета, рассчитаем ожидаемую трудоемкость и продолжительность работы №1:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = \frac{3 * 7 + 2 * 20}{5} = 12.2$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} = \frac{12.2}{2} = 6.1 \approx 6$$

В таблице 5.4.1 представлен календарный график работ. Таблицу можно увидеть в приложении А.

Вывод: Из результатов организации и планирования НИП следует, что для реализации проекта необходимо два исполнителя – руководитель и непосредственный исполнитель (студент-дипломник). Руководитель занимается организационными вопросами, контролем и проверкой расчетов и выполнения работ, суммарная длительность работ для него составляет 8 рабочих дней. Исполнитель проекта выполняет непосредственно расчеты, конструирование и экспериментальную часть проекта. Длительность работ для него составляет 66 дня. На выполнение всего проекта исполнителям потребуется 74 рабочих дня.

5.5 Бюджет проекта

5.5.1 Расчет материальных затрат

Коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы не был принят во внимание - необходимые материалы были закуплены в г. Томске. Материальные затраты можно увидеть в таблице 5.5.1, расположенной в приложении А.

$$З_m = \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расхi} = 6240$$

5.5.2 Расчет затрат на оборудование

Затраты на спецоборудование существенно превышают материальные затраты на другие необходимые материалы, так как речь идет о лазерном оборудовании.

Все затраты на оборудование занесены в таблицу 5.5.2

Таблица 5.5.2 – Затраты на оборудование

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Σ
Паяльник	шт	1	250	250
Лазерный гравер Trotec Speedy 400	шт	1	46500	46500
Дрель-шуруповерт	шт	1	1690	1690

$$\Sigma_m = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} = 48440$$

5.5.3 Затраты на оплату труда

Расходы по оплате труда определяются исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов.

Таблица 5.5.3 – Расчет заработной платы

Исполнители	k_T	$\Sigma_{тс}$	$k_{пр}$	k_d	k_p	Σ_m	$\Sigma_{дн}$	T_p	$\Sigma_{осн}$
Руководитель проекта	1,699	4000	0,3	0,3	1,3	8300	400	8	3200
Исполнитель проекта	1,268	500	0,3	0,3	1,3	1000	50	66	3300
Итого $\Sigma_{осн}$	6500								

5.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы и отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды - это обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по следующей формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot З_{зп} ,$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Коэффициент дополнительной заработной платы выбран 0,12, так как разработка находится на стадии проектирования.

Таблица 5.5.4 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Руководитель проекта	3200	384
Исполнитель проекта	3300	396
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Величина отчислений во внебюджетные фонды		
Руководитель проекта	960	
Исполнитель проекта	990	
Итого	1950	

5.5.5 Накладные расходы

К элементу «Накладные расходы» относятся налоги, сборы, платежи по обязательному страхованию имущества, платежи за предельно допустимые выбросы загрязняющих веществ; вознаграждения за изобретения и

рационализаторские предложения; затраты на командировки; плата сторонним организациям за пожарную и сторожевую охрану; за подготовку кадров; оплата услуг связи, вычислительных центров, банков; плата за аренду; представительские расходы; затраты на ремонт. И принимаются на уровне 16 % от затрат на осуществление технического проекта.

Величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{затраты на тех.проект}) \cdot k_{\text{нр}}$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

5.5.6 Формирование сметы бюджета затрат

Смета бюджета затрат отражает сумму средств необходимых для конкретного пункта проекта.

Смета бюджета затрат представлена в таблице 5.5.6.

Таблица 5.5.6 – Смета затрат проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.	Структура, %
Материальные затраты НТИ	6240	8
Затраты на специальное оборудование	48440	65
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	6500	9
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	780	1
Отчисления во внебюджетные фонды	1950	3
Накладные расходы	10230	14

Бюджет затрат НТИ	74140	100
-------------------	-------	-----

Бюджет



Рисунок 5.5.6 – Диаграмма распределения бюджета выполняемого проекта

Общая сумма расходов на осуществление технического проекта – 74140 руб. Наибольшие расходы приходятся на затраты на специальное оборудование (48440 рублей), что связано с использованием дорогостоящей лазерной установки.

5.6 Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности технического проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливаем экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для нормального функционирования данного проекта необходимо принять ряд критериев. В данном случае выбираем следующие:

1. надежность – соответствие результатов проекта реальным требованиям, необходимых для выполнения лабораторных работ;
2. гибкость – способность проекта реагировать на изменение условий, в частности на появление более совершенных моделей лабораторных установок;
3. адаптивность – возможность приспособить данный проект под другие условия, другие лабораторные работы.
4. простота эксплуатации – проект должен быть выполнен с обеспечением рационального расположения элементов, ясностью и простотой схемы, с целью создания условий для работы с проектом студентов;
5. экономичность – проект должен быть выполнен таким образом, чтобы затраты на его создание, эксплуатацию и развитие были минимальными при условии соблюдения требований гибкости, безопасности и надежности.

После выбора критериев оцениваем их по 5-и бальной шкале и определяем интегральный показатель, с помощью которого делаем вывод об эффективности использования технического проекта.

Оценочные критерии для расчета интегрального показателя ресурсоэффективности приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Оценочные критерии проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Надежность	0,25	5
2. Гибкость	0,20	3
3. Адаптивность	0,10	3
4. Простота эксплуатации	0,20	5
5. Экономичность	0,25	4
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = 0,25 * 5 + 0,2 * 3 + 0,1 * 3 + 0,2 * 5 + 0,25 * 4 = 4,11$$

По 5-балльной шкале показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

Итоги раздела

В данном разделе была получена оценка научного уровня и произведено планирование научно-исследовательского проекта. Также был произведён расчет проведения работ по созданию макета лабораторной работы. Результаты данного исследования могут быть использованы для усовершенствования данного проекта, или для создания аналогичных проектов.

Оценка научного уровня проекта показала, что результаты работы возможно применить на более широкую в количественном плане аудиторию, результаты будут использованы в конкретном научном направлении, а полученные результаты не требуют доработки и усовершенствований.

Данная работа может быть опубликована и использоваться для обучения студентов других специальностей и вузов.

Из результатов организации и планирования НИП следует, что для реализации проекта необходимо два исполнителя. Суммарная длительность работ исполнителя составляет 8 рабочих дней. Длительность работ исполнителя составляет 66 дня. На выполнение всего проекта исполнителям потребуется 74 рабочих дня.

За счет выполнения проекта на базе имеющихся на кафедре ресурсов, экономится значительная часть финансовых ресурсов. В итоге затраты проекта составили 74140 рублей. Это позволяет утверждать, что данная работа эффективна, так как средняя цена создания аналитических лабораторных установок является более высокой. Проведение SWOT-анализа и определение ресурсоэффективности показало, что проект удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям, а также эффективности его использования. Показатель ресурсоэффективности превышает 4 балла из 5, что является довольно высоким показателем.

6. Производственная безопасность

В научных исследованиях широко используются электроустановки, химические вещества, различное оборудование, применение которого представляет определенную опасность. В связи с этим, важнейшим условием создания здоровых и, главное, безопасных условий труда является разработка и соблюдение определенных требований техники безопасности. Для предотвращения несчастных случаев и воздействия неблагоприятных факторов необходим полный анализ условий труда.

В виду того, что данная работа по разработке и исследованию оптического датчика перемещения проводилась в лазерной исследовательской лаборатории, необходимо провести полный анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при работе в данной исследовательской лаборатории.

В данном разделе проведен анализ опасных факторов среды, изучен регламент параметров лазерного излучения, а также изучены меры безопасности при использовании специфического оптического оборудования. Наиболее важным пунктом является обустройство помещения для проведения лазерных операций, так как необходимы специальный ремонт помещения и правильное обустройство рабочего места.

В разделе рассмотрены пункты согласно нормам и установленным правилам, а также приведены ссылки нормативно – технической документации.

6.1 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды

ВКР выполнялась в лаборатории 032 второго корпуса на базе кафедры ЛИСТ ИФВТ НИ ТПУ.

По СП 60.13330.2012 санитарные нормы составляют $4,5 \text{ м}^2$ и 15 м^3 объема на одного человека [15].

Лаборатория, где происходит разработка и исследование макета имеет размеры: высота 3 м, длина 15 м, ширина 5 м. Площадь помещения соответственно составляет 75 м^2 . В лаборатории работает 4 человека, а одного человека приходится $18,75 \text{ м}^2$ площади. Эти значения доказывают, что размеры лаборатории удовлетворяют санитарным нормам.

Проведя анализ габаритных размеров кабинета, рассмотрим микроклимат в этом помещении. В качестве параметров микроклимата рассмотрим температуру, влажность воздуха и освещение.

В помещении осуществляется естественная вентиляция посредством наличия легко открываемого оконного проема (форточки), а также дверного проема. По зоне действия такая вентиляция является общеобменной. Основным недостаток - приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания. Согласно нормам, СП 60.13330.2012 объем воздуха необходимый на одного человека в помещении без дополнительной вентиляции должен быть более 40 м^3 [15]. В нашем случае объем воздуха на одного человека составляет 45 м^3 , из этого следует, что дополнительная вентиляция не требуется.

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается работающим оборудованием, преобразователями напряжения, работающими осветительными приборами дневного света, а также проникает извне. Шум вызывает головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижается реакция.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96, допустимый уровень звукового давления составляет 80 дБА [16]. Основным источником шума в лаборатории является

вентиляция, установленная в аппаратуре. Действующее значение звукового давления для аппаратуры составляет 40 дБА. Данное значение шума удовлетворяет вышеуказанным нормам.

Работа в лаборатории связана с приборами и оптикой повышенной точности, то есть относится в третьему разряду зрительных работ. Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [17], необходима освещенность не менее 200 Лк. Лаборатория находится в полуподвальном помещении, где плохое естественное освещение. Это условие повышает требования к искусственному освещению.

Рабочее освещение в лаборатории осуществляется светильниками с лампами типа ЛБ-40. В каждом светильнике размещены две лампы, дающие световой поток порядка 6000 Лм. Пятнадцать светильников расположены в три ряда. Освещённость рассчитывается методом коэффициента, значение которого при расчётах составляет 1,25. В ходе расчётов было получено значение освещенности в 249 Лк, что соответствует предъявляемым требованиям.

6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды.

При работе в лаборатории 032 НИ ТПУ существует ряд опасных факторов:

Лазерное излучение используемого квантового генератора, лежащее в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, попадание в глаза которого, как прямого, так и отраженного луча, является опасным.

Попадание излучения на участки кожи может привести к проникающему механическому повреждению или ожогу.

Опасность поражения органов зрения, кожи и т.д. усиливается еще и тем, что лазерное излучение находится частично в невидимой части спектра.

Опасность поражения электрическим током определяется его источником, которым может являться высокое напряжение питания установки (лазеров, фотоприемных устройств и т.п.)

Возможны следующие поражения электрическим током при работе на данном рабочем месте:

Случайное прикосновение к токопроводящим частям.

Прикосновение к не токопроводящим частям, оказавшимся под напряжением в результате:

А) нарушения нормального режима работы (замыкание на корпус, пробой на землю, пробой ионизированной пыли);

Б) плохого контакта в местах соединения токоведущих частей;

В) наличие механического повреждения изоляции соединительных проводов.

Для безопасной работы в электроустановках решающее значение имеет применяемое напряжение и соблюдение техники эксплуатации электроустановок. Питание электрооборудования в лаборатории производится от сети переменного тока напряжением 380 В и 220 В.

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются [18]:

изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;

установки защитного заземления;

наличие общего рубильника;

своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

Кроме того, в целях безопасности специалисты лазерного оборудования снабжаются средствами индивидуальной защиты, в которые входят маски, очки, перчатки [21].

7. Экологическая безопасность

Вопросы охраны окружающей среды имеют большое значение. Эта проблема включает в себя научные, экономические, социальные, правовые, а также эстетические аспекты и напрямую связана с охраной здоровья нынешнего и будущего поколений.

Разработанный мною макет датчика не несет никаких вредных или опасных загрязнений в окружающую среду. Лазерное оборудование также не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

7.1 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В помещении, где производилась выпускная квалификационная работа, имеется электропроводка напряжением 220 вольт, предназначенная для питания вычислительной техники и освещения. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, документов и другого имеющегося оборудования.

Данная лаборатория относится к категории В (наличие твердых сгораемых вещей) [19].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, технические, режимные и эксплуатационные [19].

Организационные:

- организация обучения персонала правилам пожарной безопасности;

- разработка мероприятий по действиям персонала на случай возникновения пожара и организации эвакуации людей;

- содержание свободными выходов и подступов к оборудованию, а также к средствам пожаротушения.

Технические:

- основы пожарной безопасности помещения закладываются еще при проектировании. Стены и перегородки лаборатории выполнены из негорючего материала с пределом огнестойкости 2,5 часа. Перекрытия из труднотгорючего материала с пределом огнестойкости 0,75 часа.

Таким образом, лаборатория относится к помещениям первой степени огнестойкости с временем эвакуации до получаса.

- применять для горючих веществ герметичную тару и оборудование;
- периодически очищать территорию, на которой располагается установка, от отложений пыли, горючих отходов и т.п.;
- исключение нагрузки сети;
- заземление всего оборудования лаборатории;
- защита электроустановок от соприкосновения с горючими веществами и установка их на металлические подставки;
- содержание противопожарного инвентаря в исправности.

Мероприятия режимного характера:

- запрещается курение на рабочем месте;
- категорически запрещается проведение работ с открытым огнем в лаборатории.

Эксплуатационные мероприятия:

- проведение периодических профосмотров оборудования.

7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Размещение лазерного оборудования и организация рабочих мест происходит согласно СанПиН 5804-91 [20] и ГОСТ Р-50723-94 [21].

В целях обеспечения безопасности необходимо выполнить ряд мер:

В качестве напольного материала следует использовать специальный линолеум или дерево, дабы не образовывать статистическое электричество.

В составе мебели не должно быть синтетических волокон.

Матовое покрытие стен и потолка предотвратит отражение лазерного излучения.

В качестве покрытия стен и потолка следует использовать негорючие материалы.

Следует исключить зеркальные покрытия.

Расположение элементов рабочего места должно быть организовано рационально, с учетом скоростных, силовых и физиологических возможностей человека.

Необходимо выделить отдельное место для используемых средств при работе (перчатки, салфетки, очки и т.д.,)

Обязательна маркировка рабочего кабинета. На двери кабинета размещается специальный знак лазерной опасности, знак и окантовка которого черного, а фон – желтого цвета [22].

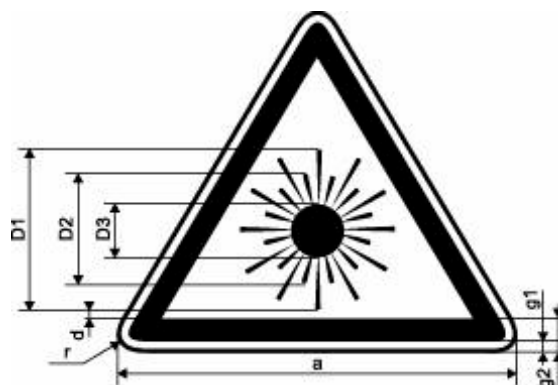


Рисунок 7.2.1. – Знак лазерной опасности.

Рекомендуемые размеры для знака приведены в таблице ниже.

Таблица 7.2.1– Рекомендуемые размеры знака [22].

A	G1	G2	r	D1	D2	D3	D*
25	0,5	1,5	1,25	10,5	7	3,5	0,5
50	1	3	2,5	21	14	7	1
100	2	6	5	42	28	14	2
150	3	9	7,5	63	42	21	3
200	4	12	10	84	56	28	4
400	8	24	20	168	112	56	8
600	12	36	30	252	168	84	12

Необходимо обеспечить вентиляцию помещения, обеспечивающий трехкратный обмен воздуха в час.

Обязательно наличие техники безопасности, аптечки, инструкции по оказанию первой помощи, огнетушителя на рабочем месте и агитирующей информации в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

Заключение

В данной дипломной работе разработан и исследован оптоволоконный датчик перемещений. Проведен теоретический анализ чувствительности и основных узлов волоконно-оптического датчика. Был создан макет оптоволоконного датчика, регистрирующего перемещение отражающей поверхности и угловое отклонение излучения от нее.

В качестве источника излучения был выбран лазерный диод. Поскольку он является монохроматичным и когерентным (в пределах некоторого диапазона), а также его можно назвать маломощным источником, то его использование повышает чувствительность волоконно-оптического датчика.

В ходе тестирования готового макета было выявлено большое количество потерь на оптических поверхностях. Если учитывать только френелевские потери на отражении, составляющие 4% на каждой поверхности, после прохождения сигнала через светоделительный кубик, линзу и световоды (не единожды), то отчетливо можно увидеть заметный вклад потерь полезного излучения в системе.

Также, снижение качества регистрируемого сигнала связано с недостатками способа ввода излучения в волокно. Даже не смотря на использование фокусирующей системы, наблюдается рассеяние на торцах световодов. Это связано с недостаточной фокусировкой пучка, а также с ручной обработкой торцов световодов. При рассмотрении последних с помощью микроскопа были обнаружены некоторые сколы и неровности поверхности, увеличивающие потери излучения. Таких торцов в системе четыре, и их совокупность дает общее число потерь, являющееся значимым для чувствительности датчика.

Кроме того, искажение выходного сигнала на первом мультиметре было связано с отраженным от черной ткани пучком, который предварительно был

отклонен светоделительным кубиком на 270 градусов. Убрать данную паразитную засветку в ходе экспериментов не удалось.

Также для улучшения макета необходимо усовершенствовать систему крепления концов световодов для их статичного положения друг относительно друга, а также для легкости их расположения вблизи отражающей поверхности.

Несмотря на вышеуказанные недостатки, система способна функционировать в рамках лабораторного обучения. Это доказано проводимыми с помощью установки измерениями. Универсальность данного макета позволяет использовать его как датчик микроперемещений, а также как датчик вибраций. Однако, необходимо учесть частотную природу вибраций: с большой вероятностью, частота колебаний будет превышать 1 Гц, что говорит о невозможности фиксировать быструю смену показаний на мультиметре. Поэтому в будущем необходимо доработать такой аспект как регистрацию быстро меняющегося сигнала.

Другими достоинствами проекта являются его малые габариты, легкость в использовании, прочность, легкость юстировки, возможность замены электрических компонентов, поскольку крепления для них являются универсальными.

В экономической части дано технико-экономическое обоснование разработки и оценка научно-технического уровня. Оценка научного уровня проекта показала, что результаты работы можно применить на более широкую в количественном плане аудиторию, результаты будут использованы в конкретном научном направлении. Данная работа может быть опубликована и использоваться для обучения студентов других специальностей и вузов, ее можно назвать эффективной, так как средняя цена создания аналитических лабораторных установок является более высокой.

Также рассмотрены вопросы безопасности (производственной и экологической). Разработанный мною макет датчика не несет никаких вредных или опасных загрязнений в окружающую среду. Лазерное оборудование также не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

Список информационных источников и литературы

1. Кузнецова Е.Ю., Стукач О.В. Волокно-оптический датчик измерения температуры / Молодёжь и современные информационные технологии. Материалы XII МНПК студентов, аспирантов и молодых учёных. Изд. НИУ ТПУ – 2014. – С. 55-56.
2. Джеймс Браун. Распределенные системы контроля температуры на базе современных волоконно-оптических датчиков / Джеймс Браун, Денис Рогачев // Геология, геофизика.— 2005.— №1. - С. 5-11.
3. Томишев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности. Труды МФТИ. — 2012.— Том 4, № 2. С. 64-72.
4. Bandyopadhyay, S.; Canning, J.; Stevenson, M.; Cook, K. Ultra-high temperature regenerated gratings in boron codoped germanosilicate optical fibre using 193 nm. Opt. Lett. 2008, 33, 1917–1919.
5. Canning, J.; Bandyopadhyay, S.; Stevenson, M.; Cook, K. Fibre Bragg Grating Sensor for High Temperature Application. Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT) & Opto-Electronics Communications Conference (OECCC), Darling Harbour, Sydney, Australia; 2008.
6. Alan D. Kersey. Optical Fiber Sensors for Permanent Downwell Monitoring Applications in the Oil and Gas Industry. IEICE TRANS. ELECTRON. - 2000, №3, С. 400-404.
7. Звей Нэй Зо. Разработка и исследование преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта : автореф. дис. на

- соиск. учен. степ. канд. тех. Наук (05.03.15) / Звей Нэй Зо; Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет) – Москва, 2013. – 26 с.
8. Пат. модель 111643 Российская Федерация, МПК7, G01K7. Преобразователь температуры на основе оптического туннельного эффекта [Текст] / Казарьян А.В., Жеглов М.А., Звей Нэй Зо, Бусурин В.И.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский авиационный институт (государственный технический университет) (МАИ). – 2 с.
9. Пат. 2474798 Российская Федерация, МПК G01L 11/02 . Волоконно-оптический датчик давления [Текст] / Мурашкина Т.И.; заявитель и патентообладатель Мурашкина Татьяна Ивановна – 2 с.
10. Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугодников А.П., Поспелов В.И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. — 2005. — Т. 46, № 6.
11. Tor K. Kargas , Brock A. Williams, Gregory A. Mayers. The Optic Oil Field: Deployment and Application of Permanent In-well Fiber Optic Sensing Systems for Production and Reservoir Monitoring . Society of Petroleum Engineers – 2001, №19, С. 22-24.
12. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики // М: Энергоатомиздат. – 1990 – 33 с.

- 13.Лосев В.Ф., Ципилев В. П. Лазерные технологии и оборудование // Томский Политехнический Университет – 2008 – 62 с.
- 14.Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики // М: Радио и связь – 1985 – 102 с.
- 15.Свод правил СП 60.13330.2012 «СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» - 03. –М., 2012
- 16.Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы 2.2.4/2.1.8.562-96 – 03. – М.,1996
- 17.Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. Санитарные правила и нормы 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. – М., 2003
- 18.Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640с.
- 19.Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76
- 20.Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров № 5804-91
- 21.ГОСТ Р-50723-94. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий

22.ГОСТ Р 50723-94. Знак лазерной опасности и его рекомендуемые размеры

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Таблица 4.1 – Результаты измерений прямого отражения

l, мкм	U, мВ
0	118
100	117
200	117
300	116
400	116
500	116
600	116
700	116
800	115
900	115
1000	115
1100	115
1200	115
1300	115
1400	115
1500	115
1600	114
1700	114
1800	114
1900	114
2000	114
2100	114
2200	114

2300	114
2400	114
2500	113
2600	113
7500	112
7600	112
7700	112

Таблица 4.2 – Результаты измерений отражения под углом

$\phi, ^\circ$	U, мВ
0	0
1	0
2	1
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	3
10	3
11	3
12	4
13	3
14	3
15	2
16	1
17	1
18	1

19	0
20	0
21	0

Таблица 5.4.1 – Календарный график

Название Работы	Трудоёмкость работ			Численность исполнителей $\sum C_i$	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожид}$, чел-дни		
Подготовительный этап (анализ состояния вопроса, подбор научно-технической литературы и ее изучение)	7	20	12.2	2	6
Теоретическая разработка темы	14	30	20.4	1	20
Проектирование и изготовление макета и средств испытания	14	30	20.4	1	20
Экспериментальные работы и испытания	6	10	7.6	1	8
Доработка и корректировка теоретической разработки темы по результатам испытаний	2	5	3.2	2	2
Обобщения, выводы и предложения по теме, технический отчет, заключительный этап.	7	14	9.8	1	10

Таблица 5.5.1 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Зм
Лазерный диод	<u>шт</u>	1	57	57
Резистор	<u>шт</u>	1	13	13
USB-разъем	<u>шт</u>	1	10	10
Линза	<u>шт</u>	1	900	900
Оптическое волокно	метры	1	230	230
Светоделительный кубик	<u>шт</u>	1	2600	2600
Зеркало	<u>шт</u>	2	240	480
Светофильтр	<u>шт</u>	2	470	940
Фоторезистор	<u>шт</u>	2	140	280
Операционный усилитель	<u>шт</u>	1	80	80
<u>Мультиметр</u>	<u>шт</u>	1	650	650