

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

**УСТРОЙСТВО ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНЫЙ
ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД**

Методические указания к лабораторной работе

Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и
обработки информации»

Томск 2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю

Зав. каф. СВЧ и КР

_____ С.Н. Шарангович

**УСТРОЙСТВО ВВОДА-ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНЫЙ
ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД**

Методические указания к лабораторной работе

Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и
обработки информации»

Разработчики:

проф. каф. СВЧ и КР

_____ А.Е. Мандель

доц. каф. СВЧ и КР

_____ А.С. Перин

Томск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	3
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ	3
2.1. Диэлектрические волноводы. Моды диэлектрического волновода .	4
2.2. Пленочный и градиентный планарные волноводы.....	5
2.3. Дисперсионные характеристики планарных волноводов. Опре- деление профиля показателя преломления по эффективным показателям преломления направляемых мод	9
3. УСТРОЙСТВО ВВОДА – ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ	11
3.1. Призмные элементы связи	12
4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	13
4.1.Конструкция макета и описание экспериментальной установки.....	13
4.2. Содержание работы.....	14
5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	15
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	18
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	18

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Ознакомление студентов с планарными оптическими волноводами, их модовым составом, с элементами возбуждения планарных волноводов, с понятием эффективных показателей преломления и эффективностью возбуждения волноводов.

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 разнообразных оптических волноводных элементов, интегрированных на общей подложке, и управляемых электрическими и оптическими сигналами, возможно создание модуляторов, коммутаторов, аналого – цифровых и цифро – аналоговых преобразователей, логических устройств, процессоров, приемных и передающих модулей, которые по удельному энергопотреблению и быстродействию могут конкурировать с микроэлектронными аналогами.

Наиболее перспективно применение интегрально – оптических схем и устройств в волоконно – оптических линиях связи и системах оптической обработки информации. Хотя не все вопросы согласования и стыковки интегрально – оптических элементов с волоконными световодами и источниками излучения обработаны в полной мере, переход к оптическим и оптоэлектронным интегральным схемам обещает значительный выигрыш по энергопотреблению, в габаритных размерах, и в надежности систем в целом.

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

В основе работы волноводно – оптических элементов лежит явление полного внутреннего отражения света. Математической основой для описания волноводно – оптических эффектов являются уравнения Максвелла.

2.1. Диэлектрические волноводы. Моды диэлектрического волновода.

Базовый элемент интегральной оптики – планарный оптический волновод – представляет собой тонкий диэлектрический слой на диэлектрической подложке с более низким показателем преломления. Световая волна в таком слое может распространяться за счет полного внутреннего отражения от границ раздела “слой – подложка” и “слой – покровная среда” (рис. 2.1). Толщина световодных слоев сравнима с длиной волны света и составляет, как правило, $0.3 \div 3$ мкм.

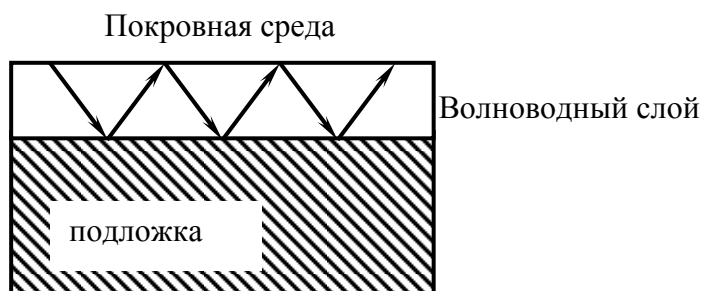


Рисунок 2.1. Планарный оптический волновод.

К материалам, пригодным для создания волноводных структур, относятся различные стекла (в том числе халькогенидные, применяемые для средне- и длинноволнового ИК - диапазонов), различные полимеры, ферромагнитные и электрооптические кристаллы, активные диэлектрики, полупроводники.

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 несущего слоя волновода. 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 координат, 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.

Направляемые моды планарных диэлектрических волноводов делят на поперечно – электрические (ТЕ) и поперечно – магнитные (ТМ) волны. Используя уравнения Максвелла, легко показать, что для изотропного оптического волновода, либо для волноводов на основе одноосных кристаллов, при распространении света вдоль главных осей, направляемые моды волновода имеют чисто поперечно – электрическую и поперечно – магнитную структуру. Действительно, используя уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot}\bar{\mathbf{H}} = \frac{\partial\bar{\mathbf{D}}}{\partial t} \quad \text{и} \quad \operatorname{rot}\bar{\mathbf{E}} = -\frac{\partial\bar{\mathbf{B}}}{\partial t},$$

с учетом соотношений $\bar{\mathbf{D}} = \epsilon \cdot \bar{\mathbf{E}}$ и $\bar{\mathbf{B}} = \mu \cdot \bar{\mathbf{H}}$, а также условия $\partial/\partial y = 0$, вытекающего из геометрии волноводной структуры, получим следующие выражения:

$$\beta E_y = -\omega \mu H_x \quad (2.3.a) \quad \beta H_y = \omega \epsilon E_x \quad (2.3.d)$$

$$\partial E_y / \partial x = -i \omega \mu H_z \quad (2.3.b) \quad \partial H_y / \partial x = i \omega \epsilon E_z \quad (2.3.e)$$

$$\partial H_z / \partial x = -i \beta H_x - i \omega \epsilon E_y \quad (2.3.c) \quad \partial E_z / \partial x + i \beta E_x = i \omega \mu H_y \quad (2.3.f).$$

Соотношения (2.3.a, b, c) связывают компоненты электромагнитного поля E_y , H_x и H_z и описывают ТЕ – моды, а (2.3.d, e, f) связывают компоненты H_y , E_x , E_z и описывают ТМ – моды. Отсюда, подставляя (2.3.a) и (2.3.b) в (2.3.c), а (2.3.d) и (2.3.e) в (2.3.f), можно получить волновые уравнения для ТЕ и ТМ – волн. Они имеют следующий вид:

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

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \cdot H_y = 0 \quad (2.5).$$

2.2. Пленочный и градиентный планарные волноводы.

Планарные оптические волноводы (ОВ) по виду распределения показателя преломления по поперечному сечению, делят на однородные (или пленочные) ОВ с близким к ступенчатому закону изменения показателя преломления по толщине, и неоднородные (градиентные) ОВ с плавным изменением показателя преломления (рис. 2.2). В пленочных волноводах образование направляемой моды можно рассматривать как результат распространения плоской однородной световой волны в пленке

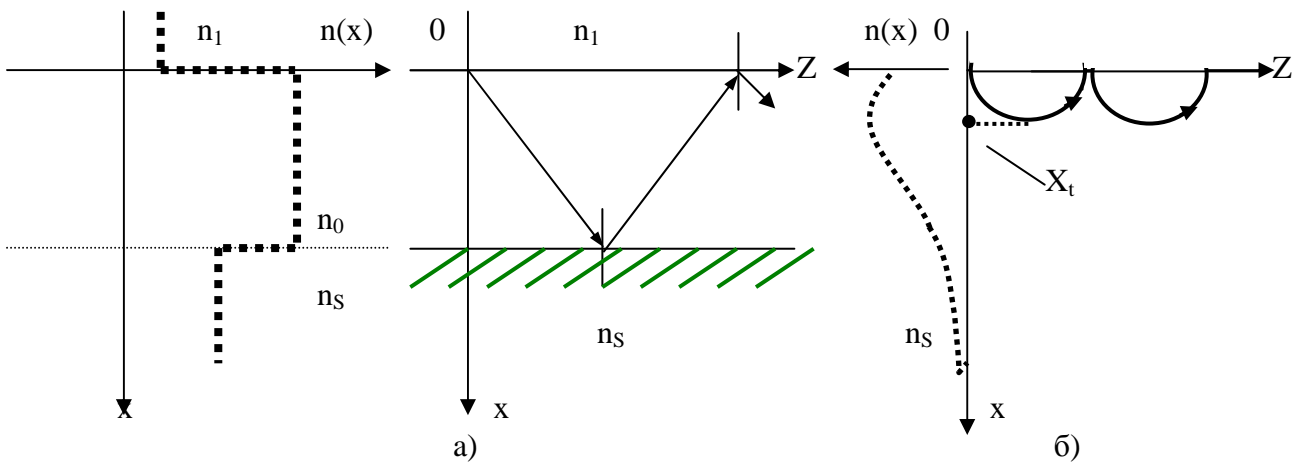


Рисунок 2.2. Профили показателей преломления (слева) и лучевая модель распространения световых волн (справа) в однородном (а) и градиентом (б) планарных волноводах.

по зигзагообразному пути. В градиентном волноводе направление распространения волны изменяется вследствие изменения показателя преломления материала. В результате световой луч в волноводной области распространяется путем рефракции, по криволинейным траекториям.

В градиентном волноводе нет явно выраженной границы раздела подложки и волноводного слоя. Показатель преломления в волноводной области изменяется по закону: $n_0(x) = n_s + \Delta n \cdot f(x)$ при $x > 0$, и $n_0(x) = n_1$ при $x < 0$, где x - координата, вдоль которой изменяется показатель преломления; $\Delta n = n_0(0) - n_s$, $f(x)$ - функция профиля показателя преломления.

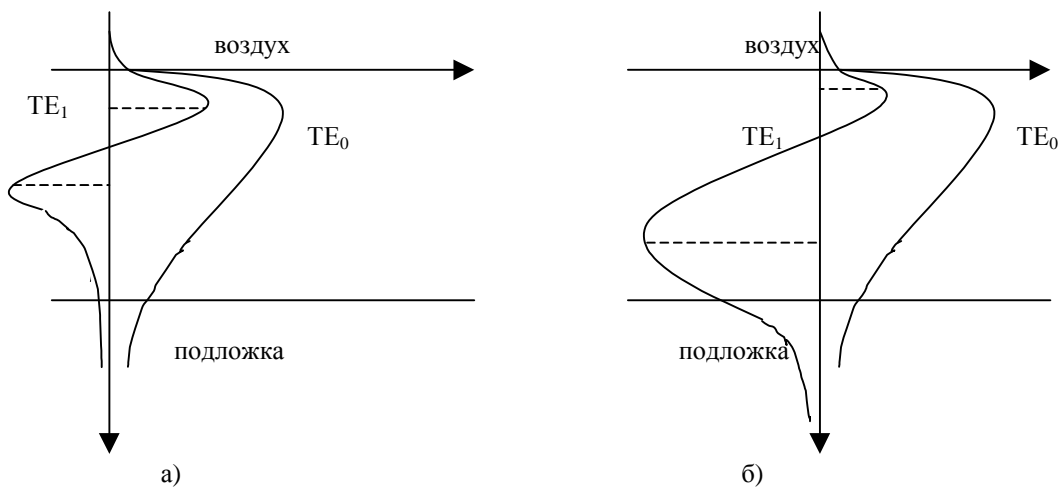


Рисунок 2.3.

Отметим, что n_1 - показатель преломления прилегающей к волноводу среды (воздух); n_0 - показатель преломления волноводного слоя; n_s - показатель преломления подложки. Закон изменения профиля $f(x)$ зависит, как правило, от технологического процесса и условий создания волновода.

Распределение электрического поля в области $0 < x < X_t$, где X_t – точка поворота, представляет собой осциллирующую функцию. За пределами этой области поле моды экспоненциально затухает. Под точкой поворота понимается координата, в которой касательная к траектории светового луча, распространяющегося в градиентном волноводе путем рефракции, становится параллельной поверхности волновода.

На рис.2.3 изображены распределения полей мод TE_0 и TE_1 ступенчатого (а) и градиентного (б) волноводов.

Рассмотрим ступенчатые волноводы, у которых для реализации волноводного режима необходимо выполнение условия:

$$n_0 > n_1, n_s \quad (2.6).$$

При этом в волноводе возможно существование направляемых мод. При описании характеристик диэлектрических волноводов пользуются понятием эффективного показателя преломления направляемой моды N_m :

$$N_m = \beta/k_0 = n_0 \cdot \sin\theta_m \quad (2.7),$$

который определяет фазовую скорость волноводной моды. Величина N_m отвечает условию: $n_0 > N_m > n_s$.

Как было отмечено выше, распространение световых волн в планарном оптическом волноводе (ОВ) описывается уравнениями Максвелла с соответствующими граничными условиями.

Подставляя (2.2) в (2.1) и принимая $\partial/\partial y = 0$ (т.к. световое поле не ограничено в направлении Y), для областей I, II, III получаем:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + [k_0^2 n_i^2 - \beta^2] \cdot E_y = 0 \quad (2.8),$$

где $i = 0, 1, S$.

При заданной частоте световой волны вид решения уравнения (2.8) зависит от величины β . При выполнении неравенств:

$$k_0 n_s < \beta < k_0 n_0$$

решение уравнения (2.8) в области II представляет собой гармоническую функцию (рис. 2.4). В областях I и III поле затухает экспоненциально.

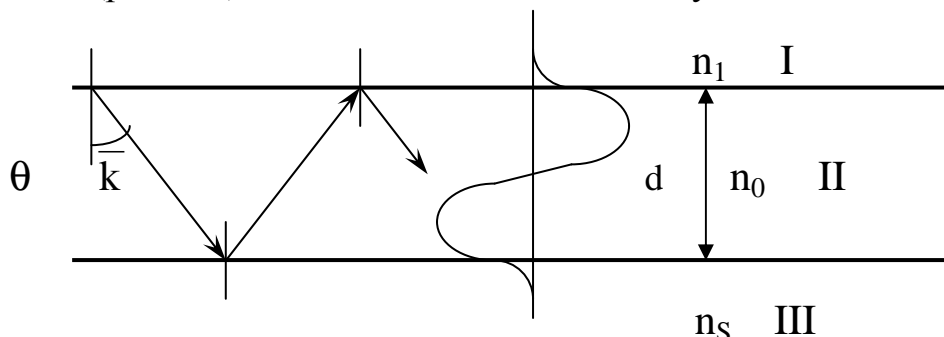


Рисунок 2.4.

Энергия, переносимая направляемыми модами, локализована в области волноводного слоя. Необходимым условием существования волноводных мод является выполнение неравенства (2.6) или:

$$\{k_0 n_1 \text{ и } k_0 n_s\} < \beta < k_0 n_0 \quad (2.9).$$

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 волновода d . Дисперсионное 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. 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, с позиций геометрической оптики необходимо, чтобы фазовый набег при двукратном прохождении луча внутри пленки был кратен величине 2π . Исходя из этого, можно записать следующее соотношение:

$$k_0 n_0 d \cdot \cos \theta_m + \varphi_{01} + k_0 n_0 d \cdot \cos \theta_m + \varphi_{02} = 2\pi m \quad (2.10),$$

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 светового 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 горизонтальной и вертикальной поляризации, что соответствует ТЕ и ТМ волнам, имеют вид:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{01,0S}}{2}\right)_{\text{TE}} = -\frac{\sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta - n_{1,S}^2}}{n_0 \cos \theta} \quad (2.11),$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_{01,0S}}{2}\right)_{\text{TM}} = -\frac{\left(\frac{n_0}{n_{1,S}}\right)^2 \sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta - n_{1,S}^2}}{n_0 \cos \theta} \quad (2.12).$$

Тогда уравнение (2.10) можно записать в форме:

$$k_0 n_0 d \cos \theta + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_0^2 \sin^2(\theta) - n_1^2}{n_0^2 \cos^2(\theta)}} + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_0^2 \sin^2(\theta) - n_s^2}{n_0^2 \cos^2(\theta)}} = \pi m \quad (2.13).$$

Учитывая, что $n_0 \sin \theta = N_m$ и $n_0 \cos \theta = \sqrt{n_0^2 - n_0^2 \cdot \sin^2 \theta} = \sqrt{n_0^2 - N_m^2}$, (2.13) можно представить в виде:

$$k_0 d \sqrt{n_0^2 - N_m^2} = \arctg \sqrt{\frac{N_m^2 - n_1^2}{n_0^2 - N_m^2}} + \arctg \sqrt{\frac{N_m^2 - n_S^2}{n_0^2 - N_m^2}} = \pi m \quad (2.14).$$

Аналогичным образом, используя геометро – оптический подход, можно получить дисперсионное уравнение для градиентного планарного волновода. Особенность в этом случае заключается в том, что поперечная составляющая волнового вектора изменяется в зависимости от координаты внутри волноводной области. Выражая ее через само волновое число и его продольную составляющую, которая сохраняет свою величину, согласно закону Снеллиуса, в приближении Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна можно записать дисперсионное уравнение градиентного волновода в виде:

$$\int_0^{X_m} [k_0^2 n^2(x) - k_0^2 N_m^2]^{1/2} dx = m\pi + \frac{3}{4}\pi \quad (2.15),$$

где X_m – координата точки поворота моды порядка m ; $n(x) = n_S + \Delta n \cdot f(x)$; N_m – эффективный показатель преломления этой моды ($N_m = n(0) \cdot \sin(\theta_m)$).

Данное дисперсионное уравнение может быть решено аналитически лишь для нескольких частных видов функции профиля показателя преломления градиентных волноводов. Так, для экспоненциального профиля вида $\Delta n(x) = n(x) - n_S = A \cdot \exp(-x/b)$, где b – толщина волноводного слоя, можно получить аналитическое выражение для числа направляемых мод M , поддерживаемых подобным планарным волноводом. Оно имеет вид неравенства:

$$M \leq \frac{1}{4} + \left(\frac{4b}{\lambda_0} \right) \cdot [2n_S \cdot A]^{1/2} \quad (2.16),$$

где $A = n(0) - n_S$ – величина приращения показателя преломления на поверхности волновода.

2.3. Дисперсионные характеристики планарных волноводов.

Определение профиля показателя преломления по эффективным показателям преломления направляемых мод.

Результаты решения дисперсионных уравнений планарных волноводов дают семейства дисперсионных кривых в виде зависимостей эффективных показателей преломления направляемых мод N_m от параметров волноводных структур. В большинстве случаев дисперсионные уравнения решаются численно, и лишь для нескольких видов функций профиля показателя преломления градиентных волноводов возможно аналитическое решение уравнения (2.15). На рис. 2.5 и 2.6 представлены семейства дисперсионных кривых для планарных волноводов пленочного и градиентного типа, иллюстрирующие возможность качественной оценки вида функции профиля по измеренным значениям N_m . В случае градиентного волновода $f(x) = \exp(-x)$, для пленочного волновода она моделируется почти ступенчатой функцией

$f(x)=(1+x^{32})^{-1}$ (чем выше показатель степени при x , тем лучше данная зависимость моделирует ступенчатую функцию).

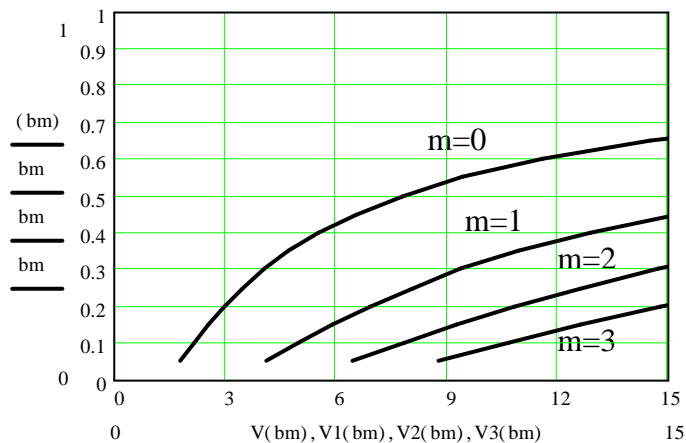


Рисунок 2.5. Дисперсионные характеристики градиентного планарного волновода с экспоненциальным профилем (ТЕ моды).

Использование подобных семейств дисперсионных кривых позволяет оценить примерный вид профиля волновода по зависимости от номера моды m величины $(b_m - b_{m+1})$. В случае градиентных волноводов с плавным профилем показателя преломления эта величина с ростом m уменьшается. В случае формы профиля, близкой к ступенчатой, она возрастает с ростом m . Пограничным является волновод с квадратичным профилем, для которого спектр b_m является эквидистантным. Данные дисперсионные кривые являются нормированными. Величина b_m называется нормированным показателем преломления волноводной моды, $b_m = (N_m^2 - n_s^2) / (2n_s \Delta n)$. Параметр $V = k_0 d \cdot (2n_s \Delta n)^{1/2}$ называют нормированной толщиной волновода. Для слабых волноводов, у которых $\Delta n \ll 1$, выполняется соотношение $b_m \approx (N_m - n_s) / \Delta n$. Соответственно, оценка вида профиля показателя преломления таких волноводов может проводиться по зависимости от номера моды величины $(N_m - N_{m+1})$.

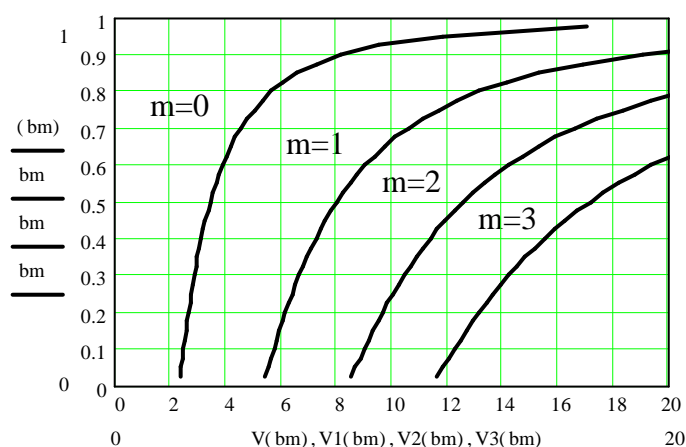


Рисунок 2.6. Дисперсионные характеристики планарного волновода с близким к ступенчатому профилем показателя преломления (ТЕ моды).

3. УСТРОЙСТВО ВВОДА – ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Для построения интегрально – оптических элементов необходимо обеспечить возможность эффективного ввода и вывода излучения в волноводных системах в любых выбранных областях. Для решения этой задачи созданы различные элементы 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.

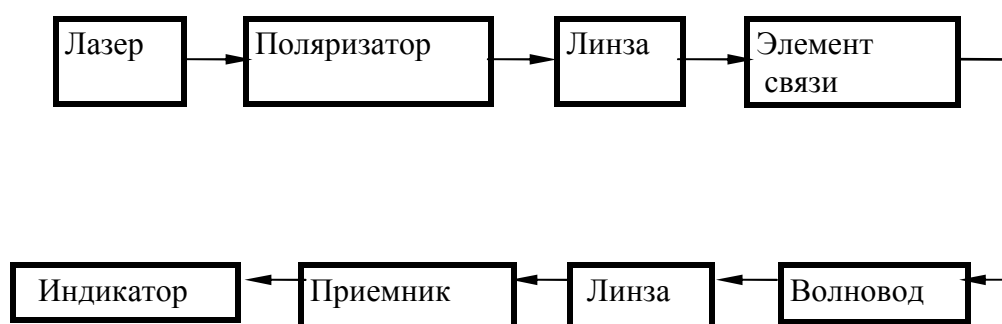


Рисунок 3.1.

В качестве источников излучения в интегральной оптике наиболее часто используются лазеры, излучающие в узком интервале длин волн. На рис.3.1 представлена структурная схема устройства для исследования эффективности возбуждения оптических волноводов.

3.1. Призменные элементы связи.

Призменный элемент ввода – вывода излучения использует эффект туннелирования света через тонкий воздушный зазор, отделяющий призму от поверхности волновода. Физику работы такого элемента можно кратко описать следующим образом. Материал призмы имеет более высокий показатель преломления, чем материал волновода. Соответственно, при работе призмы в качестве элемента вывода 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, имеющая подходящее распределение амплитуды и фазы, то она, туннелируясь через тот же зазор, может возбуждать в волноводе направляемую моду. Это соответствует работе призмы в качестве элемента ввода. Чтобы возбужденная в волноводе направляемая волна не

переизлучалась в призму, необходимо ограничить длину области связи. На рис. 3.2 схематично изображено волноводное устройство с призмными элементами ввода и вывода света. Эффективность подобных устройств зависит от значений показателей преломления призмы, пленки и окружающих ее сред, от геометрии призмы, от размера и формы воздушного зазора, разделяющего поверхности призмы и волновода. При оптимальных условиях эффективность призмных элементов ввода с однородным зазором может достигать 80%, а в случае неоднородного зазора возможна эффективность ввода до 100%.

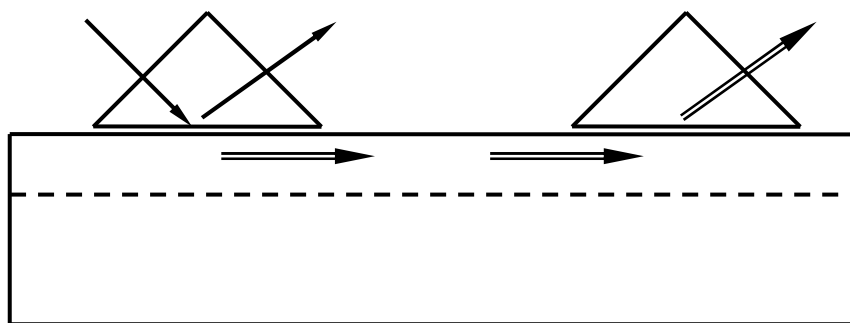


Рисунок 3.2 Схема ввода – вывода лучей и расположение призм.

4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

4.1. Конструкция макета и описание экспериментальной установки.

Установка включает He – Ne лазер (1) ($\lambda=0,63$ мкм), поляризатор (2), линзу (3) и оптический волновод, размещенный на вращающемся столике теодолита 2Т2А. Волновод вместе с призмой устанавливается на теодолит таким образом, 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. При изменении положения или смене линзы необходимо обеспечить прохождение излучения лазера через ее центр. Этим минимизируются фазовые искажения светового луча.

Для ввода излучения в волновод используется призмный элемент (5). Для фиксирования угла ввода, соответствующего возбуждению в волноводе направляемой моды, служит фотодиод, с помощью которого измеряется интенсивность светового луча, отраженного от основания призмы. Сигнал с фотодиода подается на микроамперметр. Фотодиод

закрепляется в кожухе, с диафрагмой на его входном торце, позволяющей понизить интенсивность фоновой засветки фотодиода. Волновод (4) с призмами ввода размещен на вращающемся столике (6) теодолита 2Т2А, позволяющего измерить угловое положение волновода относительно светового луча с точностью менее одной угловой минуты. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.1.

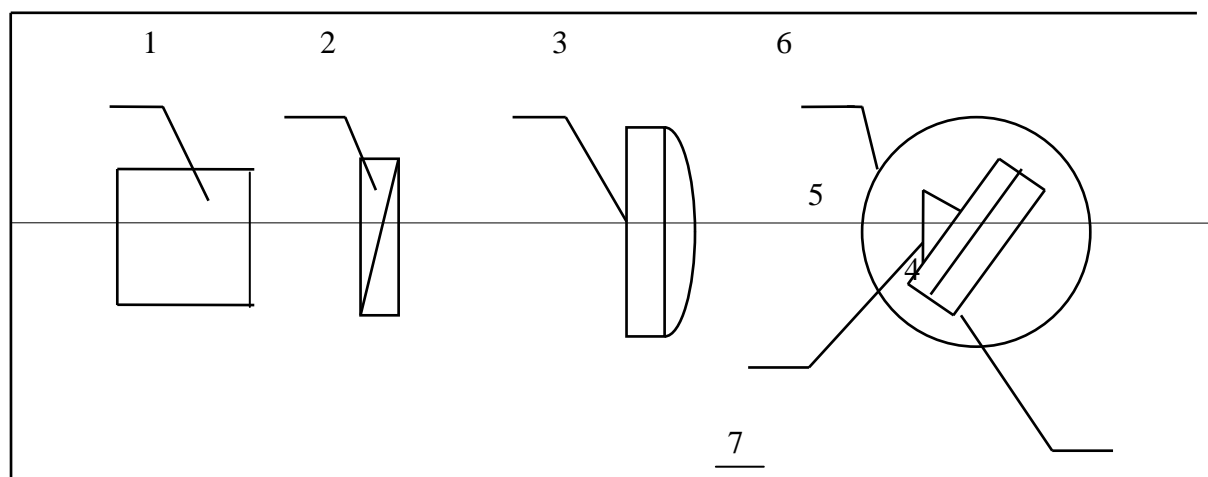


Рисунок 4.1. Схема экспериментальной установки.

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

Для снятия отсчетов величины углов, характеризующих положение столика теодолита в горизонтальной плоскости, используется следующая методика. В центральном окне в поле зрения измерительного микроскопа теодолита находятся 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 - $17^{\circ} 35' 25''$.

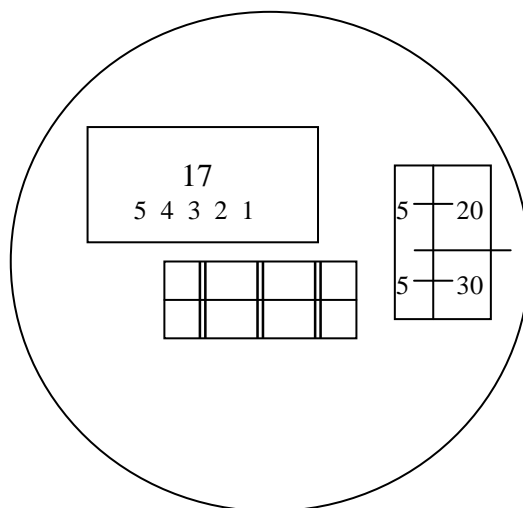


Рисунок 4.2. Пример отсчета угла теодолита: $17^{\circ} 35' 25''$.

4.2. Содержание работы:

- 4.2.1. Определение углов ввода света в волновод.
- 4.2.2. Измерение эффективности ввода света.
- 4.2.3. Определение эффективных показателей преломления волноводных мод и оценка вида профиля показателя преломления волновода.

5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И 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. В работе исследуются два типа волноводов:

- а) градиентный волновод, полученный в ниобате лития методом диффузии титана;
- б) оптический волновод, полученный в ниобате лития методом протонно – литиевого обмена, характеризующийся почти ступенчатым профилем показателя преломления.

Для возбуждения света ($\lambda=633$ нм) в разных образцах используются призмы ввода из ниобата лития с показателем преломления $n_3=2,286$ и из фосфида галлия с $n_3=3,306$, показателем преломления подложки $n_s=2,2$.

5.2. Установить режим автоколлимации светового луча от входной грани призмы и от поверхности волновода.

Для этого: включить лазер, направить луч лазера на призму и убедиться, что моды вводятся. Затем повернуть теодолит вокруг оси так,

чтобы луч света попал на поверхность волновода. С помощью винтов совместить отраженный от волновода луч с падающим, вернуть теодолит в исходное положение, чтобы световой луч падал на входную грань призмы и регулировочными винтами в держателе волновода установить его положение таким, чтобы отраженный луч был совмещен с падающим. При угле падения луча на входную грань призмы, соответствующем его прохождению в подложку, на выходном торце подложки волновода возникает яркое световое пятно. Путем поперечного смещения фокусирующей линзы необходимо добиться максимальной интенсивности данного пятна, что является гарантией достаточно высокой эффективности возбуждения света в волноводе.

5.3. Измерение угла ввода света в волновод.

Угол ввода φ_m – это угол между направлением падающего на входную грань призмы светового луча и направлением нормали к входной грани. Следует считать величину φ_m положительной, если световой луч отклонен от положения нормали к основанию призмы, и отрицательной, если он ближе к ее вершине (рис. 5.1). Положение нормали к входной грани призмы определяется по совмещению отраженного от нее луча с падающим. С помощью управляющего маховичка с фиксирующим флажком куркового типа можно грубо или точно изменять угловое

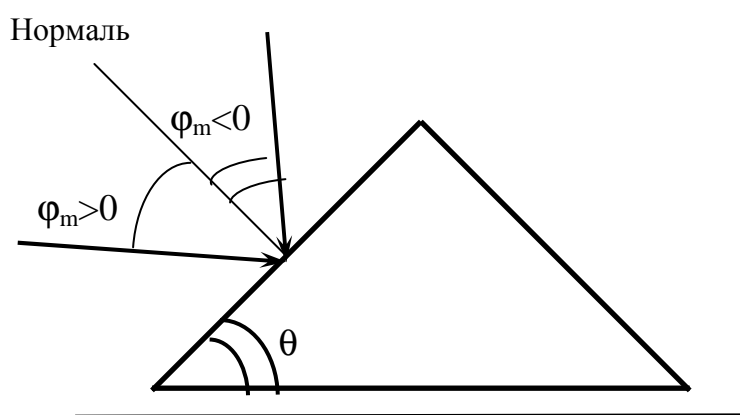


Рисунок 5.1. Определение знака углов ввода света в волновод

положение столика теодолита. При фиксации курка (поворот по часовой стрелке до отказа), вращение маховичка дает точное изменение положения, а при разблокированном маховичке грубая установка столика осуществляется вручную. Добьемся, чтобы свет падал нормально на входную грань призмы. Осторожно поворачивая теодолит руками, добьемся появления световых вспышек на выходном торце волновода, соответствующих моментам возбуждения разных мод. Путем точной регулировки столика зафиксируем его положение, отвечающее максимальной яркости светового пятна на торце волновода, и снимем показания для угла с отсчетной системы теодолита. Для определения

отсчетов величины углов воспользоваться инструкцией, приведенной в п. 4.1. Результаты измерений необходимо занести в таблицу 5.1.

ТАБЛИЦА 5.1

№	МОДЫ	φ_m	$\varphi_m = \varphi_1 - \varphi_m$
---	------	-------------	-------------------------------------

где φ_1 - угол, соответствующий положению нормали к входной грани призмы, а φ_m – угол ввода, соответствующий появлению моды волновода.

5.4. Измерение эффективности ввода света.

Измеряя эффективность ввода, одновременно можно проверить и точность измеренных углов ввода. В этом случае визуальная фиксация углов ввода уточняется путем измерений с помощью фотоприемника.

Регистрация момента, соответствующего вводу света в волновод для достижения более высокой точности измерений, осуществляется с помощью фотодиода с микроамперметром. Фотодиод может размещаться непосредственно у выходного торца волновода, либо вблизи выводной призмы в случае ее наличия. При однопризменной схеме эксперимента возможно измерение углов ввода по моментам уменьшения интенсивности светового пучка, отраженного от основания призмы и выходящего из нее. В данной работе, в случае однопризменной схемы, эффективность ввода излучения рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

где I_{\max} – ток, фиксируемый фотодиодом при отстройке от условия возбуждения моды;

I_{\min} – ток, фиксируемый фотодиодом при вводе моды.

Величины I_{\max} и I_{\min} должны быть определены для каждой моды. При их измерении выходящий из призмы ввода световой луч поступает на фотодиод и показания микроамперметра снимаются в момент возбуждения моды (максимальная яркость светового пятна на выходном торце волновода) и при расстройке условия возбуждения (минимальная яркость этого пятна). Точной настройки можно добиться, вращая маховичок точной регулировки положения столика теодолита. Значения тока заносятся в таблицу № 5.2.

ТАБЛИЦА 5.2

№	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 .

5.5. Определение эффективных показателей преломления волноводных мод.

По величине измеренных углов ввода φ_m можно найти величины эффективных показателей преломления волноводных мод N_m . Они определяются соотношением:

$$N_m = n_3 \cdot \sin[\theta - \arcsin(\sin \varphi_m / n_3)] \quad (5.2)$$

где n_3 - показатель преломления материала призмы, $\theta = 76^\circ$ – угол при основании призмы (или угол между нормалью к входной грани призмы и нормалью к плоскости волновода). Таким образом, для вычисления значений N_m необходимо измерить угол θ , определив положение столика теодолита, при котором луч лазера автоколлимируется, отражаясь от поверхности волновода. Положение нормали к входной грани призмы определяется при измерении углов ввода. Значения N_m заносятся в таблицу № 5.2.

5.6. Оценка вида профиля показателя преломления волновода.

Используя найденные значения эффективных показателей преломления волноводных мод, определите, к какому типу близок его профиль показателя преломления. Для правильной оценки вида профиля показателя преломления волновода, рассмотрим следующий пример:

Предположим, что при отклонении светового пучка от направления нормали к входной грани призмы на величины $0^\circ 30'$; $0^\circ 50'$; $1^\circ 30'$, в планарном волноводе возбуждаются волноводные моды. Причем, если эти углы имеют положительный знак (рис. 5.1), то максимальный угол соответствует моде с наименьшим индексом. В результате, имеем следующие значения углов ввода для мод разного порядка: $\varphi_0 = 1^\circ 30'$, $\varphi_1 = 0^\circ 50'$; $\varphi_2 = 0^\circ 30'$.

Используя соотношение (5.2) и значения $n_3 = 2,286$; $\theta = 76^\circ$, найдем величины эффективных показателей преломления волноводных мод: $N_0 = 2,2243$; $N_1 = 2,2216$; $N_2 = 2,2202$.

По найденным значениям N_m определим величину $(N_0 - N_1) / (N_1 - N_2) = 1,929$. (5.3)

Из выражения (5.3) следует, что полученная величина больше единицы, следовательно, мы имеем дело с волноводом, у которого профиль показателя преломления изменяется экспоненциально. Используя семейство дисперсионных кривых волновода с экспоненциальным профилем показателя преломления (рис.2.5), найдем значение нормированной толщины волновода $V \approx 7,5$, соответствующее данной величине (5.3). При этом по графику рисунка 2.5 (для полученной толщины волновода $V \approx 7,5$) определяем соответствующие величины

нормированных эффективных показателей преломления мод: $b_0=0.5$; $b_1=0.25$.

Величина изменения показателя преломления на поверхности градиентного волновода может быть найдена из соотношения: $b_0=(N_0-N_1)/\Delta n$, что дает $\Delta n \approx 0,0054$.

Если величина выражения (5.3) окажется меньше единицы, то для анализа используем график (рис.2.6).

После проведения измерений с фокусирующей линзой необходимо снять показания без линзы. Измерения производятся аналогично измерениям с линзой. Значения полученные, при измерениях без линзы, следует также занести в таблицы № 5.1. , № 5.2. и подвергнуть их соответствующей обработке.

В конце работы необходимо провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

6. Содержание отчета

- 6.1. Краткое описание теории, касающейся оптических волноводов.
- 6.2. Схемы измерений, по которым выполнялись эксперименты.
- 6.3. Результаты измерений по пунктам, предусмотренным программой работ в форме таблиц, графиков, расчетов.
- 6.4. Обсуждение результатов и выводы по работе.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

- 7.1. Каков характер электромагнитного поля в планарном волноводе при существовании в нем направляемой моды?
- 7.2. Каковы соотношения между показателями преломления отдельных сред в планарном оптическом волноводе?
- 7.3. Поясните, какие составляющие векторов электромагнитного поля характерны для ТЕ мод, а какие – для ТМ мод.
- 7.4. В чем состоит условие самосогласованности в планарном волноводе.
- 7.5. В чем заключается режим автоколлимации?
- 7.6. Как определить экспериментально угол ввода света в волновод?
- 7.7. Как можно определить критический угол ввода?
- 7.8. Что понимается под эффективностью ввода?
- 7.9. Как можно измерить эффективность ввода?
- 7.10. От чего зависит эффективный показатель преломления и как его определить?

Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической оптики: Учебное пособие // Томск: ТУСУР, 2013. — 190 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3739>
2. Шандаров, В. М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: Учебное пособие // Томск: ТУСУР, 2013. — 198 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3709>