

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

Основы физической оптики

**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")

2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧиКР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав.каф.СВЧ и КР

_____С.Н.Шарангович

Основы физической оптики

**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")

Разработчики:

доц.каф.СВЧиКР

_____Г.Г. Куц

проф. каф. СВЧиКР

_____В.М. Шандаров

2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ	4
3. УСТРОЙСТВО ВВОДА – ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ	7
4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	8
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	9
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	10
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	10

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Ознакомление студентов с планарными оптическими волноводами, основами теории таких волноводов, с понятием эффективности возбуждения света в планарном волноводе.

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. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ 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 ω 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 \bar{E} – напряженность электрического поля световой волны; $k_0=2\pi/\lambda_0$ – волновое число; λ_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:

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

где $\beta=\omega/v_\phi$ – постоянная распространения; ω , v_ϕ – 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:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \cdot E_y = 0 \quad (2.3),$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \cdot H_y = 0 \quad (2.4).$$

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 β . 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 удовлетворение граничных 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 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 2π . Исходя из этого, можно записать:

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

где $m=0,1,2,\dots$; φ_{01} и φ_{02} – фазовые сдвиги при полном внутреннем отражении светового луча от границ; θ_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:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{01,0S}}{2}\right)_{\text{TE}} = -\frac{\sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta - n_{1,S}^2}}{n_0 \cos \theta} \quad (2.8),$$

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

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

3.1. Призмные элементы связи.

Призмный 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%.

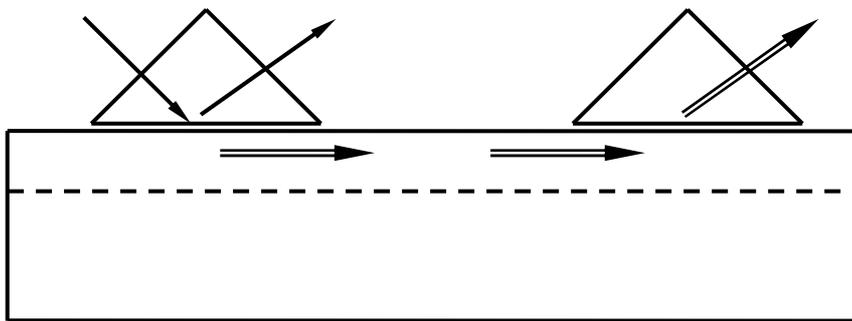


Рисунок 3.1 Схема ввода – вывода света и расположение призм.

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

4.1. Конструкция макета и описание экспериментальной установки.

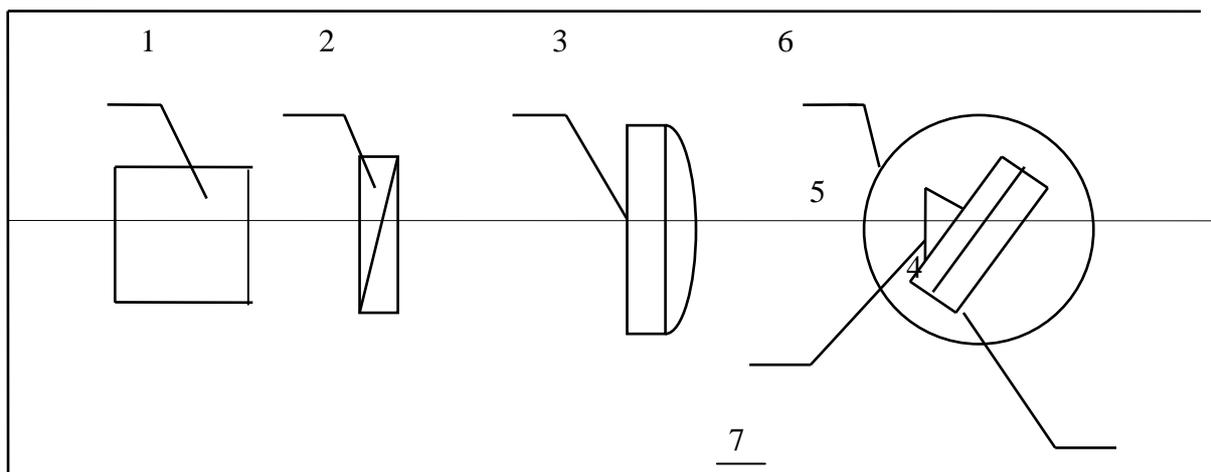


Рисунок 4.1. Схема экспериментальной установки.

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 - $17^{\circ} 35' 25''$.

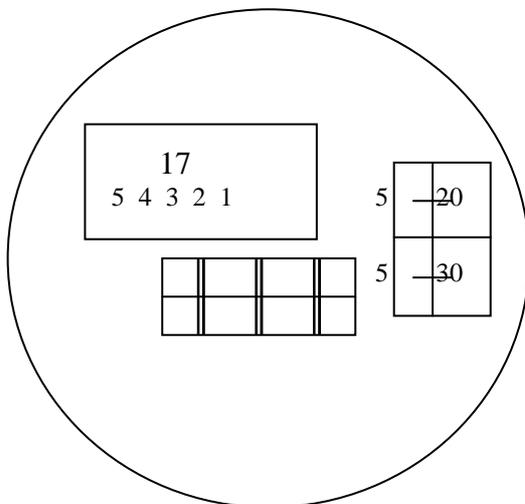


Рисунок 4.2. Пример отсчета угла теодолита: $17^{\circ} 35' 25''$.

5. 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:

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100\%$$

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 φ_m	I_{\max} , мкА	I_{\min} , мкА	η , %	N_m
--------	------------------	------------------	------------------	------------	-------

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

6. 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?

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.