

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**В.М. Шандаров, В.Г. Круглов, В.Ю. Рябченко**

**Волоконно-оптические устройства и системы  
технологического назначения**

Учебно-методическое пособие по лабораторным работам  
для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи»

**Томск 2018**

УДК 537.8(075.8) + 621.371(075.8)

Рецензент:

проф. СВЧ и КР, к.ф.-м.н.

С.Н. Шарангович

**Волоконно-оптические устройства и системы технологического назначения.** Учебно-методическое пособие по лабораторным работам для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» // В.М. Шандаров, В.Г. Круглов, В.Ю. Рябченко / Под ред. В.Ю. Рябченка. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 36 с.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения лабораторных работ по дисциплине «Волоконно-оптические устройства и системы технологического назначения». В пособии содержится необходимый теоретический материал, методические рекомендации для выполнения лабораторных работ, а также варианты заданий для самостоятельного выполнения. Пособие содержит описание пяти лабораторных работ.

Предназначено для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Оптические системы и сети связи».

© В.М. Шандаров, В.Г. Круглов, В.Ю. Рябченко, 2018

© Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2018.

## Содержание

Введение.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 .....	6
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД.....	6
1 Введение.....	6
2 Элементы теории.....	6
3 Описание экспериментальной установки.....	7
4 Порядок выполнения работы .....	8
5 Содержание отчета.....	9
6 Контрольные вопросы .....	10
7 Список литературы .....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 .....	11
8 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ПЛАНАРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД.....	11
1 Введение.....	11
2 Элементы теории.....	11
2.1 Диэлектрические волноводы. Моды диэлектрического волновода.....	11
2.2 Пленочный и градиентный планарные волноводы.....	12
3 Устройство ввода – вывода излучения .....	14
4 Призменные элементы связи.....	14
5 Описание экспериментальной установки.....	15
5.1 Конструкция макета и описание экспериментальной установки.....	15
6 порядок выполнения работы.....	16
7 Контрольные вопросы .....	17
8 Список литературы .....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 .....	19
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКАМИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА.....	19
1 Введение.....	19
2 Элементы теории.....	19
3 Описание экспериментальной установки.....	21

4	Порядок выполнения работы .....	22
5	Содержание отчета.....	23
6	Контрольные вопросы .....	23
7	Список литературы .....	23
	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 .....	25
	ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДА.....	25
1	Введение.....	25
2	Элементы теории.....	25
3	Описание экспериментальной установки.....	25
4	Порядок выполнения работы .....	26
5	Содержание отчета.....	27
6	Контрольные вопросы .....	27
7	Список литературы .....	28
	ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 .....	29
	ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ .....	29
1	Введение.....	29
2	Элементы теории.....	29
3	Закон МАЛЮСА .....	31
4	Описание экспериментальных установок .....	32
5	Порядок выполнения работы .....	33
6	Содержание отчета.....	34
7	Контрольные вопросы .....	34
8	Рекомендуемая литература .....	34
	Список литературы .....	35

## Введение

Дисциплина «Волоконно-оптические устройства и системы технологического назначения» изучается студентами направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» профиля подготовки «Оптические системы и сети связи» в 7 семестре и относится к блоку специальных дисциплин. В рамках лекционного курса осваивается теоретический материал по учебной литературе [1-4], приобретаются навыки практических расчетов.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения лабораторных работ. В пособии содержится необходимый теоретический материал, методические рекомендации для выполнения лабораторных работ, а также варианты заданий для самостоятельного выполнения.

Пособие содержит описание пяти лабораторных работ [5-9].

Список литературы включает источники [1-4], рекомендуемые для самостоятельного и более углубленного изучения вопросов, выносимых на лабораторные работы.

Учебно-методическое пособие может быть рекомендовано для заочной формы обучения, при которой основной формой изучения дисциплины является самостоятельная работа студента над рекомендованной литературой, а также над материалом настоящего пособия. При этом в качестве заданий на лабораторные работы могут быть использованы приведенные в пособии методические рекомендации.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ВОЛОКОННЫЙ СВЕТОВОД

## 1 Введение

**Цель работы:** Экспериментальное исследование зависимостей эффективности ввода света в волоконный световод от его параметров и параметров возбуждающих световых пучков.

## 2 Элементы теории

Волоконные световоды в настоящее время широко применяются как в системах оптической связи, так и в разного рода волоконно-оптических приборах и устройствах, таких как датчики физических воздействий, волоконные лазеры и т.д. С точки зрения практических приложений волоконно-оптических компонентов важными являются вопросы их межсоединений, стыковки волокна с источниками излучения, фотоприемниками и планарными или канальными оптическими волноводами [1 - 4]. Эффективная работа волоконно-оптических компонентов и устройств, в значительной степени зависит от величины оптических потерь в таких соединениях. В связи с этим, вопрос об эффективности ввода света в волоконные световоды является принципиально важным. Эта эффективность в первую очередь зависит от взаимного расположения торца волоконного световода и возбуждающего светового, от распределения модового светового поля на торце световода и распределения амплитуды поля в возбуждающем световом пучке. Оценить величину оптических потерь при возбуждении световода или эффективность ввода можно, определяя величину оптического пропускания системы «световой пучок – световод», которая существенно зависит от величины интеграла перекрытия амплитудного распределения возбуждающего светового поля на входном торце приемного световода  $U(x)$  и суммарного распределения полей направляемых мод приемного световода в плоскости входного торца  $V(x)$ :

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

где  $x$  – поперечная координата. Данное соотношение для простоты записано для одномерного случая, когда световое поле считается однородным в направлении одной из поперечных координат, в реальных ситуациях необходимо учитывать зависимости этих полей от двух поперечных координат. Кроме того, 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 свои форму и масштаб при продольном сдвиге.

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

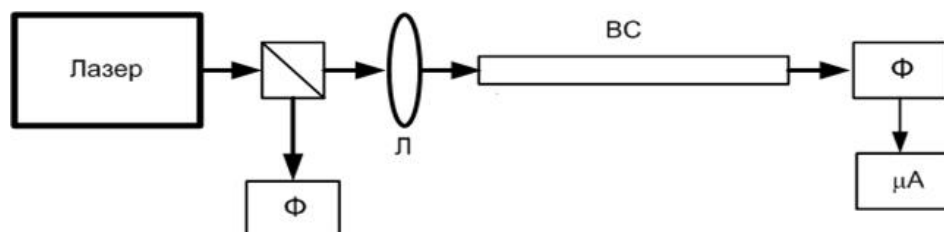
$$I = I_0 \cdot \left[ 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right]^{-1} \exp\left( -\frac{2x^2}{w^2} \right)$$

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).

### 3 Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки для исследования эффективности ввода света в волоконный световод представлена на рис. 1. 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.



И – источник излучения; ОВ – оптическое волокно; Л – фокусирующая

линза; ФД – фотодиод.

Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки

Реальная экспериментальная установка включает полимерный либо стеклянный многомодовый волоконные световоды. Диаметр сердцевины полимерного световода составляет 0,9 мм, стеклянного – 0,05 мм. Источником излучения служит He – Ne лазер ЛГН – 207-А (выходная мощность ~1 мВт, длина волны излучения 633 нм). 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 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.

## 4 Порядок выполнения работы

- 4.1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее отдельными элементами.
- 4.2. Получить от преподавателя конкретное задание на работу, которое включает:
  - тип исследуемого световода;
  - фокусные расстояния линз, используемых для согласования распределения интенсивности в поперечном сечении светового пучка с модовым распределением на торце волоконного световода;
  - данные по показателям преломления материалов световодов для учета френелевских потерь света на отражение от торцов при теоретической оценке ожидаемой эффективности ввода света в световод.
- 4.3. Ответить на контрольные вопросы преподавателя.
- 4.4. Получить допуск к выполнению работы.
- 4.5. Исключив из экспериментальной установки (рис. 1) волоконный световод, измерить величину фототока, соответствующую прямому прохождению светового пучка от источника излучения до фотодиода.
- 4.6. Введя волоконный световод в экспериментальную установку, провести экспериментальное исследование зависимости оптической мощности на выходе световода от величины поперечного и продольного смещения его входного торца относительно светового пучка (в эксперименте исследуется зависимость величины фототока от положения торца



волоконного световода). В процессе измерений контролировать мощность излучения лазера с помощью вспомогательного фотодиода.

4.7. Оценить величину максимальной эффективности ввода, которая будет определяться отношением максимальной величины фототока при наличии световода к фототоку при его отсутствии в экспериментальной установке. Результаты измерений занести в таблицу 1:

Таблица 1

Смещение, МКМ				
$I_{\text{вых}}$				
$I_{\text{лаз}}$				
$(I_{\text{вых}}/I_{\text{лаз}})/$ $(I_{\text{вых макс}}/I_{\text{лаз ср}})$				

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

4.9. Повторить измерения п. 4.6 три раза, провести усреднение результатов измерений.

4.10. В предположении гауссовых распределения поля светового пучка и модового поля на торце световода построить расчетную зависимость оптического пропускания системы от поперечного смещения. Сравнить результаты моделирования с экспериментальными результатами.

4.11. Оформить отчет по работе.

## 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;
- выводы по работе.

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1. Каковы основные достоинства волоконно-оптических элементов?
- 6.2. Для чего в работе необходим контроль мощности источника излучения?
- 6.3. Поясните суть понятия «интеграл перекрытия»?
- 6.4. Дайте определение понятия «эффективность ввода света в световод».
- 6.5. Только ли интегралом перекрытия определяется эффективность ввода света в световод?
- 6.6. Каковы геометрические параметры полимерного и стеклянного волоконных световодов?

## 7 Список литературы

1. В.И.Бусурин, Ю.Р.Носов. Волоконно - оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990 г.
2. Т.Окиси и др. Волоконно - оптические датчики / Под ред. Т.Окиси. Л.: Энергоатомиздат, 1990 г.
3. Ю.Н.Кульчин. Распределенные волоконно – оптические измерительные системы. – М.: Физматлит, 2001 г., 272 с.
4. В.М.Шандаров. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиозлектроники, 2007. – 190с. **ISBN 978-5-86889-377-3.**

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### 8 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВОДА СВЕТА В ПЛАНАРНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД

#### 1 Введение

Одним из важных направлений современной оптоэлектроники является интегральная оптика. Интерес к ней вызван возможностью создания надежных и малогабаритных устройств для оптической обработки информации и управления параметрами оптического излучения. На основе оптических волноводных элементов, интегрированных на общей подложке, и управляемых электрическими и оптическими сигналами, возможно создание модуляторов, коммутаторов, логических устройств, процессоров, которые по удельному энергопотреблению и быстродействию могут конкурировать с микроэлектронными аналогами. Основу элементной базы интегральной оптики составляют диэлектрические волноводы, конструктивно объединяемые с активными и пассивными элементами: лазерными излучателями, фотоприемниками, линзами, дифракционными решетками. В интегрально – оптических схемах используется не только технологическая интеграция компонентов, но и интеграция различных физических явлений. Это определяет круг используемых в интегральной оптике материалов и необходимость применения прецизионных технологических операций при изготовлении волноводных элементов и структур.

#### 2 Элементы теории

##### 2.1 Диэлектрические волноводы. Моды диэлектрического волновода.

Планарный оптический волновод - это диэлектрический слой на диэлектрической подложке с более низким показателем преломления. Световая волна в нем может распространяться за счет полного внутреннего отражения от границ раздела “слой-подложка” и “слой - покровная среда”.

Модой диэлектрического волновода на частоте  $\omega$  является решение волнового уравнения:

$$\nabla^2 \bar{E}(\vec{r}) + k_0^2 n^2(\vec{r}) \cdot \bar{E}(\vec{r}) = 0 \quad (2.1),$$

где  $E$  – напряженность электрического поля световой волны;  $k_0=2\pi/\lambda_0$  – волновое число;  $\lambda_0$  – длина волны света в вакууме;  $n$  – показатель преломления волноводного слоя. В диэлектрических волноводах возможно существование как излучательных, так и направляемых (волноводных) мод. Направляемая мода представляет собой бегущую волну в направлении распространения и стоячую – в направлении нормали к плоскости волновода. Считая направление распространения совпадающим с осью  $Z$  декартовой системы, а направление нормали – с осью  $X$ , выражение для поля моды запишем в виде:

$$E(x,z,t) = E(x) \cdot \exp[i(\omega t - \beta z)] \quad (2.2),$$

где  $\beta = \omega/u_\phi$  – постоянная распространения;  $\omega$   $u_\phi$  – угловая частота и фазовая скорость волны, соответственно.

Из уравнений Максвелла вытекает, что для изотропного оптического волновода, либо для волноводов на основе одноосных кристаллов, при распространении света вдоль главных осей, направляемые моды имеют чисто поперечно – электрическую (ТЕ мода) и поперечно – магнитную (ТМ мода) структуру. Компоненты поля  $E_y$ ,  $H_x$  и  $H_z$  описывают ТЕ – моды, а компоненты  $H_y$ ,  $E_x$ ,  $E_z$  – ТМ – моды. Волновые уравнения для ТЕ и ТМ – волн имеют вид:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \cdot E_y = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \cdot H_y = 0$$

## 2.2 Пленочный и градиентный планарные волноводы

Планарные оптические волноводы (ОВ) по виду распределения показателя преломления по поперечному сечению делят на пленочные ОВ с близким к ступенчатому закону изменения показателя преломления, и градиентные ОВ с плавным изменением показателя преломления. В пленочных ОВ образование направляемой моды можно рассматривать как результат зигзагообразного распространения плоской однородной световой волны в пленке. В градиентном ОВ световой луч распространяется путем рефракции, по криволинейным траекториям. Рассмотрим ступенчатые волноводы, у которых:

$$n_0 > n_1, n_s \quad (2.5).$$

При описании характеристик волноводов вводят понятие эффективного показателя преломления направляемой моды  $N_m$ :

$$N_m = \beta/k_0 = n_0 \cdot \sin\theta_m \quad (2.6),$$

который определяет ее фазовую скорость. Величина  $N_m$  отвечает условию:  $n_0 > N_m > n_S$ .

При заданной частоте световой волны вид решения уравнения (2.3) зависит от величины  $\beta$ . При выполнении неравенств:

$$k_0 n_S < \beta < k_0 n_0$$

решение уравнения (2.3) в области волноводного слоя представляет собой гармоническую функцию, в покровном слое и подложке поле затухает экспоненциально.

Свойства направляемых мод пленочного волновода определяются дисперсионным уравнением, связывающим их фазовые скорости на заданной частоте с параметрами волноводной структуры, а именно с показателями преломления и толщиной пленки  $d$ . Это уравнение можно получить, используя строгий электродинамический подход, включающий решение волнового уравнения и условий для тангенциальных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  на границах раздела. Но можно использовать и менее строгий подход, основанный на лучевой трактовке распространения света в пленке. В конечном итоге, оба метода дают одинаковый результат, поэтому удовлетворение граничных условий используем здесь последний подход.

Для формирования поля направляемой моды, т.е. получения стоячей волны в направлении нормали к поверхности волновода необходимо, чтобы фазовый набег при двукратном прохождении луча внутри пленки был кратен величине  $2\pi$ . Исходя из этого, можно записать:

$$k_0 n_0 d \cdot \cos\theta_m + \phi_{01} + k_0 n_0 d \cdot \cos\theta_m + \phi_{02} = 2\pi m \quad (2.7),$$

где  $m=0,1,2,\dots$ ;  $\phi_{01}$  и  $\phi_{02}$  – фазовые сдвиги при полном внутреннем отражении светового луча от границ;  $\theta_m$  – угол падения луча на границы раздела для направляемой моды порядка  $m$ ;  $k_0 n_0 d \cdot \cos(\theta_m)$  – фазовый набег при прохождении лучом расстояния от одной границы пленки до другой, определяемый поперечной составляющей волнового числа  $k_0 n_0 \cdot \cos(\theta_m)$  и толщиной пленки  $d$ . Это соотношение и является дисперсионным уравнением пленочного волновода. Выражения для сдвига фазы при полном внутреннем отражении для волн, соответствующим ТЕ и ТМ модам, имеют вид:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{01,0S}}{2}\right)_{\text{TM}} = -\frac{\left(\frac{n_0}{n_{1,S}}\right)^2 \sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta - n_{1,S}^2}}{n_0 \cos \theta} \quad (2.9)$$

Тогда уравнение (2.7) можно записать в форме:

$$k_0 n_0 d \cos \theta + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_0^2 \sin^2(\theta) - n_1^2}{n_0^2 \cos^2(\theta)}} + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_0^2 \sin^2(\theta) - n_S^2}{n_0^2 \cos^2(\theta)}} = \pi m \quad (2.10).$$

Учитывая, что

$$n_0 \sin \theta = N_m \quad \text{и} \quad n_0 \cos \theta = \sqrt{n_0^2 - n_0^2 \cdot \sin^2 \theta} = \sqrt{n_0^2 - N_m^2},$$

(2.10) можно представить в виде:

$$k_0 d \sqrt{n_0^2 - N_m^2} = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_1^2}{n_0^2 - N_m^2}} + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_S^2}{n_0^2 - N_m^2}} = \pi m \quad (2.11).$$

### 3 Устройство ввода – вывода излучения

Возбуждение диэлектрических волноводов можно осуществить источниками, расположенными как в поперечном сечении волновода, так и вдоль её поверхности. В первом случае для эффективного возбуждения источник должен воспроизводить структуру поля возбуждаемой моды, во втором – фазовое распределение между источниками должно отвечать изменению фазы поля собственной волны волновода вдоль направления её распространения.

### 4 Призменные элементы связи

Призменный элемент ввода – вывода излучения использует эффект туннелирования света через тонкий воздушный зазор между призмой и поверхностью волновода. Материал призмы имеет более высокий показатель преломления, чем материал волновода. При выводе излучения энергия волноводной моды в области связи, просачиваясь через воздушный зазор, излучается в призму под некоторым углом. Согласно принципу взаимности, если в призме распространяется световая волна в направлении, противоположном направлению излученной волны, то она, туннелируясь через тот же зазор, может возбуждать в волноводе

направляемую моду. Это соответствует работе призмы в качестве элемента ввода. На рис. 3.1 приведена схема волновода с призмными элементами. При оптимальных условиях эффективность призмных элементов ввода с однородным зазором может достигать 80%, а в случае неоднородного зазора возможна эффективность ввода до 100%.

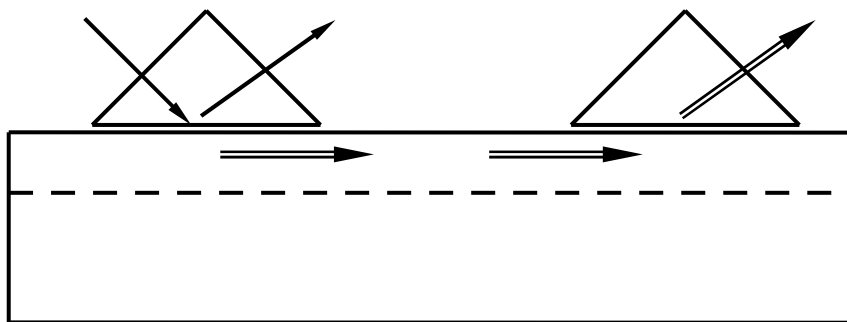


Рисунок 4.1 - Схема ввода – вывода света и расположение призм

## 5 Описание экспериментальной установки

### 5.1 Конструкция макета и описание экспериментальной установки

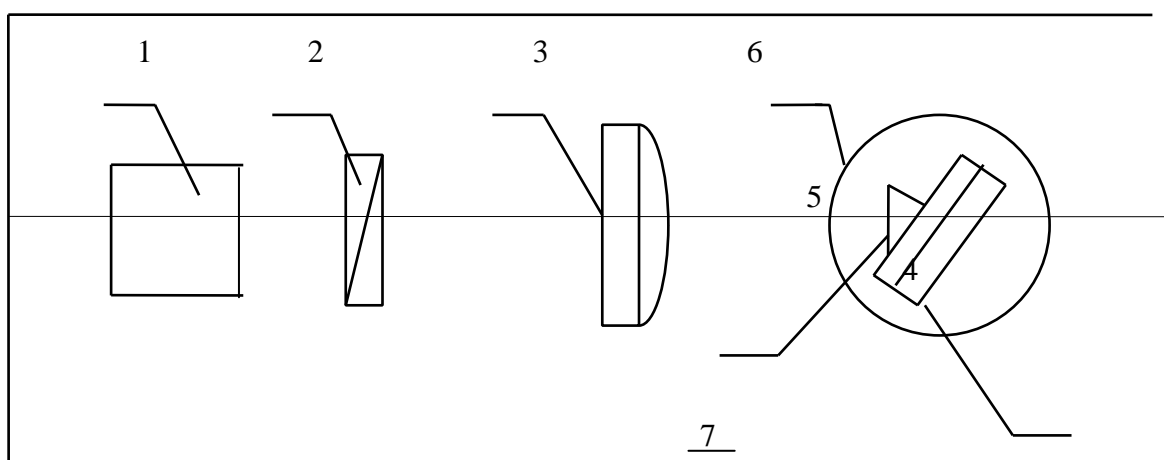


Рисунок 5.1 - Схема экспериментальной установки

1 – He – Ne лазер; 2 – поляризатор; 3 – линза фокусирующая; 4 – волновод; 5 – призма; 6 – теодолит; 7 – основание.

Установка (Рис. 4.1) включает He – Ne лазер (1) ( $\lambda=0,63$  мкм), поляризатор (2), линзу (3) и оптический волновод, размещенный на вращающемся столике теодолита 2Т2А. Волновод с призмой устанавливается на теодолит так, чтобы можно было измерить углы ввода излучения в волновод. Положение столика теодолита в горизонтальной плоскости регулируется подъемными винтами. Фокусирующая линза (3) предназначена для повышения

эффективности ввода света в планарный волновод и размещается между теодолитом и лазером с поляризатором. Для ввода излучения в волновод используется призмный элемент (5). С помощью фотодиода измеряется интенсивность светового луча, отраженного от основания призмы. Сигнал с фотодиода подается на микроамперметр.

Для снятия отсчетов углов, характеризующих положение столика теодолита в горизонтальной плоскости, используется следующая методика. В центральном окне в поле зрения измерительного микроскопа теодолита - изображения диаметрально противоположных штрихов лимба отсчетного устройства, разделенные горизонтальной линией. В верхнем окне видны цифры, соответствующие углу в градусах, а также шкала из шести цифр (от 0 до 5), соответствующих десяткам угловых минут. В правом вертикальном окне - шкала микрометра, у которой каждое деление соответствует одной угловой секунде. Для получения отсчета необходимо маховичком микрометра совместить верхнее и нижнее изображения штрихов лимба горизонтального круга. Если в верхнем окне видны два градусных отсчета, то рабочим является число, находящееся в пределах шкалы десятков минут. Цифра этой шкалы, находящаяся под серединой числа градусов, соответствует числу десятков минут. Число единиц минут и секунды берутся со шкалы микрометра. В качестве примера на рис. 4.2 изображено поле зрения отсчетного микроскопа. В данном случае отсчет угла в горизонтальной плоскости -  $17^{\circ} 35' 25''$ .

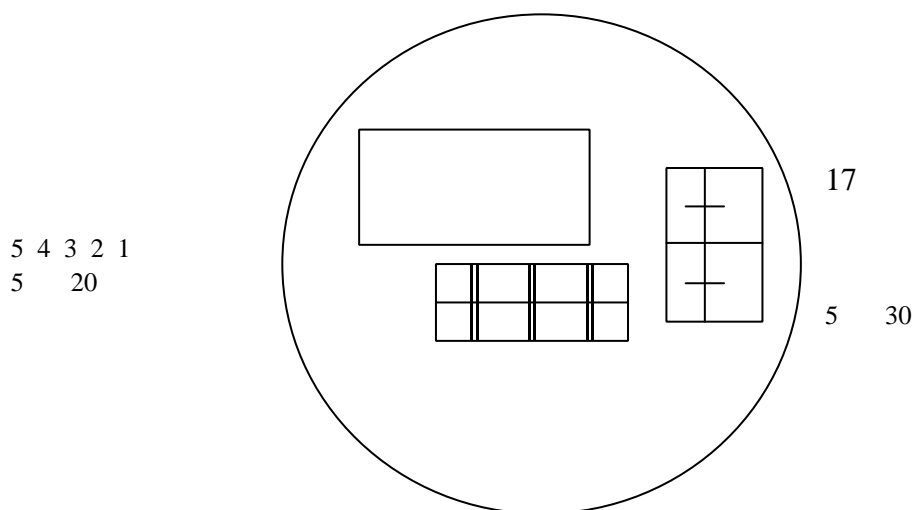


Рисунок 5.2 Пример отсчета угла теодолита:  $17^{\circ} 35' 25''$

## 6 порядок выполнения работы



5.1. Перед началом работы необходимо внимательно ознакомиться с описанием установки и правилами работы с ней. После ответа на контрольные вопросы и получения допуска, получите у преподавателя образец волновода, подлежащего исследованию. Для возбуждения света ( $\lambda=633$  нм) используются призмы ввода из ниобата лития с показателем преломления  $n_3=2,286$  или из фосфида галлия с  $n_3=3,306$ .

5.2. Измерение эффективности ввода света.

Регистрация ввода света в волновод осуществляется с помощью фотодиода. Фотодиод может размещаться у выходного торца волновода либо вблизи выводной призмы. При однопризменной схеме эксперимента возможно измерение углов ввода по моментам уменьшения интенсивности светового пучка, отраженного от основания призмы и выходящего из нее. В этом случае эффективность ввода излучения рассчитывается по формуле:

$$I_{\max} - I_{\min} \cdot 100\%$$

где  $I_{\max}$  – ток фотодиода при отстройке от условия возбуждения моды;  $I_{\min}$  – его ток при возбуждении моды. Значения тока заносятся в таблицу № 5.1.

Таблица 5.1

№ моды	Угол $\phi_m$	$I_{\max}$ , мкА	$I_{\min}$ , мкА	$\eta$ , %	$N_m$
--------	------------------	------------------	------------------	------------	-------

Измерив токи  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ , можно определить эффективность ввода мод  $\eta$ .

## 7 Контрольные вопросы

- 6.1. Какая структура может играть роль планарного оптического волновода?
- 6.2. Каков характер электромагнитного поля в планарном волноводе при существовании в нем направляемой моды?
- 6.3. Каковы соотношения между показателями преломления отдельных сред в планарном оптическом волноводе?
- 6.4. Поясните, какие составляющие векторов электромагнитного поля характерны для ТЕ мод, а какие – для ТМ мод.
- 6.5. Что понимается под дисперсионным уравнением планарного оптического волновода?
- 6.6. Что понимается под эффективностью ввода?
- 6.7. Как можно измерить эффективность ввода?

6.8. От чего зависит эффективный показатель преломления и как его определить?

## 8 Список литературы

1. Г.С. Свечников . Элементы интегральной оптики . М. , “ Радио и связь “ , 1987.
2. А. С. Семенов и др. Интегральная оптика для систем передачи и обработки. М., “ Радио и связь “ , 1990.
3. Б.С. Голубков и др. Интегральная оптика в интерференционной технике. М., “ Энергоатомиздат “ , 1985.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО**  
**ДАТЧИКАМИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО**  
**ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

**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 Элементы теории**

Амплитудные волоконно-оптические датчики (ВОД) представляют собой волоконно-оптические устройства, в которых внешнее воздействие приводит к непосредственному изменению интенсивности света в приемном волоконном световоде [1 - 4]. 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  $V(x)$ :

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

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:

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

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:

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

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 рис. 2.1, на котором схематично изображена рабочая характеристика измерительного устройства.

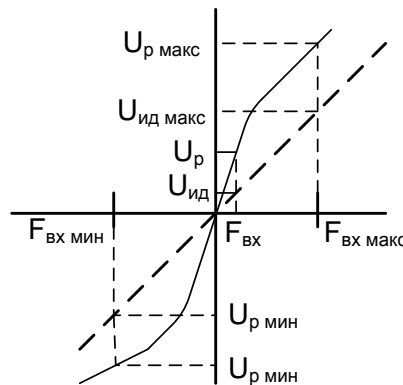
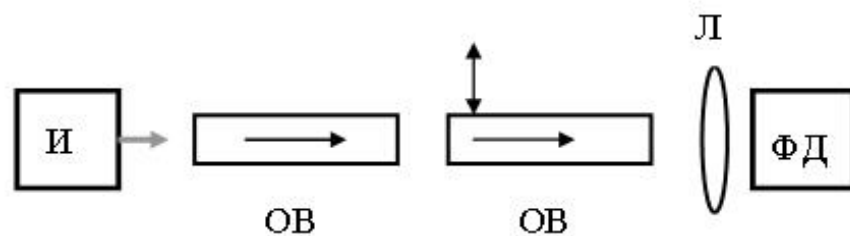


Рисунок 2.1 Идеальная и реальная характеристики измерительного устройства

### 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 рис. 1. Здесь излучение He-Ne лазера (И) вводится в приемный волоконный световод (ОВ) с помощью промежуточного передающего световода (ОВ) или непосредственно путем фокусировки света на входной его торец. Излучение с выходного торца приемного световода поступает на фотоприемный элемент (ФД). При необходимости, выходное излучение собирается на фотоприемном элементе с помощью фокусирующей линзы (Л). Величина фототока, генерируемого фотоприемным элементом, прямо пропорциональна величине световой мощности, воспринимаемой фотоприемником.



И – источник излучения; ОВ – оптическое волокно; Л – фокусирующая линза; ФД – фотодиод.

Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки

Реальная экспериментальная установка включает полимерный волоконный световод с диаметром сердцевины 0,9 мм, возбуждаемый фокусированным или нефокусированным излучением He – Ne лазера ЛГН – 207-А (выходная мощность 1 мВт, длина волны излучения 633 нм). 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 (на схеме этот фотодиод не показан).

#### 4 Порядок выполнения работы

4.1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее отдельными элементами.

4.2. Получить от преподавателя конкретное задание на работу (разные варианты включают фокусировку светового пучка на входной торец световода линзами с разными фокусными расстояниями либо использование нефокусированного лазерного луча для возбуждения света в волоконном световоде).

4.3. Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

4.4. После допуска к работе провести экспериментальное исследование зависимости оптической мощности на выходе световода от величины поперечного смещения его входного торца относительно светового пучка. В процессе измерений контролировать мощность излучения лазера с помощью вспомогательного фотодиода. Результаты измерений занести в таблицу:

Смещение, мкм				
$I_{\text{вых}}$				
$I_{\text{лаз}}$				
$(I_{\text{вых}}/ I_{\text{лаз}})/$ $(I_{\text{вых макс}}/ I_{\text{лаз}}$ ср)				

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

4.6. Повторить измерения п. 4.4 три раза, провести усреднение результатов измерений.

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

4.8. В предположении гауссовых распределения поля светового пучка и модового поля на торце световода построить расчетную зависимость оптического пропускания системы от поперечного смещения. Сравнить результаты моделирования с экспериментальными результатами.

4.9. Оформить отчет по работе.

## **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;
- выводы по работе.

## **6 Контрольные вопросы**

- 6.1. Каковы основные достоинства волоконно-оптических датчиков?
- 6.2. Что понимается под ВОД с амплитудной модуляцией?
- 6.3. Какие физические воздействия могут измеряться с помощью ВОД амплитудного типа?
- 6.4. Для чего в ВОД амплитудного типа контролируется мощность источника излучения?
- 6.5. Как определяется нелинейность характеристики ВОД?
- 6.6. Поясните суть понятия «интеграл перекрытия»?

## **7 Список литературы**

1. В.И.Бусурин, Ю.Р.Носов. Волоконно - оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990 г.

2. Т.Окоси и др. Волоконно - оптические датчики / Под ред. Т.Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990 г.
3. Ю.Н.Кульчин. Распределенные волоконно – оптические измерительные системы. – М.: Физматлит, 2001 г., 272 с.
4. В.М.Шандаров. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 190с.



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА, ПОСТРОЕННОГО ПО СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДА**

### **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.

### **2 Элементы теории**

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 Описание экспериментальной установки**

Схема экспериментальной установки для исследования принципа измерения перемещения объекта с помощью ВОД, построенных по схеме оптического зонда, представлена на рис. 1. Экспериментальная установка включает He–Ne лазер ЛГН – 207-А (или ЛГН-208), 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.

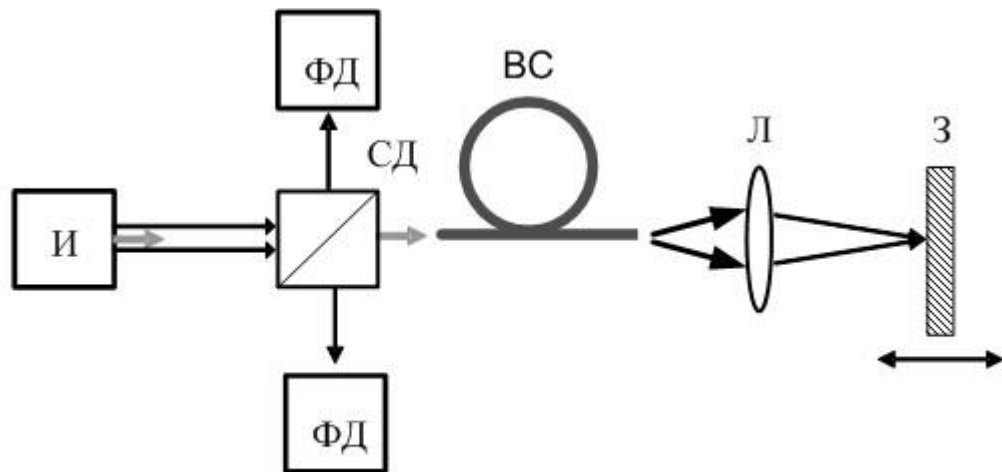


Рисунок 3.1 И – источник излучения (He-Ne лазер); СД – светоделительный кубик; ВС – волоконный световод; Л – фокусирующая линза; З – зеркало; ФД – фотодиод

#### 4 Порядок выполнения работы

- 4.1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее отдельными элементами.
- 4.2. Получить от преподавателя конкретное задание на работу (разные варианты включают линзы с разными фокусными расстояниями).
- 4.3. Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

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 1

Смещение, мкм				
$I_{\text{вых фд}}$				
$I_{\text{вых лаз}}$				
$I_{\text{вых фд}} / I_{\text{вых лаз}}$				

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

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

4.7. Повторить измерения п. 4.4 три раза, провести усреднение результатов измерений.

4.8. Оформить отчет по работе.

## 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.

## 6 Контрольные вопросы

- 6.1. Каковы основные достоинства волоконно-оптических датчиков?
- 6.2. Что понимается под ВОД с амплитудной модуляцией?
- 6.3. В чем отличие ВОД зондового типа от ВОД с оптическим преобразователем?
- 6.4. Для чего в ВОД амплитудного типа контролируется мощность источника излучения?
- 6.5. Как определяется нелинейность характеристики ВОД?
- 6.6. Какой из элементов в рассматриваемой схеме в наибольшей степени влияет на динамический диапазон устройства?

## 7 Список литературы

1. В.И.Бусурин, Ю.Р.Носов. Волоконно - оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990 г.
2. Т.Окоси и др. Волоконно - оптические датчики / Под ред. Т.Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990 г.
3. Ю.Н.Кульчин. Распределенные волоконно – оптические измерительные системы. – М.: Физматлит, 2001 г., 272 с.
4. В.М.Шандаров. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учеб. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 190с. ISBN 978-5-86889-377-3.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ

#### 1 Введение

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

#### 2 Элементы теории

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:

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

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:

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

$$\text{где } \alpha = \arctg(E_{2m} / E_{1m}).$$

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

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

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

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

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,  $\text{CaCO}_3$ ) 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.

### 3 Закон МАЛЮСА

Он определяет интенсивность линейно поляризованной световой волны, прошедшей через поляризатор.

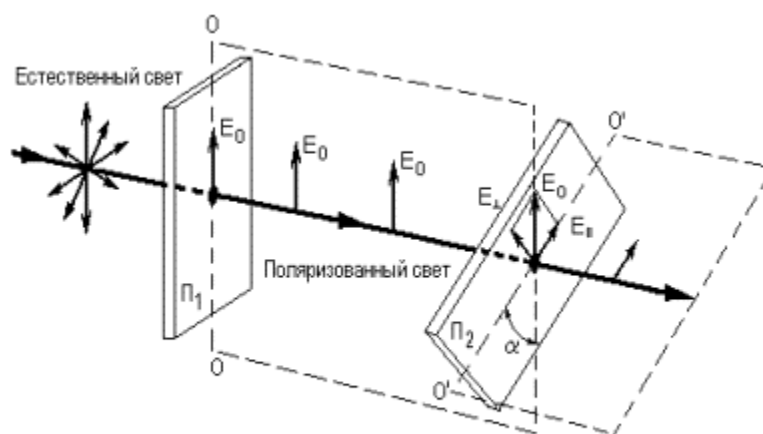


Рис. 7

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

Здесь  $\alpha$  - угол между направлением вектора  $\mathbf{E}$  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 (пленочные поляризаторы зачастую не обеспечивают значительного подавления интенсивности даже идеально линейно поляризованной световой волны при ортогональности ее плоскости поляризации и главного направления поляризатора).

#### 4 Описание экспериментальных установок

Схемы экспериментальных установок для исследования состояния поляризации излучения лазера и качества поляризационного элемента, а также состояния поляризации излучения, прошедшего через ВС, представлены на рис. 1 а, б.

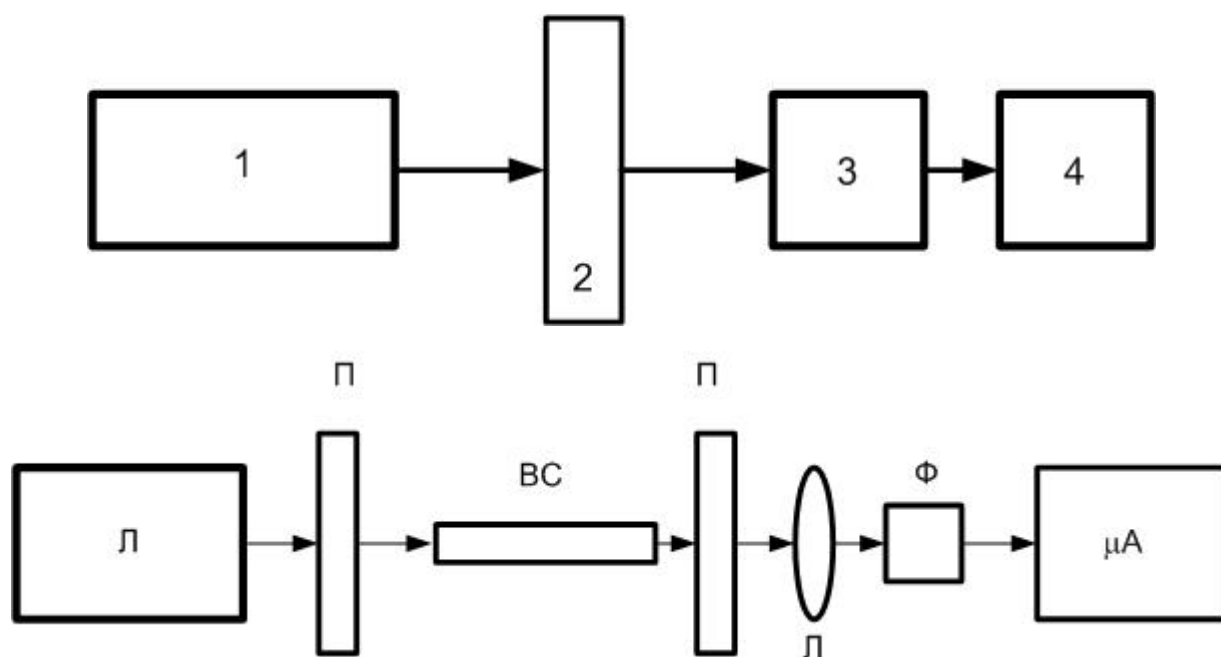


Рисунок 4.1 а) Схема экспериментальной установки для исследования состояния поляризации излучения лазера и качества поляризационного элемента: 1 – источник излучения; 2 – поляризатор; 3 – фотодиод; 4 – измеритель фототока.

б) Л – лазер; П – поляризатор; ВС – волоконный световод; Л – фокусирующая линза; Ф – фотодиод; А - 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 деполяризация этого излучения вследствие эффекта преобразования направляемых мод световода.



## 5 Порядок выполнения работы

4.1. Реальные экспериментальные установки включают He – Ne лазеры ЛГН – 207-А (выходная мощность 1 мВт, длина волны излучения 633 нм, излучение имеет линейную поляризацию) и образцы полимерных ВС длиной 10 см и 50 см. 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).

4.2. Ознакомиться с экспериментальными установками и ее отдельными элементами.

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.

4.4. Ответить на контрольные вопросы преподавателя.

4.5. Получить допуск к выполнению работы.

4.6. Используя экспериментальную установку 1 а, снять зависимость величины фототока от положения поляризационного элемента для проверки соответствия ее закону Малюса. Угловое положение поляризатора изменять с дискретом в  $10^\circ$  в диапазоне до  $180^\circ$ . Результаты измерений занести в таблицу.

4.7. Для полимерного ВС длиной 10 см на экспериментальной установке 2 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  $10^\circ$  в диапазоне до  $180^\circ$ . Результаты измерений занести в таблицу.

4.8. Для полимерного ВС длиной 50 см на экспериментальной установке 2 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  $10^\circ$  в диапазоне до  $180^\circ$ . Результаты измерений занести в таблицу

Таблица 1

Угол, °				
$I_{\text{ВЫХ}}$				
$(I_{\text{ВЫХ}})/$ $(I_{\text{ВЫХ макс}})$				

4.9. Построить графики полученных зависимостей.

4.10. Оформить отчет по работе.

### 6 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);
- выводы по работе.

### 7 Контрольные вопросы

- 6.1. Каковы основные достоинства волоконно-оптических элементов?
- 6.2. Что подразумевается под поляризованной волной?
- 6.3. Поясните суть понятия «линейно поляризованная световая волна»?
- 6.4. Поясните суть понятия «световая волна с круговой поляризацией»?
- 6.5. Запишите выражение, определяющее закон Малюса.
- 6.6. Какие физические эффекты приводят к изменению состояния поляризации света в ВС?

### 8 Рекомендуемая литература

1. Н.И. Калитеевский. Волновая оптика. - СПб.: Лань, 2006. - 465 с. (30)
2. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное пособие- Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>
3. В.М. Шандаров. Волоконно-оптические устройства технологического назначения. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, [Электронный ресурс]: учебное

пособие – Томск: ТУСУР, 2012. – 198 с. Режим доступа <http://edu.tusur.ru/training/publications/741>

### Список литературы

1. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: Учебное пособие / Шандаров В. М. - 2013. 198 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3709> (дата обращения: 15.06.2018).
2. Игнатов, А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Н. Игнатов. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 596 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/95150> (дата обращения: 15.06.2018).
3. Волоконно-оптические устройства и приборы: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе / Шандаров В. М. - 2018. 40 с. [Электронный ресурс] -Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7347> (дата обращения: 15.06.2018).
4. Исследование оптического датчика линейного перемещения объекта, построенного по схеме оптического зонда: Методические указания к лабораторной работе / Шандаров В. М., Карпушин П. А. - 2011. 6 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/61> (дата обращения: 15.06.2018).
5. 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") / Шандаров В. М. -2013. 8 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3705> (дата обращения: 15.06.2018).
6. 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") / Шандаров В. М. - 2013. 9 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3708> (дата обращения: 15.06.2018).
7. Исследование эффективности ввода света в планарный оптический волновод: Методические указания к лабораторной работе для бакалавров направления 210700.62 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (профиль - "Оптические системы и сети связи") / Шандаров В. М., Куц Г. Г. - 2013. 11 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3703> (дата обращения: 15.06.2018).
8. Исследование волоконно-оптического датчика микроперемещений на основе полимерного оптического волокна: Методические указания к лабораторной работе / Шандаров В. М., Карпушин П. А. - 2011. 7 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/118> (дата обращения: 15.06.2018).

В.М. Шандаров, В.Г. Круглов, В.Ю. Рябченко

# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие по лабораторным работам  
для студентов направления 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи»

Формат ---.

Усл. печ. л. ---. Тираж -- . Заказ -- .

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.