

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Д. В. Окунев
П. В. Воробьев

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Методические указания по лабораторным работам для студентов технических направлений
подготовки и специальностей

Томск
2026

УДК 53.06
ББК В348
О-49

Рецензент:

Коровин А. В., Технический директор ООО «Системы. Технологии. Коммуникации»

Авторы:

Окунев Д. В., Старший преподаватель кафедры Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР)

Воробьев П. В., Руководитель учебного центра ООО «Системы. Технологии. Коммуникации»

Окунев Дмитрий Вадимович

О-49 Волоконно-оптические устройства и системы технологического назначения: методические указания по лабораторным работам / Д. В. Окунев, П. В. Воробьев, – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 24 с.

Приведены методические указания по выполнению лабораторных работ. Лабораторные работы выполняются на кафедре сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники и предназначены для студентов, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР, протокол № 16 от 13.05.2026 г.

УДК 53.06
ББК В348

© Окунев Д. В., Воробьев П.В.
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД	5
1.1 Краткие теоретические сведения	5
1.1.1 Гауссов пучок	6
1.1.2 Френелевские потери	6
1.1.3 Эффективность ввода излучения в многомодовые волоконные световоды	6
1.1.4 Измерение радиуса лазерного пучка методом движущегося резкого края	7
1.2 Описание экспериментальной установки	7
1.3 Порядок выполнения работы	8
1.4 Содержание отчёта	10
1.5 Контрольные вопросы	10
2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА	11
2.1 Введение	11
2.2 Краткие теоретические сведения	11
2.3 Описание экспериментальной установки	12
2.4 Порядок выполнения работы	13
2.5 Содержание отчета	14
2.6 Контрольные вопросы	14
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДА	15
3.1 Введение	15
3.2 Краткие теоретические сведения	15
3.3 Описание экспериментальной установки	15
3.4 Порядок выполнения работы	16
3.5 Содержание отчета	16
3.6 Контрольные вопросы	17
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ	18
4.1 Введение	18
4.2 Краткие теоретические сведения	18
4.2.1 Закон Малюса	19
4.3 Описание экспериментальной установки	20
4.4 Порядок выполнения работы	21
4.5 Содержание отчета	21
4.6 Контрольные вопросы	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	24

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания предназначены для обучающихся на технических направлениях подготовки и специальностей. Пособие охватывает четыре лабораторные работы, последовательно знакомящие обучающихся с ключевыми физическими принципами работы волоконно-оптических компонентов и измерительных систем.

В первой лабораторной работе исследуется эффективность ввода света в многомодовый волоконный световод. Студенты экспериментально определяют зависимость выходной оптической мощности от поперечного и продольного смещения торца световода относительно лазерного пучка, а также сравнивают полученные данные с теоретической моделью, основанной на интеграле перекрытия гауссовых распределений поля.

Вторая работа посвящена волоконно-оптическому датчику (ВОД) амплитудного типа на основе полимерного волокна. Здесь изучается принцип преобразования микроперемещений в изменение интенсивности света, анализируется нелинейность рабочей характеристики, и студенты определяют линейный участок, обеспечивающий погрешность не более 5%.

Третья лабораторная работа знакомит с оптическим датчиком зондового типа для измерения линейных перемещений объектов. В ходе выполнения работы исследуется зависимость оптического сигнала от расстояния до отражающей поверхности.

В четвёртой работе изучаются изменения состояния поляризации лазерного излучения при распространении в многомодовых полимерных волоконных световодах. Экспериментально проверяется степень сохранения линейной поляризации после прохождения через волокна различной длины и сопоставляют полученные результаты с законом Малюса.

Выполнение лабораторных работ, представленных в данном пособии, позволит закрепить теоретические знания, получить практические навыки работы с волоконно-оптическим оборудованием и освоить методы обработки экспериментальных данных, необходимые для дальнейшей профессиональной деятельности в области оптоэлектроники и волоконной оптики.

В данном сборнике собраны и доработаны работы, которые производились на кафедре СВЧиКР [7 - 10].

1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД

1.1 Краткие теоретические сведения

Эффективность работы волоконно-оптических систем в значительной степени определяется потерями света при вводе излучения в оптический световод. Такие потери возникают вследствие несовпадения пространственного распределения поля возбуждающего светового пучка и распределения модового поля волоконного световода, а также из-за смещения оптических осей, ошибок юстировки и отражений на границах раздела сред.

При распространении света в волоконном световоде энергия переносится набором направляемых мод. Каждая мода характеризуется определённым пространственным распределением электромагнитного поля. Эффективность возбуждения конкретной моды определяется степенью совпадения распределения поля падающего излучения с распределением поля данной моды на входном торце световода [2,4 - 6].

Для количественной оценки этого совпадения используется понятие интеграла перекрытия (overlap integral). Данный подход широко применяется при анализе ввода излучения в одномодовые и многомодовые волокна, а также при расчёте потерь в волоконно-оптических соединениях.

В общем двумерном случае эффективность ввода определяется выражением

$$\eta = \frac{\left| \iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y) V^*(x,y) dx dy \right|^2}{\left(\iint_{-\infty}^{\infty} |U(x,y)|^2 dx dy \right) \left(\iint_{-\infty}^{\infty} |V(x,y)|^2 dx dy \right)}, \quad (1.1)$$

где $U(x,y)$ – комплексная амплитуда поля падающего светового пучка;

$V(x,y)$ – комплексная амплитуда модового поля волоконного световода;

$V^*(x,y)$ – комплексно-сопряжённая функция;

η – эффективность ввода света в световод.

Числитель выражения характеризует степень совпадения пространственных распределений полей. Знаменатель выполняет нормировку на полную мощность каждого из полей. Значение эффективности ввода изменяется в диапазоне

$$0 \leq \eta \leq 1. \quad (1.2)$$

При полном совпадении распределений полей достигается $\eta = 1$, что соответствует вводу всей мощности излучения в световод. При отсутствии перекрытия полей. $\eta = 0$.

Для упрощенного анализа часто рассматривается одномерный случай

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} U(x) V(x) dx \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} U^2(x) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} V^2(x) dx}. \quad (1.3)$$

Данная модель позволяет получить аналитические выражения для основных закономерностей ввода света в волоконный световод.

1.1.1 Гауссов пучок

Большинство газовых и полупроводниковых лазеров в первом приближении формируют излучение, соответствующее основной моде гауссова пучка TEM_{00} .

Распределение интенсивности в поперечном сечении такого пучка описывается выражением

$$I = I_0 \cdot \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right]^{-1} \cdot \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2} \right), \quad (1.4)$$

где z_0 – продольный размер перетяжки пучка,

r^2 – радиус пучка, который можно заменить на x^2 , при условии исследования только по одной координате.

z_0 называют Рэлеевской длиной или продольным размером перетяжки пучка:

$$z_0 = \frac{kw_0^2}{2} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.5)$$

где

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right)^2; \quad (1.6)$$

w_0 – полуширина пучка в перетяжке (при $z=0$);

z – продольная координата (для простоты будем рассматривать одномерные гауссовы пучки)

На расстояниях порядка длины Рэлея размеры пучка начинают существенно увеличиваться в следствии дифракции.

1.1.2 Френелевские потери

Когда не соблюдается одномодовый режим распространения света, то эффективность ввода излучения проще всего оценивать Френеливскими отражениями на торце оптического волокна.

Даже при полном пространственном совпадении полей часть излучения отражается от торца световода.

Коэффициент отражения при нормальном падении определяется формулой Френеля

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (1.7)$$

где n_1 – показатель преломления первой среды;

n_2 – показатель преломления второй среды.

Полная эффективность ввода определяется произведением эффективности пространственного согласования и коэффициента пропускания границы раздела сред.

1.1.3 Эффективность ввода излучения в многомодовые волоконные световоды

Эффективность ввода в многомодовые световоды можно рассчитать, через геометрическую оптику. Зная радиус сердцевины волокна R и размер перетяжки w_0 можно использовать выражение:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2R^2}{w_L^2}\right). \quad (1.8)$$

1.1.4 Измерение радиуса лазерного пучка методом движущегося резкого края

При моделировании и экспериментальном исследовании ввода света в волоконный световод, необходимо достаточно точно знать размеры лазерного пучка. Для решения данной задачи используется несколько стандартизированных методов [1].

В работе предлагается использовать методику движущегося резкого края или ножа Фуко, которая обеспечивает достаточную точность измерений при использовании простой аппаратуры (1.1).

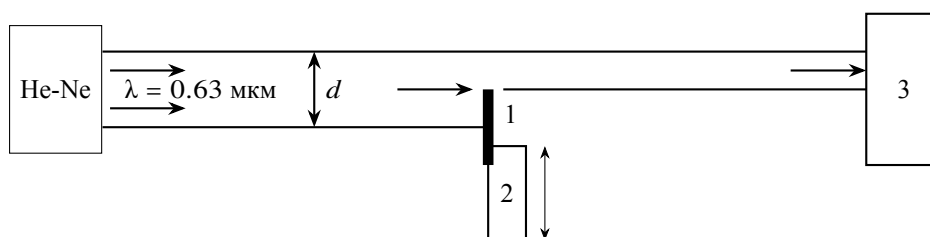


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение метода ножа Фуко

1 – нож; 2 – микрометрический винт; 3 – фотодиод

Передвигая нож (1) микрометром (2) определяется x_1 на уровне мощности 84%. Затем определяется x_2 , при котором уровень мощности поступающей на фотодиод, будет составлять 16%.

Ориентировочную ширину пучка d_k можно определить по формуле:

$$d_k = 2(x_2 - x_1). \quad (1.9)$$

1.2 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для исследования эффективности ввода света в волоконный световод представлена на рисунке 1.2. Здесь излучение He-Ne лазера (Лазер) вводится в волоконный световод (ВС) путем фокусировки света на входной его торце линзой (Л) либо без фокусировки, в зависимости от типа световода. Излучение с выходного торца световода поступает на фотоприемный элемент (Ф), величина фототока которого измеряется с помощью цифрового микроамперметра.

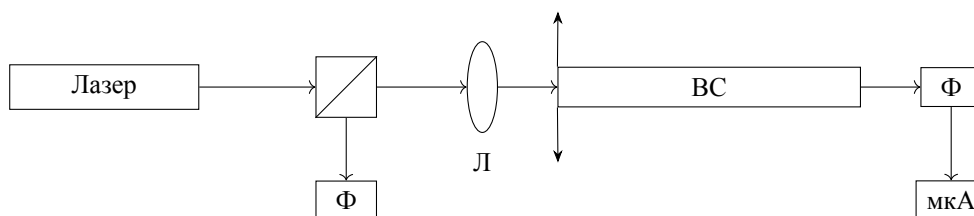


Рисунок 1.2 – Схема экспериментальной установки:

И – источник излучения; ВС – волоконный световод; Л – фокусирующая линза; Ф – фотоприемник

Реальная экспериментальная установка включает полимерный либо стеклянный многомодовый волоконные световоды (выданные преподавателем). Диаметр сердцевины полимерного световода может составлять от 0,5 мм до 3 мм, стеклянного примерно 0,05 мм. Источником излучения служит He-Ne лазер ГН-2П (выходная мощность примерно 1 мВт, длина волны

излучения 0.63 мкм). Входной конец волоконного световода закреплён на столике с микрометрической подвижкой, так что его торец может смещаться на заданную величину (с точностью до 5 мкм) в поперечном (или продольном) направлении относительно некоторого поперечного сечения светового пучка. Излучение с выходного конца световода поступает на фотодиод ФД-24К, фототок которого линейно зависит от световой мощности, падающей на него, и измеряется с помощью цифрового микроамперметра. Для исключения влияния нестабильности выходной мощности лазера на результаты измерений, величина мощности излучения лазера контролируется с помощью второго фотодиода (Ф), на который подается часть световой мощности с помощью светоделительного кубика.

1.3 Порядок выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

1.3.1 Ознакомиться с экспериментальной установкой, принципом её работы и назначением отдельных элементов.

1.3.2 Изучить основные теоретические сведения по вопросам распространения лазерного излучения, интеграла перекрытия и эффективности ввода света в волоконный световод.

1.3.3 Получить от преподавателя оптическое волокно и линзу и записать:

- диаметр сердцевины световода;
- диаметр оболочки световода;
- показатели преломления сердцевины и оболочки;
- фокусное расстояние линзы.

Для линзы необходимо определить фокусное расстояние самостоятельно.

1.3.4 Выполнить расчёт числовой апертуры световода по формуле

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.10)$$

1.3.5 Рассчитать коэффициент отражения на входном торце световода

$$R = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2, \quad (1.11)$$

где $n_0 = 1$ – показатель преломления воздуха.

1.3.6 Получить допуск к выполнению работы.

1.3.7 Включить лазер и выдержать время прогрева не менее 5 минут, для стабилизации мощности излучения.

1.3.8 Измерить интенсивность излучения с помощью фотодиода, зафиксируйте значения фототока фотодиода и проверочного фотодиода.

1.3.9 Установить лезвие на микрометрическом столике между лазером и фотоприёмником.

1.3.10 Перемещая лезвие поперёк лазерного пучка с шагом 0,01 мм, зарегистрировать зависимость фототока от положения лезвия.

1.3.11 Результаты измерений занести в таблицу.

1.3.12 Построить график зависимости фототока от положения лезвия.

1.3.13 Согласно 1.1.4 определить диаметр лазерного пучка.

1.3.14 Убрать нож с установки и повторно зафиксировать фототок с фотодиодов.

1.3.15 Установить волоконный световод в экспериментальную установку без фокусирующей линзы.

1.3.16 Измерить фототок при отсутствии смещения.

Таблица 1.1 – Измерение радиуса лазерного пучка методом ножа

Положение лезвия, мм	Фототок, мкА

1.3.17 Выполнить серию измерений при поперечном смещении входного торца световода.

1.3.18 Для каждого положения зарегистрировать фототок основного и контрольного фотодиодов.

Результаты измерений занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Экспериментальное исследование ввода без линзы

Смещение, мкм	$I_{\text{вых}}$, мкА	$I_{\text{лаз}}$, мкА	Нормированный сигнал

Нормированный сигнал рассчитывать по формуле:

$$\frac{I_{\text{вых}}/I_{\text{лаз}}}{I_{\text{вых макс}}/I_{\text{лаз ср.}}} \quad (1.12)$$

1.3.19 Повторить измерения не менее трёх раз и выполнить усреднение результатов.

1.3.20 Установить фокусирующую линзу, выданную преподавателем.

1.3.21 Рассчитать радиус перетяжки пучка

$$w_0 = \frac{\lambda f}{\pi w_L}. \quad (1.13)$$

где f – фокусное расстояние линзы;

w_L – радиус лазерного пучка на линзе.

1.3.22 Определить ожидаемую эффективность ввода при использовании линзы.

1.3.23 Повторить пункты 1.3.16-1.3.19.

1.3.24 Результаты расчётов занести в таблицу.

Таблица 1.3 – Расчёт эффективности ввода с линзой

Смещение, мкм	Эффективность ввода η
0	
50	
100	
150	
200	
250	
300	

1.3.25 Построить экспериментальные зависимости эффективности ввода от величины поперечного смещения для случаев:

- без линзы;

- с линзой.

1.3.26 Сделать выводы по результатам выполненной работы.

1.3.27 Оформить отчёт.

1.4 Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Цель работы.
- 2) Схему экспериментальной установки.
- 3) Основные расчётные формулы.
- 4) Исходные данные согласно выданному заданию.
- 5) Расчёт числовой апертуры световода.
- 6) Расчёт коэффициента отражения на входном торце световода.
- 7) Таблицу экспериментальных данных для метода ножа Фуко.
- 8) График зависимости фототока от положения лезвия.
- 9) Расчёт радиуса лазерного пучка.
- 10) Расчет перетяжки лазерного луча в фокусе линзы.
- 11) Таблицы экспериментальной зависимости фототока от смещения оптического волокна.
- 12) Графики экспериментальных зависимостей фототока от положения оптического волокна.
- 13) Выводы по работе.

1.5 Контрольные вопросы

- 1.5.1 Каковы основные достоинства волоконно-оптических элементов?
- 1.5.2 Для чего в работе необходим контроль мощности источника излучения?
- 1.5.3 Поясните суть понятия «Интеграл перекрытия»?
- 1.5.4 Дайте определение понятия «эффективность ввода света в световод».
- 1.5.5 Только ли интегралом перекрытия определяется эффективность ввода света в световод?
- 1.5.6 Каковы геометрические параметры полимерного и стеклянного волоконных световодов?

2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

2.1 Введение

Цель работы: Экспериментальное исследование принципа измерения микроперемещений волоконно – оптическим датчиком амплитудного типа на основе полимерного оптического волокна; отработка методики расчета амплитудной характеристики датчика; определение участка характеристики, обеспечивающего заданную величину нелинейности.

2.2 Краткие теоретические сведения

Амплитудные волоконно-оптические датчики (ВОД) представляют собой волоконно-оптические устройства, в которых внешнее воздействие приводит к непосредственному изменению интенсивности света в приемном волоконном световоде [2-6]. Такие ВОД имеют наиболее простую конфигурацию, в то же время они могут обеспечить достаточно высокие характеристики измерительного преобразователя. Один из принципов построения амплитудных ВОД пропускающего типа основан на изменении величины связи между отдельными волоконными световодами, торцы которых разделены воздушным промежутком, или эффективности возбуждения света в световоде, при наличии внешних воздействий, приводящих к смещению торцов передающего или приемного световодов. Многие физические воздействия (температура, линейное ускорение, электрическое напряжение, магнитное поле и т.д.) могут быть преобразованы в продольные или поперечные смещения торца световода относительно другого торца либо относительно возбуждающего светового пучка. Оптическое пропускание систем «световой пучок-световод» или «световод-световод» существенно зависит в этом случае от величины интеграла перекрытия амплитудного распределения возбуждающего светового поля на входном торце приемного световода $U(x)$ и суммарным распределением полей направляемых мод приемного световода в плоскости входного торца $V(x)$:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \cdot V(x) dx \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} U^2(x) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} V^2(x) dx}, \quad (2.1)$$

где x – поперечная координата (данное соотношение записано для одномерного случая, когда световое поле считается однородным в направлении одной из поперечных координат).

В случае ограниченных возбуждающих световых пучков величина данного интеграла перекрытия изменяется как при поперечных, так и при продольных смещениях этих распределений. Действительно, если распределение $V(x)$ зависит только от характеристик световода, то функция $U(x)$ может быть смещена относительно $U(x)$ в поперечном направлении или меняет свой масштаб при продольном сдвиге.

Для лазерных пучков, соответствующих основной моде гауссова пучка, распределение интенсивности света по поперечной и продольной координатам определяется соотношением:

$$I = I_0 \cdot \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right]^{-1} \cdot \exp \left(-\frac{2x^2}{w^2} \right), \quad (2.2)$$

где $z_0 = \frac{kw_0^2}{2} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ – продольный размер перетяжки пучка;

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right);$$

w_0 – полуширина пучка в перетяжке (при $z = 0$);

z – продольная координата (для простоты будем рассматривать одномерные гауссовы пучки).

Измерительные приборы должны обеспечивать заданные метрологические характеристики, к числу которых относится нелинейность рабочей характеристики прибора. В идеале связь между входным воздействием и выходной величиной измерителя должна описываться линейной функцией. В реальных приборах этого достичь невозможно и одной из важнейших характеристик измерительных приборов является нелинейность рабочей характеристики $\delta_{\text{нел}}$, измеряемая в процентах. Она определяется соотношением:

$$\delta_{\text{нел}} = |(U_p - U_{\text{ид}}) / U_{\text{ид}}| \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

где U_p и $U_{\text{ид}}$ – реальные и идеальные (определяемые линейной зависимостью) значения выходной величины при некотором значении входного воздействия.

Смысл этих величин поясняет (рисунок), на котором схематично изображена рабочая характеристика измерительного устройства.

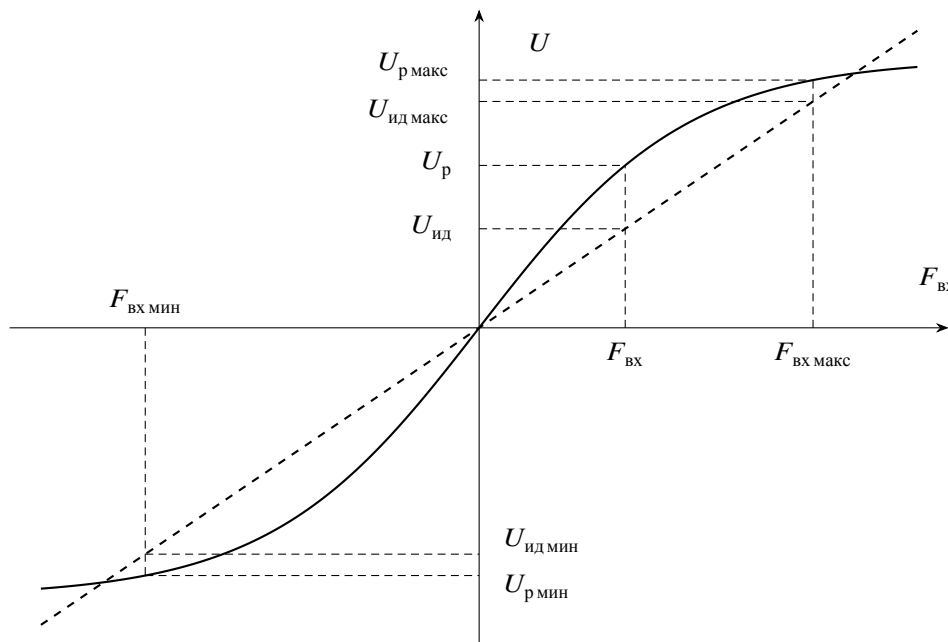


Рисунок 2.1 – Идеальная характеристика

2.3 Описание экспериментальной установки

Обобщенная схема экспериментальной установки для исследования принципа измерения микроперемещений (или макроперемещений) с помощью волоконно-оптического датчика (ВОД) амплитудного типа с оптическим волокном представлена на рисунке 2.2 здесь излучение He-Ne лазера вводится в приемный волоконный световод (BC_1) с помощью промежуточного передающего световода (BC_2) или непосредственно путем фокусировки света на входной его торец. Излучение с выходного торца приемного световода поступает на фотоприемный элемент (Ф). Величина фототока, генерируемого фотоприемным элементом, прямо пропорциональна величине световой мощности, воспринимаемой фотоприемником.

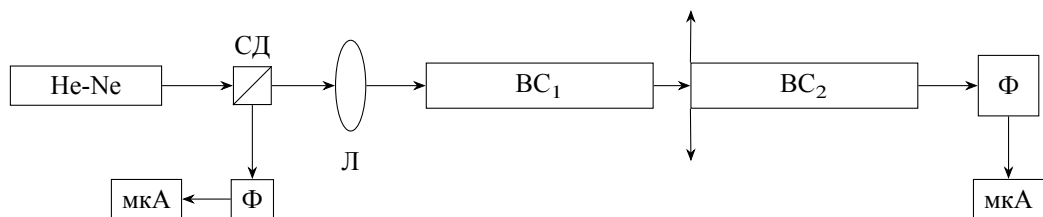


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки
He-Ne – геле-неоновый лазер;

Реальная экспериментальная установка включает полимерный волоконные световоды с диаметром сердцевины, выданные преподавателем, от 0,5 мм до 3 мм, возбуждаемый фокусированным или нефокусированным излучением He-Ne лазера ГН-2П (длина волны излучения 0,63 мкм). Входной конец волоконного световода закреплен на столике с микрометрической подвижкой, так что его торец может смещаться на заданную величину (с точностью до 5 мкм) в поперечном (или продольном) направлении относительно некоторого поперечного сечения светового пучка. Излучение с выходного конца полимерного световода поступает на фотодиод ФД-24К, фототок которого измеряется с помощью цифрового микроамперметра. Для исключения влияния нестабильности выходной мощности лазера на результаты измерений, величина мощности излучения лазера контролируется с помощью второго фотодиода.

2.4 Порядок выполнения работы

2.4.1 Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее отдельными элементами.

2.4.2 Получить от преподавателя конкретное задание на работу (разные варианты включают фокусировку светового пучка на входной торец световода линзами с разными фокусными расстояниями).

2.4.3 Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

2.4.4 Получить допуск к работе.

2.4.5 Включить лазер и подождать 5 - 10 минут.

2.4.6 Измерить фототок на фотодиодах без волоконных световодов.

2.4.7 Установить BC_1 и с помощью юстировки добиться максимального значения фототока на фотодиоде, зафиксировать это значение.

2.4.8 Установить в установку BC_2 .

2.4.9 Провести экспериментальное исследование зависимости оптической мощности на выходе световода (BC_2) от величины поперечного смещения его входного торца относительно светового пучка. В процессе измерений контролировать мощность излучения лазера с помощью вспомогательного фотодиода.

2.4.10 Результаты измерений занести в таблицу (таблица 2.1):

Таблица 2.1 – Значения фототока от смещения волоконного световода

Смещение, мкм	$I_{\text{вых}}$, мкА	$I_{\text{лаз}}$, мкА	Нормированный сигнал

Нормированный сигнал рассчитывать по формуле:

$$\frac{I_{\text{вых}}/I_{\text{лаз}}}{I_{\text{вых макс}}/I_{\text{лаз ср}}} \quad (2.4)$$

2.4.11 Построить график полученной зависимости с учетом нормировки сигнала с выхода световода относительно выходной мощности лазера.

2.4.12 Повторить измерения п. 2.4.9 три раза, провести усреднение результатов измерений.

2.4.13 Используя построенный на основе результатов усреднения график, определить величину линейного участка характеристики, позволяющего обеспечить величину ее нелинейности не более 5%.

2.4.14 В предположении гауссовых распределения поля светового пучка и модового поля на торце световода построить расчетную зависимость оптического пропускания системы от поперечного смещения.

2.4.15 Сравнить результаты моделирования с экспериментальными результатами.

2.4.16 Оформить отчет по работе.

2.5 Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- схема экспериментальной установки;
- задание на работу;
- результаты экспериментального исследования в виде таблицы и графика;
- результаты численного моделирования величины интеграла перекрытия для заданных экспериментальных параметров;
- вывод по работе.

2.6 Контрольные вопросы

2.6.1 Каковы основные достоинства волоконно-оптических датчиков?

2.6.2 Что понимается под ВОД с амплитудной модуляцией?

2.6.3 Какие физические воздействия могут измеряться с помощью ВОД амплитудного типа?

2.6.4 Для чего в ВОД амплитудного типа контролируется мощность источника излучения?

2.6.5 Как определяется нелинейность характеристики ВОД?

2.6.6 Поясните суть понятия «интеграл перекрытия»?

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДА

3.1 Введение

Цель работы Освоение экспериментальных методик по исследованию волоконно-оптических элементов; экспериментальное исследование принципа измерения линейных перемещений оптическим датчиком зондового типа; определение величины участка характеристики преобразования устройства с нелинейностью, не превышающей заданную величину.

3.2 Краткие теоретические сведения

Амплитудные волоконно – оптические (или оптические) датчики имеют простую конфигурацию, в то же время они могут обеспечить достаточно высокие характеристики измерительного преобразователя. В волоконнооптических датчиках (ВОД), построенных по схеме оптического зонда, излучаемое, отраженное или рассеянное объектом измерения световое поле выделяется с помощью приемной оптической головки, состоящей из объектива и приемного волоконного световода. Эта информация поступает на фотоприемник. Один из принципов построения амплитудных оптических датчиков зондового типа основан на изменении величины оптической мощности, отраженной объектом и принимаемой зондом, при линейном смещении объекта относительно зонда. Многие воздействия могут быть преобразованы в продольные или поперечные смещения отражающего элемента, связанного с объектом измерения.

3.3 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для исследования принципа измерения перемещения объекта с помощью ВОД, построенных по схеме оптического зонда, представлена на рисунке 3.1.

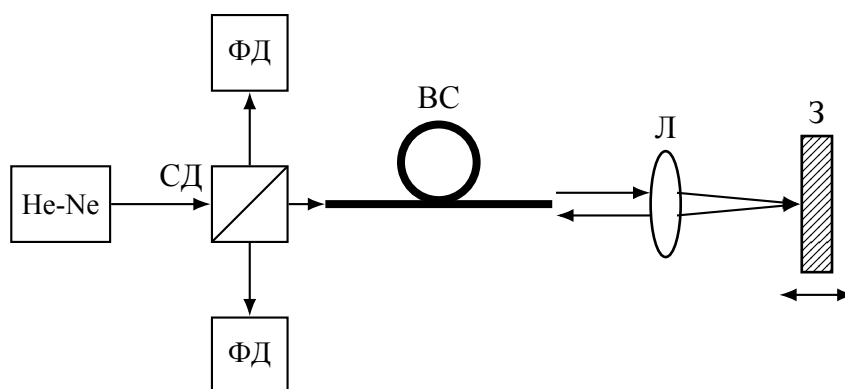


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки:

СД – светоделитель; ВС – волоконный световод; ФД – фотодиод; Л – линза; З – зеркало

Экспериментальная установка включает He–Ne лазер, светоделительный кубик (СД), волоконный световод (полимерный или кварцевый), фокусирующую линзу (Л), зеркало или отражающую поверхность (З), и фотодиоды (ФД). Зеркало закреплено на столике с микрометрической подвижкой, позволяющем позиционировать и смещать его с точностью в 5 мкм. Излучение лазера проходит через светоделительный кубик, вводится в полимерный световод (ВС),

а излучение с выходного торца световода фокусируется на зеркало линзой (Л). Отраженное от зеркала световое поле той же линзой фокусируется на выходной торец волоконного световода и распространяется в световоде в обратном направлении. После выхода из световода это излучение с помощью светоделительного кубика направляется на фотодиод (ФД), фототок которого пропорционален световой мощности. При смещении зеркала относительно фокальной плоскости линзы (Л) пространственная структура светового поля, прошедшего через эту линзу в обратном направлении, изменяется. В зависимости от положения зеркала меняется величина световой мощности, захваченной световодом и распространяющейся в нем в обратном направлении. Соответственно, меняется величина фототока, генерируемого фотодиодом. Таким образом, величина фототока зависит от положения отражающего объекта (зеркала), что может быть использовано для измерения величины его смещения. Для контроля мощности лазерного излучения, которая в процессе выполнения работы может изменяться, служит второй фотодиод, на который направляется часть излучения лазера, выделяемая с помощью того же светоделительного кубика.

3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1 Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее отдельными элементами.

3.4.2 Получить от преподавателя конкретное задание на работу (разные варианты включают линзы с разными фокусными расстояниями).

3.4.3 Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

3.4.4 После допуска к работе провести экспериментальное исследование зависимости тока фотодиода от положения зеркала (его расстояния относительно фокусирующей линзы). В процессе измерений контролировать мощность излучения лазера с помощью вспомогательного фотодиода. Результаты измерений занести в таблицу:

Таблица 3.1 – Экспериментальное исследование значения фототока от перемещения зеркала

Смещение, мкм				
$I_{\text{вых}}$				
$I_{\text{лаз}}$				
$\frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{лаз}}}$				
$\frac{I_{\text{вых макс}}}{I_{\text{лаз ср.}}}$				

3.4.5 Построить график полученной зависимости с учетом нормировки сигнала с выхода световода относительно выходной мощности лазера.

3.4.6 Используя построенный график, определить величину линейного участка характеристики, позволяющего обеспечить величину ее нелинейности не более 5%.

3.4.7 Повторить измерения пункта 3.4.4 три раза, провести усреднение результатов измерений.

3.4.8 Оформить отчет по работе.

3.5 Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- схема экспериментальной установки;
- задание на работу;
- результаты экспериментального исследования в виде таблицы и графика;
- выводы по работе;

3.6 Контрольные вопросы

- 3.6.1 Каковы основные достоинства волоконно-оптических датчиков?
- 3.6.2 Что понимается под ВОД с амплитудной модуляцией?
- 3.6.3 В чем отличие ВОД зондового типа от ВОД с оптическим преобразователем?
- 3.6.4 Для чего в ВОД амплитудного типа контролируется мощность источника излучения?
- 3.6.5 Как определяется нелинейность характеристики ВОД?
- 3.6.6 Какой из элементов в рассматриваемой схеме в наибольшей степени влияет на динамический диапазон устройства?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ

4.1 Введение

Цель работы: Экспериментальное исследование изменений состояния поляризации излучения лазера в многомодовых полимерных волоконных световодах.

4.2 Краткие теоретические сведения

Электромагнитная волна с векторами $\vec{E}$ и $\vec{H}$, направление которых может быть однозначно определено в любой момент времени, называется поляризованной.

При случайных положениях векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в пространстве поле является неполяризованным.

Плоскость поляризации – плоскость, проходящая через вектор $\vec{E}$ и направление распространения волны. В зависимости от того, какую фигуру описывает конец вектора $\vec{E}$ в пространстве при распространении волны, различают линейную, эллиптическую и круговую поляризации.

Математически волну с произвольным видом поляризации можно представить в виде двух составляющих:

$$\begin{aligned}\vec{E}_x &= \vec{x}_0 E_{1m} \cos(\omega t - kz) \\ \vec{E}_y &= \vec{y}_0 E_{2m} \cos(\omega t - kz - \varphi)\end{aligned}\quad (4.1)$$

В общем случае эти составляющие в плоскости, ортогональной волновому вектору, имеют разные амплитуды и сдвинуты по фазе друг относительно друга.

Выражение для поля плоской волны с линейной поляризацией в общем случае можно записать в форме:

$$\vec{E} = (\vec{x}_0 E_{1m} + \vec{y}_0 E_{2m}) \cdot \cos(\omega t - kz) = E_0 (\vec{x}_0 \cos \alpha + \vec{y}_0 \sin \alpha) \cdot \cos(\omega t - kz) \quad (4.2)$$

где $\alpha = \arctg(E_{2m}/E_{1m})$.

В случае круговой поляризации выражение для поля плоской волны может быть записано в виде:

$$\vec{E} = E_0 [\vec{x}_0 \cos(\omega t - kz) + \vec{y}_0 \sin(\omega t - kz)] \quad (4.3)$$

Выражение для поля плоских волн при эллиптической поляризации, в комплексной форме принимает вид:

$$\vec{E} = [\vec{x}_0 E_{1m} + \vec{y}_0 E_{2m} \exp(-i\varphi)] \cdot \exp[i(\omega t - kz)] \quad (4.4)$$

Излучение большинства лазерных приборов поляризовано линейно, для чего часто используются дополнительные элементы. В гелий-неоновых лазерах это достигается с помощью расположения выходных окон газоразрядной трубки под углом Брюстера относительно направления распространения света (оси трубки). Излучение некогерентных источников не поляризовано и для получения заданного состояния его поляризации используются различные поляризационные элементы. Их называют обычно поляризаторами или поляроидами, а по роду используемых физических эффектов их можно разделить на элементы с анизотропией оптического поглощения (или оптическим дихроизмом) и с анизотропией показателя преломления.

Классическим примером материала с анизотропией оптического поглощения является кристалл турмалина, для которого поглощение обыкновенно поляризованного света значительно выше, чем для необыкновенно поляризованного. Однако он редко применяется для создания поляризационных элементов, т.к. в видимом диапазоне и поглощение необыкновенной волны оказывается существенным. Достаточно хорошими свойствами обладают синтетические органические пленочные материалы, в которых молекулы имеют вид длинных цепочек и ориентированы преимущественно в одном направлении, благодаря специальной обработке. Примером являются пленки поливинилового спирта с добавками йода. Они могут пропускать до 80% света, поляризованного в одном направлении, и менее 1% света, поляризованного в ортогональном направлении. Стоимость такого рода пленочных поляризаторов оказывается значительно более низкой по сравнению с таковой для монокристаллических поляризаторов. Однако существенным недостатком пленочных поляризаторов является возможность их разрушения при очень высокой интенсивности проходящего излучения.

Поляризующие элементы из природного исландского шпата (кальцит, CaCO_3) обладают высоким оптическим качеством, прозрачны в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,2 мкм, устойчивы к воздействию интенсивного лазерного излучения. Существует несколько типов таких элементов. Это призмы Николя, Глана, Волластона, Рошона и т.д. Все они используют эффект анизотропии показателя преломления. Призмы Николя и Глана пропускают излучение лишь одной поляризации, призмы Волластона и Рошона на выходе имеют два ортогонально поляризованных световых луча, распространяющихся под некоторым углом относительно направления падающего излучения.

Обратной задачей по отношению к получению поляризованного излучения из неполяризованного является преобразование поляризованного излучения в неполяризованное. Хотя подобная задача в техническом смысле не является очень актуальной, но подобные преобразования достаточно часто наблюдаются в многомодовых волоконных световодах и закономерности подобных преобразований представляют интерес.

Состояние поляризации света может оставаться неизменным в волоконных световодах (ВС) специального типа – ВС с сохранением поляризации (ВС с двулучепреломлением). А в обычных ВС с круговой симметрией в поперечном сечении оно нарушается.

Определить характер поляризации излучения, прошедшего через ВС, можно путем экспериментального исследования, что и предлагается проделать в настоящей работе.

4.2.1 Закон Малюса

Он определяет интенсивность линейно поляризованной световой волны, прошедшей через поляризатор (рисунок 4.1).

$$I = I_0 \cdot \cos^2(\alpha). \quad (4.5)$$

где α – угол между направлением вектора $\vec{E}$ в световой волне и главным направлением поляризатора;

I_0 – интенсивность падающей на поляризатор световой волны.

Точность этой зависимости при экспериментальном ее исследовании может указывать на отличие состояния поляризации световой волны от линейной или на качественные характеристики поляризационных элементов подавления (пленочные интенсивности поляроиды даже зачастую идеально не линейно поляризованной световой волны при ортогональности ее плоскости поляризации и главного направления поляризатора).

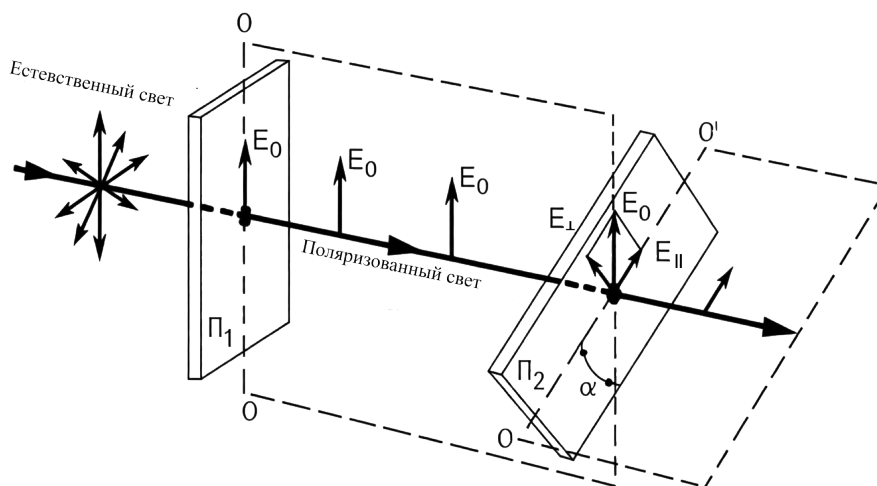


Рисунок 4.1 – Схематическое изображение прохождения естественного света, через два поляризатора

4.3 Описание экспериментальной установки

Схемы экспериментальных установок для исследования состояния поляризации излучения лазера и качества поляризационного элемента, а также состояния поляризации излучения, прошедшего через ВС, представлены на рисунках 4.2а 4.2б

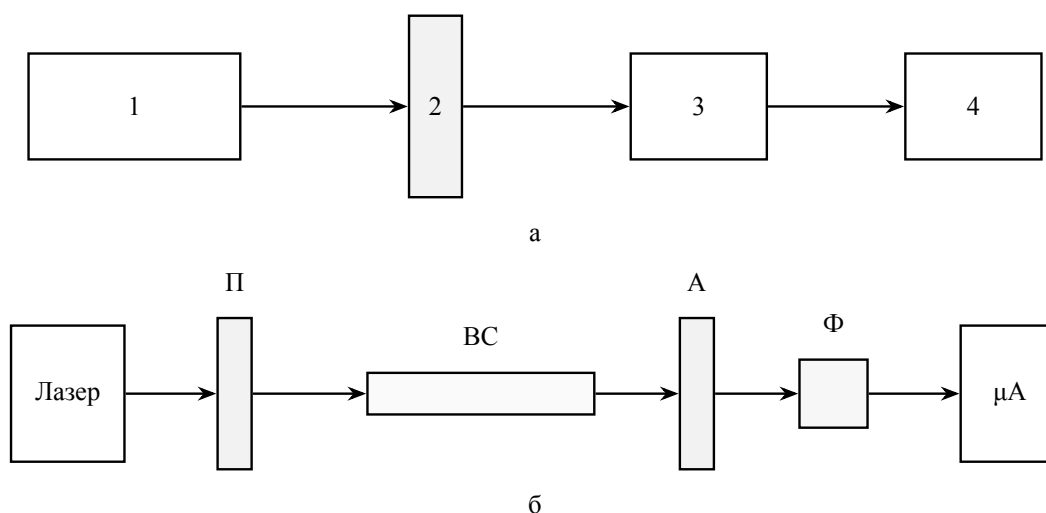


Рисунок 4.2 – Схемы экспериментальных установок:

(а) исследование состояния поляризации излучения лазера и качества поляризационного элемента;

1 – источник излучения; 2 – поляризатор; 3 – фотодиод; 4 – измеритель фототока.

(б) схема исследования влияния волоконного световода на поляризацию излучения:

П – поляризатор; ВС – волоконный световод; А – Анализатор; Л – фокусирующая линза; Ф – фотодиод; μA – микроамперметр.

Первая установка предназначена для исследования качества поляризатора, что определяется соответствием зависимости интенсивности прошедшего через поляризатор излучения от ориентации его плоскости поляризации закону Малюса. Вторая установка отличается от первой тем, что между лазером и поляризатором в схему вводятся образцы полимерных световодов разной длины. В идеале при малой длине полимерного ВС следует ожидать сохранения поляризации лазерного излучения, но при ее увеличении должна наблюдаться этого излучения вследствие эффекта преобразования направляемых мод световода.

4.4 Порядок выполнения работы

4.4.1 Реальные экспериментальные установки включают He – Ne лазер ГН-2П (длина волны излучения 0,63 мкм, излучение имеет линейную поляризацию) и образцы полимерных ВС с разной длиной и диаметрами сердцевин (выдаются преподавателем). В качестве поляризаторов используются пленочные поляроиды. Излучение источника во второй установке с выходного торца полимерного ВС проходит через поляризатор и поступает на фотодиод ФД-24К, фототок которого измеряется с помощью цифрового микроамперметра. Положение поляризатора может изменяться для задания угла между его главным направлением и некоторым направлением в световом поле (для лазерного излучения оно соответствует положению плоскости поляризации излучения).

4.4.2 Ознакомиться с экспериментальными установками и ее отдельными элементами.

4.4.3 Получить от преподавателя конкретное задание на работу, которое включает:

- фокусные расстояния линз, используемых для передачи светового излучения с выходного торца ВС на фотодиод;

- тип поляризационного элемента.

- волоконные световоды.

4.4.4 Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

4.4.5 Получить допуск к выполнению работы.

4.4.6 Включить лазер и дать ему прогреться 5 минут.

4.4.7 Используя экспериментальную установку (рисунок 4.2а), снять зависимость величины фототока от положения поляризационного элемента для проверки соответствия ее закону Малюса. Угловое положение поляризатора изменять с дискретом в 10° в диапазоне до 180° . Повторить измерения три раза и занести результаты в таблицу.

4.4.8 Для выданного полимерного ВС на экспериментальной установке (рисунок 4.2б) снять зависимость величины фототока от положения поляризационного элемента для установления влияния ВС на состояние поляризации прошедшего через него излучения. Угловое положение поляризатора изменять с дискретом в 10° в диапазоне до 180° . Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

4.4.9 Повторить измерения для второго ВС.

Таблица 4.1 – Значения фототока от угла поворота поляризатора

Угол, °				
$I_{\text{вых}}$				
$I_{\text{вых}} / I_{\text{вых. макс}}$				

4.4.10 Построить графики полученных зависимостей.

4.4.11 Оформить отчет по работе.

4.5 Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- схема экспериментальных установок;
- задание на работу;
- результаты экспериментального исследования в виде таблиц и графиков;
- теоретические результаты по расчету угловой зависимости интенсивности линейно поляризованной световой волны, проходящей через поляризационный элемент (закон Малюса);
- вывод по работе.

4.6 Контрольные вопросы

- 4.6.1 Каковы основные достоинства волоконно-оптических элементов?
- 4.6.2 Что подразумевается под поляризованной волной?
- 4.6.3 Поясните суть понятия «линейно поляризованная световая волна»?
- 4.6.4 Поясните суть понятия «световая волна с круговой поляризацией»?
- 4.6.5 Запишите выражение, определяющее закон Малюса.
- 4.6.6 Какие физические эффекты приводят к изменению состояния поляризации света

в ВС?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные методические указания охватывают комплекс практических задач, связанных с экспериментальным исследованием волоконно-оптических устройств технологического назначения. Выполнение лабораторных работ позволяет студентам освоить современные методы измерения и анализа характеристик оптических компонентов, а также приобрести навыки работы с измерительным оборудованием (лазерными источниками, фотоприёмниками, микромеханическими узлами юстировки).

В ходе выполнения заданий обучающиеся закрепляют фундаментальные положения курса, учатся планировать эксперимент, корректно обрабатывать результаты измерений, оценивать инструментальные погрешности и сопоставлять экспериментальные данные с теоретическими моделями. Особое внимание уделяется вопросам нормировки сигналов, учёта нестабильности источника излучения и определения линейных участков характеристик преобразования — навыкам, необходимым для практической работы с измерительными системами.

Освоенные компетенции служат основой для дальнейшего изучения специальных дисциплин в области оплотехники, волоконной оптики и инфокоммуникационных технологий. Полученные знания и умения могут быть применены при решении инженерных задач, связанных с проектированием, настройкой и эксплуатацией волоконно-оптических датчиков, систем передачи информации и технологических установок.

Методические указания также представляют интерес для преподавателей и могут использоваться при организации учебного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, специфика их распространения и методики измерений: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 декабря 2008 г. № 763-ст: введен впервые: дата введения 2010-01-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»). – Москва: Стандартинформ, 2010. – 24 с.
- 2) Бусурин В.И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения/В.И. Басурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 3) Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы/Ю.Н. Кульчин. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
- 4) Волоконно-оптические датчики /Т.Окото, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара и [и др.]; под ред. Т. Окото. - Пер. с яп. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 5) Снайдер А. Теория оптических волноводов/А. Снайдер, Дж. Лав; под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко. – Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- 6) Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. Пособие/В.М. Шандаров. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 190с.
- 7) Шандаров В.М. Исследование волоконно-оптического датчика микроперемещений на основе полимерного оптического волокна: методические указания к лабораторной работе / В.М. Шандаров, П.А. Карпушин. – Томск: ТУСУР, 2011. – 7 с.
- 8) Шандаров В.М. Исследование оптического датчика линейного перемещения объекта, построенного по схеме оптического зонда : методические указания к лабораторной работе / В.М. Шандаров, П.А. Карпушин. – Томск : ТУСУР, 2011. – 6 с.
- 9) Шандаров В.М. Исследование состояния поляризации лазерного излучения в полимерном волоконном световоде: методические указания к лабораторной работе для бакалавров направления 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль – «Оптические системы и сети связи») / В.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2013. – 9 с.
- 10) Шандаров В.М. Исследование эффективности ввода света в волоконный световод: методические указания к лабораторной работе для бакалавров направления 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль – «Оптические системы и сети связи») /В.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2013. – 8 с.