

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления  
200700.68 - «Фотоника и оптоинформатика»

**Башкиров Александр Иванович**  
**Литвинов Рудольф Викторович**

Интегральная и волноводная фотоника: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 200700.68 - «Фотоника и оптоинформатика» / А.И. Башкиров, Р.В. Литвинов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2013. - 21 с.

В ходе выполнения лабораторных работ у студентов формируются:

- способность проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности (ОК-5);
- способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ОК- 6);
- готовность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы) (ОК- 7);
- способность демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи (креативность) (ПК-2);
- способность определить цели и план научных исследований (ПК-8);
- готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-10);
- способность предлагать пути решения, выбирать методику и средства проведения научных исследований (ПК-11);
- способность планировать и проводить эксперименты, обрабатывать и анализировать их результаты (ПК-13);
- способность применять процедуры защиты интеллектуальной собственности на территории иностранных государств (ПК-21);
- готовность находить оптимальные решения при создании наукоемкой продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности, безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности (ПК-49).

Пособие предназначено для студентов очной формы направления 200700.68 - «Фотоника и оптоинформатика», обучающихся по дисциплине «Интегральная и волноводная фотоника».

© Башкиров Александр Иванович, 2013

© Литвинов Рудольф Викторович, 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭП

\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ И ВОЛНОВОДНАЯ ФОТОНИКА

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления 200700.68 - «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчики

\_\_\_\_\_ А.И. Башкиров

\_\_\_\_\_ Р.В. Литвинов

\_\_\_\_\_ 2013 г.

2013

## Содержание

Лабораторная работа 1. Исследование дисперсионных характеристик полосковых волноводов.....	5
1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	5
2.1 Основные понятия.....	5
2.2 Основные расчетные формулы.....	7
2.3 Контрольные вопросы.....	9
3. Экспериментальная часть.....	9
3.1 Задание.....	9
3.2 Методические указания.....	10
3.3 Содержание отчета.....	10
Лабораторная работа 2. Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы.....	11
1 Введение.....	11
2 Теоретическая часть.....	11
2.1 Общие понятия.....	11
2.2 Основные расчетные формулы для сферических геодезических линз.....	15
2.3 Контрольные вопросы.....	17
3 Экспериментальная часть.....	17
3.1 Экспериментальная установка и методика измерений.....	17
3.2 Задание.....	19
3.3 Содержание отчета.....	19
Список литературы.....	20

# Лабораторная работа 1. Исследование дисперсионных характеристик полосковых волноводов

## 1 Введение

**Цель работы:** Рассчитать эффективные показатели преломления гребенчатого полоскового волновода.

В ходе выполнения лабораторной работы у студентов формируются:

- способность проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности (ОК-5);
- способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ОК- 6);
- способность демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи (креативность) (ПК-2);
- способность определить цели и план научных исследований (ПК-8);
- готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-10);
- способность предлагать пути решения, выбирать методику и средства проведения научных исследований (ПК-11);
- способность применять процедуры защиты интеллектуальной собственности на территории иностранных государств (ПК-21);
- готовность находить оптимальные решения при создании наукоемкой продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности, безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности (ПК-49).

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Основные понятия

Основные типы трехмерных волноводных структур представлены на рис.2.1. В интегральных оптических схемах полосковые волноводы используются в основном как линии связи.

К гребенчатому типу относятся канальные волноводы, изображенные на рис. 2.1, а), б), е), и). Значительный скачок показателя преломления  $\Delta n$  в поперечном направлении для волноводов, изображенных на рис. 2.1 а) и б), приводит к многомодовому режиму их работы. Полосковые волноводы, показанные на рис. 2.1, з)-и), имеют в своем составе участки со значительным поглощением на частоте световой волны. В этих волноводах легко реализуется одномодовый и маломодовый режим работы.

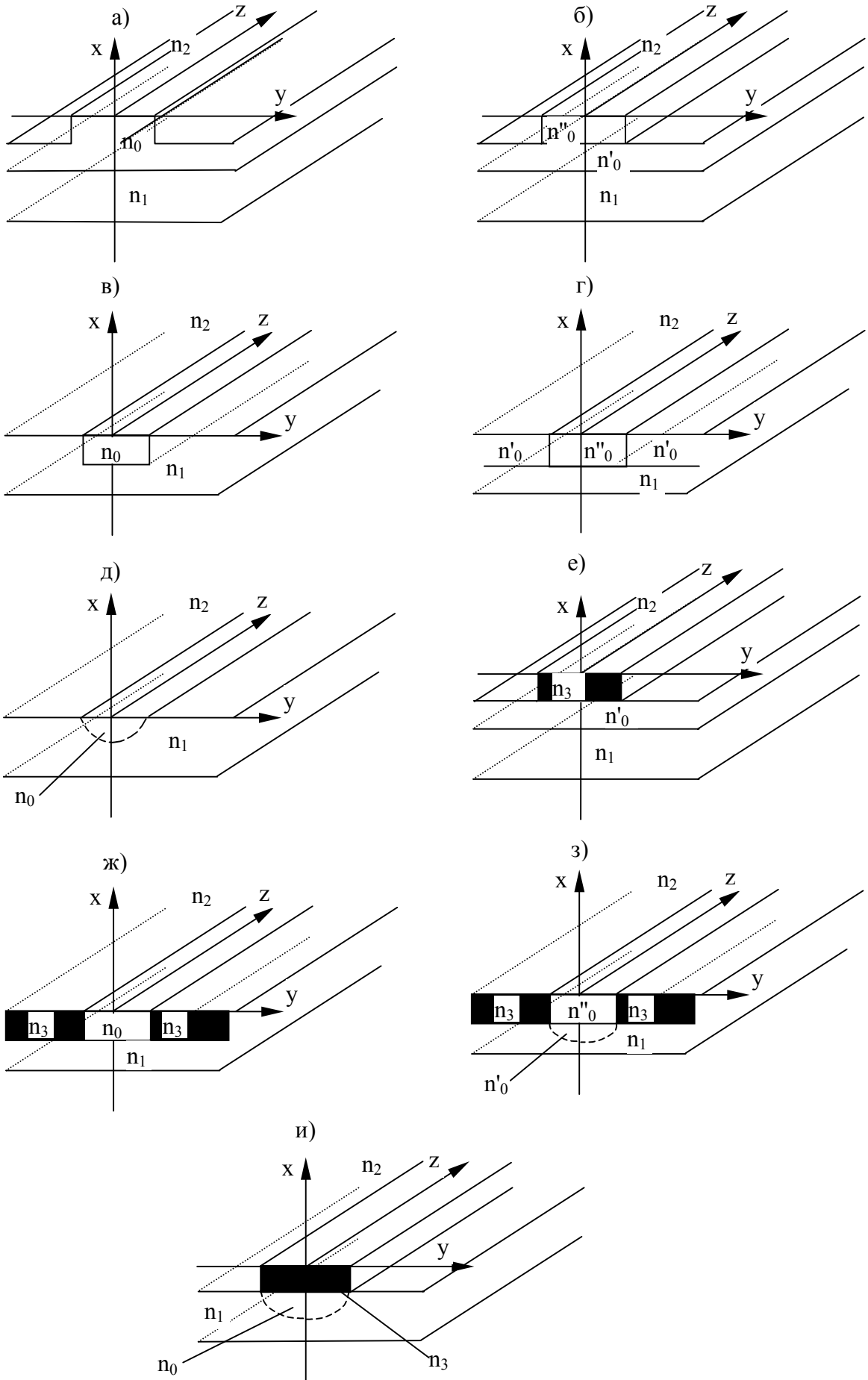


Рисунок 2.1 - Основные типы трехмерных волноводов: а)-д) – каналные; е)-и) – полосковые;  $n_3 = n'_3 + in''_3$ .

Погруженные канальные структуры (рис. 2.1, в)-д)) характеризуются промежуточными свойствами по сравнению с указанными выше структурами. Число распространяющихся мод в них определяется размером канала и разностью показателей преломления материалов, образующих волновод.

Наиболее перспективными для интегральной оптики являются различные виды полосковых и погруженных канальных волноводов. Основные их достоинства связаны с широкими технологическими и конструктивными возможностями создания эффективных волноводных структур на их основе. К достоинствам полосковых волноводов следует отнести слабую чувствительность к нарушениям границ диэлектрической полоски и увеличение допуска на ее формат в одномодовом режиме. В интегральных оптических схемах ширина может достигать десяти и более микрон, что в значительной степени упрощает операцию стыковки волноводов.

Получение точных аналитических решений уравнений Максвелла для большинства полосковых структур невозможно. Поэтому для расчета дисперсионных характеристик и анализа распространения волноводных мод широко применяют различные приближенные методы. В данной работе дисперсионные характеристики гребенчатого волновода, относящегося к типу, изображенному на рис. 2.1, а), рассчитываются методом эффективного показателя преломления.

## 2.2 Основные расчетные формулы

Рассмотрим полосковую структуру изображенную на рис. 2.1.а). Как правило, размеры областей с показателем преломления  $n_0$  слева и справа от полоски вдоль оси  $Y$  значительно превышают длину волны светового поля  $\lambda_0$ , распространяющегося вдоль оси  $Z$ .

Поэтому эти области можно считать пленочными планарными волноводами толщиной  $h'$  (рис. 2.2) со спектром эффективных показателей преломления  $n_p^*$ , где  $p = 0, 1, 2, 3 \dots$  - определяет номер моды. Спектр эффективных показателей преломления находится при решении дисперсионного уравнения:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} h' = \frac{1}{\sqrt{n_0^2 - n'^{*2}}} \left\{ p\pi + \arctg \left[ \left( \frac{n_0}{n_1} \right)^\chi \sqrt{\frac{n'^{*2} - n_1^2}{n_0^2 - n'^{*2}}} \right] + \arctg \left[ \left( \frac{n_0}{n_2} \right)^\chi \sqrt{\frac{n'^{*2} - n_2^2}{n_0^2 - n'^{*2}}} \right] \right\}, \quad (2.1)$$

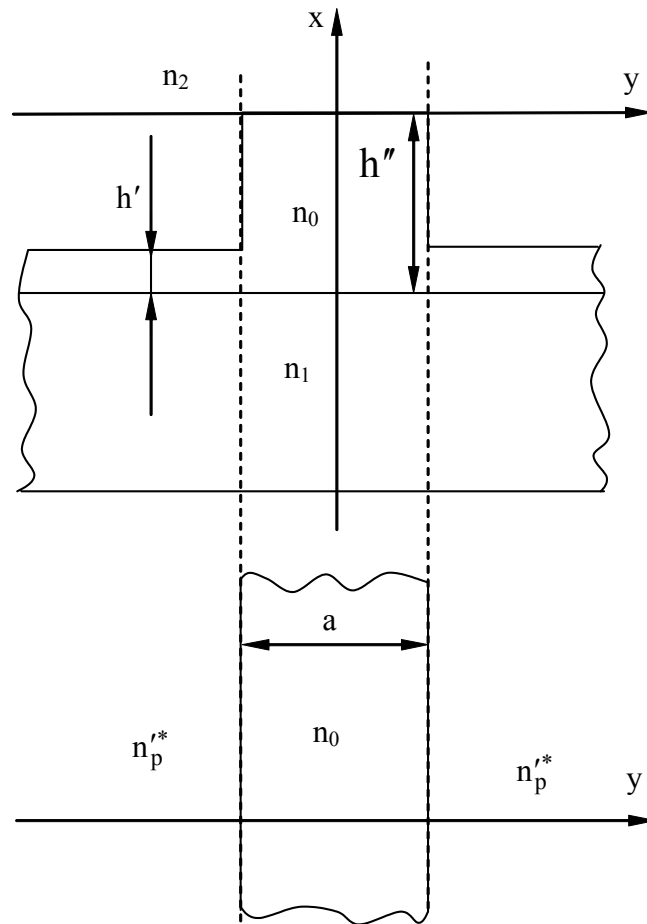


Рисунок 2.2 - Схема метода эффективного показателя преломления:  $n_0$ ,  $n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления волноводного слоя, подложки и покровной среды, соответственно,  $\chi = 0$  для ТЕ-мод и  $\chi = 2$  для ТМ-мод

Толщина пленки в области гребня  $h''$  значительно больше чем  $h'$ . Спектр эффективных показателей преломления для области гребня вначале также находим, решая уравнение (2.1), заменяя в нем  $h'$  на  $h''$ . Тогда для планарного волновода толщиной  $h''$  при прочих неизменных параметрах значения эффективных показателей преломления  $n_p^{''*}$  будут больше значений  $n_p^*$  с тем же номером  $p$ , поэтому распространение света в основном ограничено областью гребня. Это дает нам право считать область гребня симметричным планарным волноводом толщиной  $a$  с поперечной координатой вдоль оси  $Y$  (рис. 2.2). Покровной средой и подложкой для этого волновода служат области с показателем преломления  $n_p^*$ , показатель преломления пленки имеет значение  $n_p^{''*}$ . Таким образом, этот планарный волновод является симметричным. Показатели преломления волноводных мод такого волновода можно рассчитать, используя дисперсионное уравнение (2.1), если в нем вместо



величин  $n_1$  и  $n_2$  подставить заранее рассчитанные значения  $n_p^*$ , вместо  $h'$  -  $a$ , вместо номера  $p$  другой текущий номер  $s=0, 1, 2, 3, \dots$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} a = \frac{1}{\sqrt{n_0^2 - n^{**2}}} \left\{ s\pi + 2 \arctg \left[ \left( \frac{n_0}{n_p^*} \right)^\chi \sqrt{\frac{n^{**2} - n_p^{*2}}{n_0^2 - n^{**2}}} \right] \right\}. \quad (2.2)$$

Численные значения решений последнего уравнения принимают за значения эффективных показателей преломления волноводных мод гребенчатого полоскового волновода  $n_{p,s}^*$ . Эти значения отвечают двум независимым индексам  $p$  и  $s$ . Эти индексы указывают число нулей в распределении амплитуд волноводных мод  $\vec{E}(x,y)$  по осям  $Ox$  и  $Oy$ , соответственно. Расчет  $\vec{E}(x,y)$  показывает, что в полосковых волноводах существует два набора мод. Один из них обозначается через  $E_{p,s}^x$  (индекс  $\chi=0$ ), и поле такой моды имеет две *сильные* компоненты -  $E_x$  и  $H_y$ . Составляющие  $E_y$ ,  $E_z$  и  $H_x$ ,  $H_z$  малы по величине. Второй набор имеет обозначения  $E_{p,s}^y$  (индекс  $\chi=2$ ), *сильные* компоненты здесь  $E_y$  и  $H_x$ , а слабые  $E_x$ ,  $E_z$  и  $H_y$ ,  $H_z$ .

### 2.3 Контрольные вопросы

1. Поясните суть метода эффективного показателя преломления для расчета дисперсионных характеристик полоскового волновода.
2. Каковы основные ограничения, накладываемые на использование метода эффективного показателя преломления?
3. Проанализируйте условия отсечки для волноводов данного типа. Чем они отличаются от условий отсечки в планарных пленочных волноводах?
4. Какова структура волноводных мод в полосковых волноводах? Чем эти моды отличаются от мод планарного волновода?
5. Нарисовать приблизительный вид распределения светового поля на торце волновода для  $E_{0,1}^x$ ,  $E_{1,0}^x$  и  $E_{1,1}^x$  мод. Сделать то же самое для  $E_{p,s}^y$  мод.

## 3. Экспериментальная часть

### 3.1 Задание

1. Согласовать с преподавателем основные параметры, необходимые для расчета показателей преломления волноводных мод гребенчатого полоскового волновода.
2. Рассчитать дисперсионные зависимости  $n_{p,s}^*(h',a)$ .

3. Определить размеры волновода, соответствующие одномодовому и двухмодовому режиму работы.

### 3.2 Методические указания

Для расчета дисперсионных зависимостей можно использовать свободно распространяемые пакеты компьютерной математики, например *Scilab*. Решение дисперсионных уравнений может быть осуществлено при помощи встроенных функций для решения нелинейных уравнений. В некоторых случаях необходимо задавать начальное приближение эффективного показателя преломления, которое следует выбирать исходя из возможных значений эффективного показателя преломления. В случае, если численное решение не найдено, то необходимо изменить начальное приближение или упростить дисперсионное уравнение так, чтобы в процессе вычислений не появлялись операции с очень большими числами. В последних версиях вычислительных пакетов реализована возможность программирования того или иного численного метода.

Результат расчета представить в виде семейства зависимостей  $n_{p,s}^*(a/\lambda_0)$  построенных для различных значений  $h'$  и в виде поверхностного графика  $n_{p,s}^*(h'/\lambda_0, a/\lambda_0)$ .

### 3.3 Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Схемы основных типов полосковых волноводов (ОК6, ПК8, ПК10).
- 4 Схема, поясняющая метод эффективного показателя преломления (ОК6, ПК8, ПК10).
- 5 Дисперсионные зависимости заданных волноводов, их анализ (ОК5, ПК2, ПК11, ПК21, ПК49).
- 6 Ответы на контрольные вопросы.
- 7 Выводы.

# Лабораторная работа 2. Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы

## 1 Введение

**Цель работы:** Определение фокусного расстояния геодезической линзы для соответствующей световой моды планарного волновода. Расчет радиуса кривизны сферической линзы и глубины ее залегания в подложке.

В ходе выполнения лабораторной работы у студентов формируются:

- способность проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности (ОК-5);
- способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ОК- 6);
- готовность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы) (ОК- 7);
- способность демонстрировать навыки работы в научном коллективе, порождать новые идеи (креативность) (ПК-2);
- способность определить цели и план научных исследований (ПК-8);
- готовность обосновать актуальность целей и задач проводимых научных исследований (ПК-10);
- способность предлагать пути решения, выбирать методику и средства проведения научных исследований (ПК-11);
- способность планировать и проводить эксперименты, обрабатывать и анализировать их результаты (ПК-13);
- способность применять процедуры защиты интеллектуальной собственности на территории иностранных государств (ПК-21);
- готовность находить оптимальные решения при создании наукоемкой продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности, безопасности жизнедеятельности, а также экологической безопасности (ПК-49).

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Общие понятия

При создании интегрально-оптических устройств, например спектроанализаторов и корреляторов, возникает необходимость изготовления пассивных интегральных оптических элементов, в частности фокусирующих элементов. С их помощью в интегрально-оптических устройствах осуществляется формирование заданных фазовых фронтов оптических пучков, Фурье-преобразований и т.д. В настоящее время эти элементы

относятся к базовым компонентам интегральной оптики, выполненным так же, как и волноводы, по интегральной технологии.

К наиболее распространенным и изученным относятся три типа линз. Линзы Люнеберга (рис. 2.1), линзы типа дифракционной решетки (дифракционные линзы, рис. 2.2) и геодезические линзы (рис. 2.3)

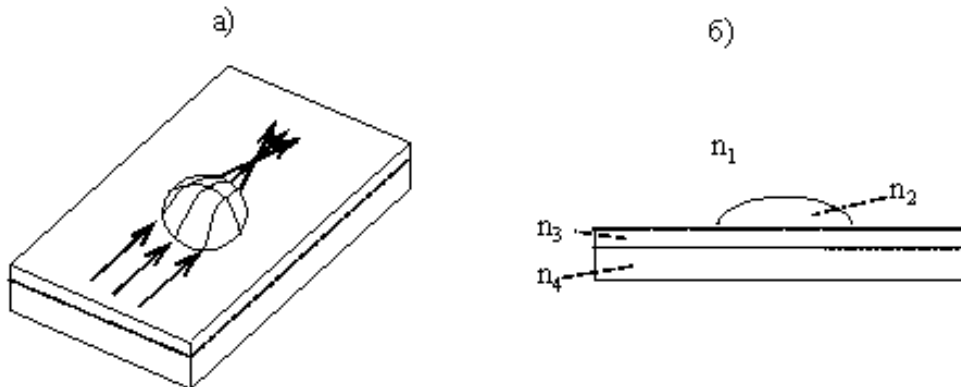


Рисунок 2.1 - Волноводная структура линзы Люнеберга. (а) - общий вид прохождения лучей. (б) - продольное сечение по осевому лучу

Линза Люнеберга создается путем нанесения на волноводный слой планарного волновода с показателем преломления  $n_3$  дополнительного волноводного слоя с показателем преломления  $n_2$ , имеющего сферическую или эллипсоидальную форму. Так как верхний волноводный слой  $n_2$  имеет переменный по толщине профиль, то эффективный показатель преломления волноводной моды  $n_p^*$  будет так же зависеть от координат в волноводном слое, что приведет к искажению фазового фронта волноводной моды. В силу сферической симметрии градиент эффективного показателя преломления будет направлен в направлении осевого луча. В соответствии с принципом Ферма, это приведет к отклонению симметрично расположенных боковых лучей в сторону осевого, которые пересекутся с ним в одной точке называемой фокусом линзы. Расстояние от центра линзы до фокуса, так же как и в объемной оптике, называется фокусным расстоянием.

Дифракционные линзы представляют собой одно из перспективных направлений в создании высококачественных фокусирующих устройств интегральной оптики. Они технологически проще линз Люнеберга и геодезических линз. Их технология может быть отнесена к базовой технологии элементов интегральной оптики. Основу этой технологии составляют коротковолновая фотолитография и электронная литография. К наиболее перспективным планарным дифракционным линзам относятся линзы Френеля (см. рис. 2.2), брэгговские линзы и линзы выполненные в виде дифракционной решетки с переменным шагом.

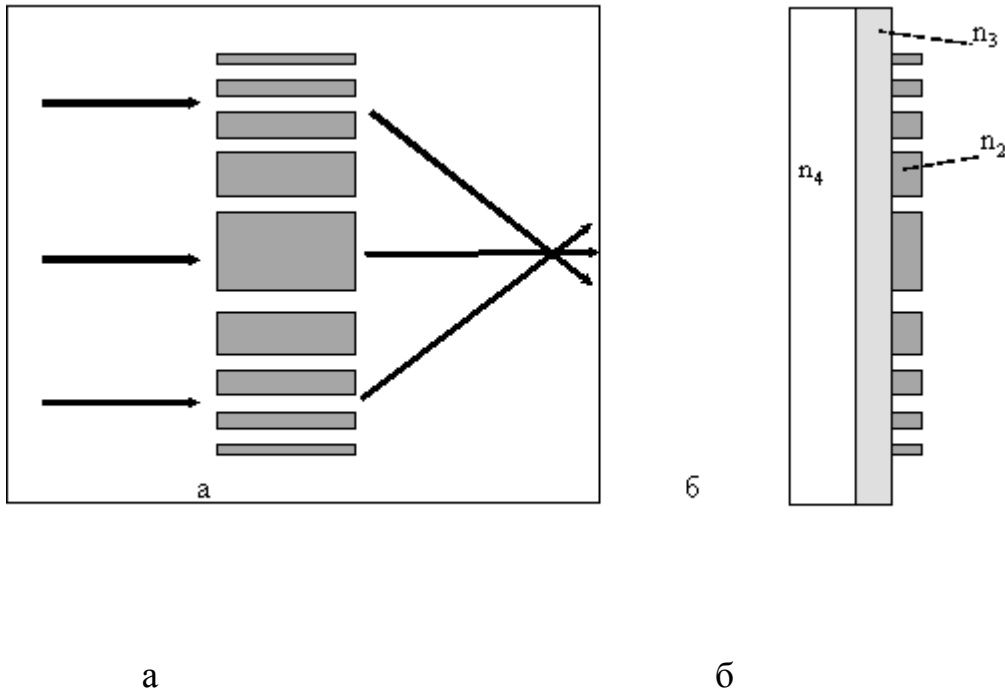


Рисунок 2.2 - Линза Френеля - линза типа дифракционной решетки. (а) - вид сверху, стрелками показан ход лучей, (б) - вид сбоку.

В классической линзе Френеля фокусировка обусловлена двумя эффектами: дифракцией Френеля; введением в плоскость дифракции соответствующего фазового сдвига или поглощения для усиления интерференции в фокальной точке. В волноводной линзе необходимый фазовый сдвиг получают за счет изменения эффективного показателя преломления, меняя параметры волноводного слоя ( $h_{эфф}$  или  $n^*$ ), или нанесением на волновод металлического или диэлектрического покрытия. Усиление дифракции в фокусе может быть получено также за счет усиления поглощения той части излучения, которая разрушает интерференцию в фокальной плоскости точке. Однако с увеличением поглощения одновременно снижается эффективность линзы, что делает метод фазового сдвига более предпочтительным.

Геометрическая линза представляет собой углубление (рис.2.3) или возвышение сферической или асферической формы в подложке, образованное оптическим шлифованием и полированием. Волновод в подложке создается в ней после изготовления в ней требуемого рельефа. Волноводный слой формируется с помощью диффузионных и ионно-обменных процессов в подложке или нанесением на поверхность подложки соответствующих волноводных пленок. Как правило, геометрические размеры линзы значительно больше длины волны света распространяющейся волноводной моды. В этом случае эффективный показатель преломления для данной

волноводной моды можно считать одинаковым по всему волноводному слою (включая углубление). Тогда для объяснения механизма фокусировки геодезической линзы можно использовать принцип Ферма.

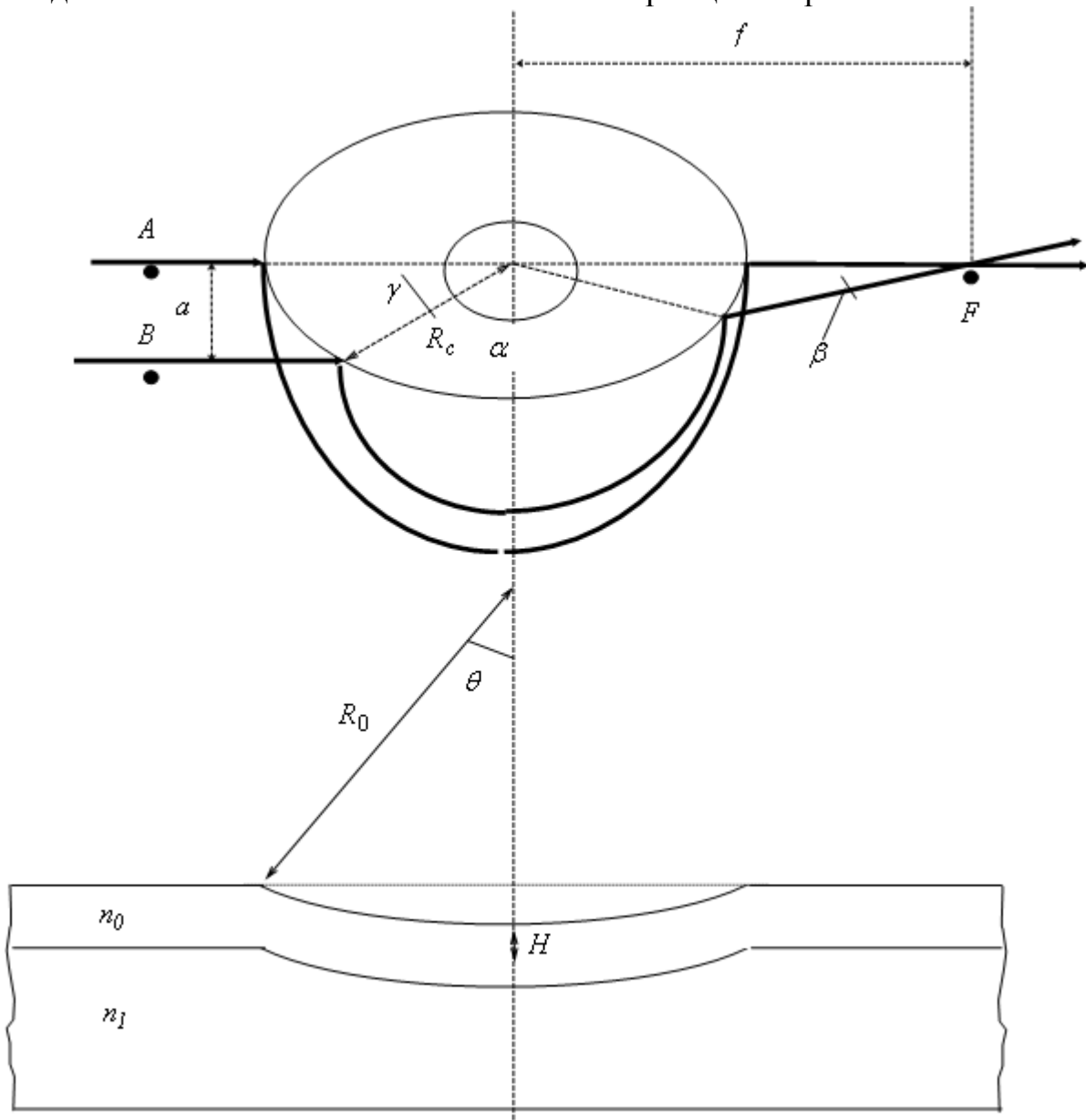


Рисунок 2.3 - Геодезическая линза. Геометрия и ход лучей

В соответствии с этим принципом длина оптического пути от точек  $A$  и  $B$ , (находящихся на одинаковом расстоянии от центра линзы, см. рис. 2.3) для различных световых лучей до фокальной точки  $F$  должна быть одинаковой и минимальной из всех возможных. Это возможно только, если лучи падающие на линзу на некотором расстоянии  $a$  от линии  $AF$  будут отклоняться в сторону осевого луча, пересекаясь с ним в фокальной точке  $F$ . При этом требование минимальности приводит к тому, что луч вошедший в линзу распространялся по геодезической линии (отсюда и название линз) изогнутой поверхности, образующей линзу.

Недостатком геодезической линзы являются энергетические потери для данной волноводной моды, которые возникают при переходе моды из планарного волновода в сферическое углубление и при распространении моды по этому сферическому углублению, которое является "изогнутым" волноводом. Для уменьшения этих потерь острые кромки на стыке сферического углубления и планарного волновода обычно скругляют.

## 2.2 Основные расчетные формулы для сферических геодезических линз

Из рис. 2.3 следует, что фокусное расстояние  $f$  линзы, образованной сферическим углублением радиуса  $R_0$  можно рассчитать по формуле

$$f = R_c \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\beta)} = R_c \left[ \frac{\sin(\alpha)}{\operatorname{tg}(\beta)} - \cos(\alpha) \right] \quad (2.1)$$

где  $R_c$  - радиус углубления в плоскости волновода, угол  $\alpha$  - определяет траекторию прохождения луча по сферической поверхности, падающего на эту поверхность на расстоянии  $a$  от ее оси, угол  $\beta$  - угол отклонения луча, прошедшего геодезическую линзу.

Применение принципа Ферма позволяет следующим образом выразить углы  $\alpha$  и  $\beta$  через угол  $\gamma = \arcsin(a/R_0)$  и угол  $\theta$  (см. рис. 3)

$$\beta = 2(\gamma - \operatorname{arctg}[\cos(\theta)\operatorname{tg}(\gamma)]), \quad (2.2)$$

$$\alpha = \gamma + 2\operatorname{arctg}[\cos(\theta)\operatorname{tg}(\gamma)]. \quad (2.3)$$

В параксиальном приближении, когда  $\gamma \approx a/R_c \ll 1$  фокусное расстояние можно рассчитать по выражению

$$f_0 = \frac{R_c}{2(1 - \cos(\theta))}. \quad (2.4)$$

Как следует из приведенных выражений, фокусное расстояние  $f$  является функцией угла  $\gamma = \arcsin(a/R_0)$ , или, точнее, функцией отношения  $a/R_0$ , которое можно рассматривать как отношение апертуры  $a$  падающего на линзу пучка к радиусу линзы в плоскости волновода. Этот эффект, как известно, носит название аберрации.

На рис. 2.4 показаны зависимости фокусного расстояния нормированного на свое параксиальное значение  $f/f_0$  от отношения  $a/R_c$  для

различных величин отношения радиуса линзы в плоскости волновода  $R_0$  к радиусу сферического углубления  $R_c$  (см. рис. 2.3).

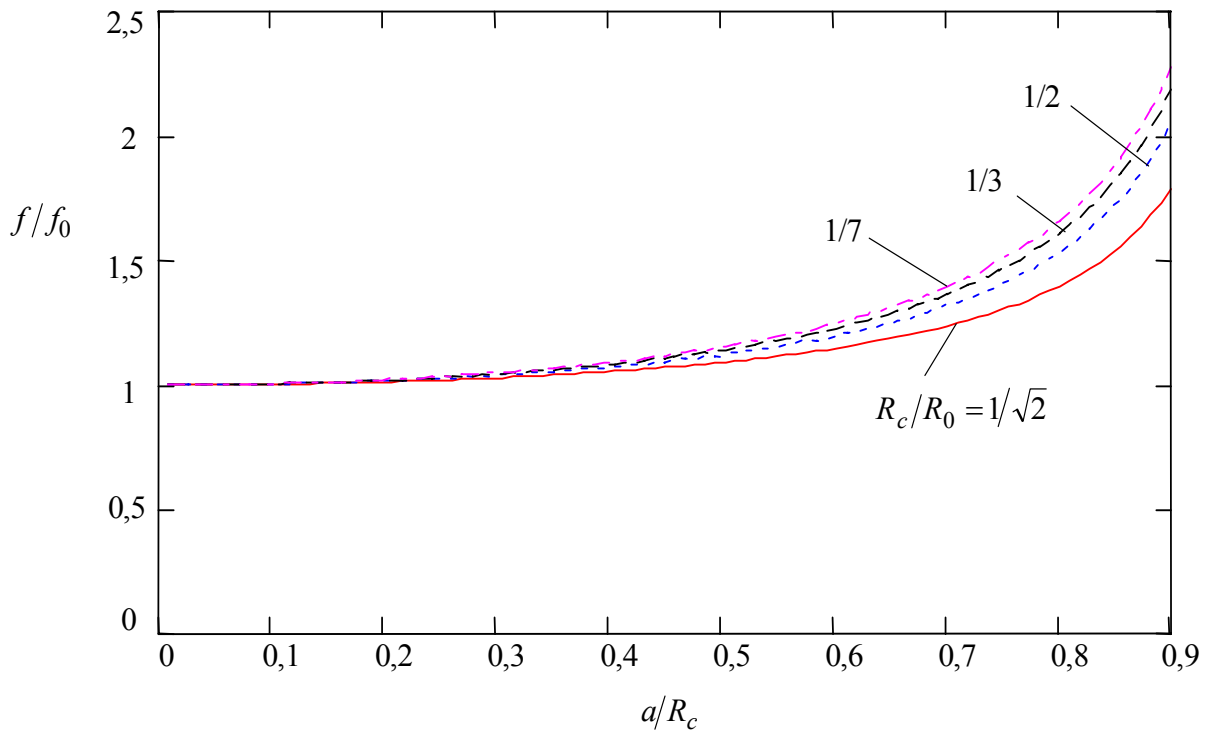


Рисунок 2.4 - Зависимость фокусного расстояния нормированного на свое параксиальное значение  $f/f_0$  от отношения  $a/R_c$  для различных величин отношения радиуса линзы в плоскости волновода  $R_0$  к радиусу сферического углубления  $R_c$

Как видно из рисунка при уменьшении  $R_c$  и при неизменном  $R_0$  абберационные искажения уменьшаются. Однако при этом уменьшается и фокусное расстояние. Ясно, что фокусное расстояние не может быть меньше чем  $R_0$ , когда приведенные расчетные формулы теряют силу. При величине  $R_0 > 5R_c$  кривые зависимости  $f/f_0$  практически сливаются. Из рисунка следует, что для уменьшения абберационных искажений необходимо, чтобы апертура падающего на линзу пучка была небольшой ( $a/R_c < 0,2$ ).

В заключении заметим, что значительного уменьшения абберационных искажений можно добиться используя более сложную асферическую форму геодезической линзы или применяя коррекцию эффективного показателя преломления в области линзы. В последнем случае изменяют либо толщину напыления, либо используют для напыления другой материал.



## 2.3 Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное различие между линзами Люнеберга, геодезическими линзами и линзами типа дифракционной решетки? Объясните принцип фокусировки этих типов интегральных планарных линз.
2. Какие ограничения накладываются на анализ фокусировки этих типов линз на основе принципа Ферма?
3. Зависит ли фокусное расстояние планарной линзы от типа и номера моды возбуждаемой в планарном волноводе?
4. В чем суть абберационных искажений в планарных геодезических линзах?
5. Зависят ли абберационные искажения для геодезической линзы сферической формы от типа и номера моды возбуждаемой в планарном волноводе?
6. Как для геодезической линзы сферической формы меняется величина абберационных искажений с увеличением глубины залегания линзы в подложке?
7. Можно ли для уменьшения абберационных искажений использовать линзы с большим отношением  $R_c/R_0$ ? Если можно то до каких пределов?

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка собрана на голографическом столе. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.1.

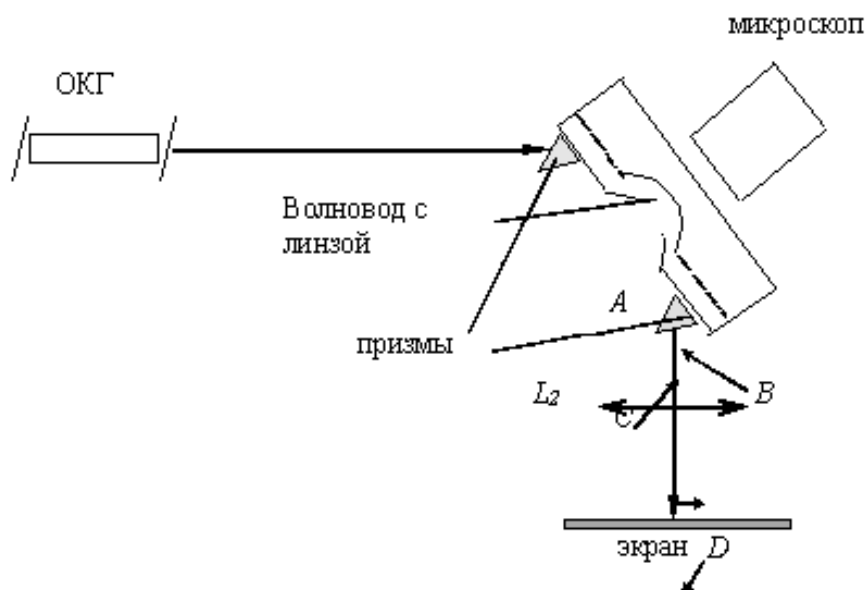


Рисунок 3.1 - Схема экспериментальной установки

Плоскость рисунка совпадает с плоскостью голографического стола. В состав установки входит лазер (ОКГ) с длиной волны излучения 633 нм, волновод со сферической линзой изготовленный на подложке из ниобата лития ( $LiNbO_3$ ), вводная и выводная призмы изготовленные из рутила, линза  $L_2$ , микроскоп, экран. Кристаллофизическая ось  $OZ$  материала подложки перпендикулярна плоскости рисунка, а ось  $OX$  (или  $OY$ ) лежит на пересечении плоскости рисунка и плоскости волноводного слоя.

Линза  $L_2$  предназначена для измерения фокусного расстояния волноводной линзы. Для понимания методики этого измерения рассмотрим, распространение света в ломанной поверхности  $ABCD$  (см. рис. 3.1) перпендикулярной плоскости рисунка. Для удобства мысленно развернем эту ломанную поверхность в одну плоскость (рис. 3.2), что можно сделать в силу того что свет не испытывает преломления в этом направлении. Отметим, что фокус волноводной линзы может находиться как в области волновода, так и за его пределами (либо в области выводной призмы, либо вообще в покровной среде, которой в данном случае является воздух).

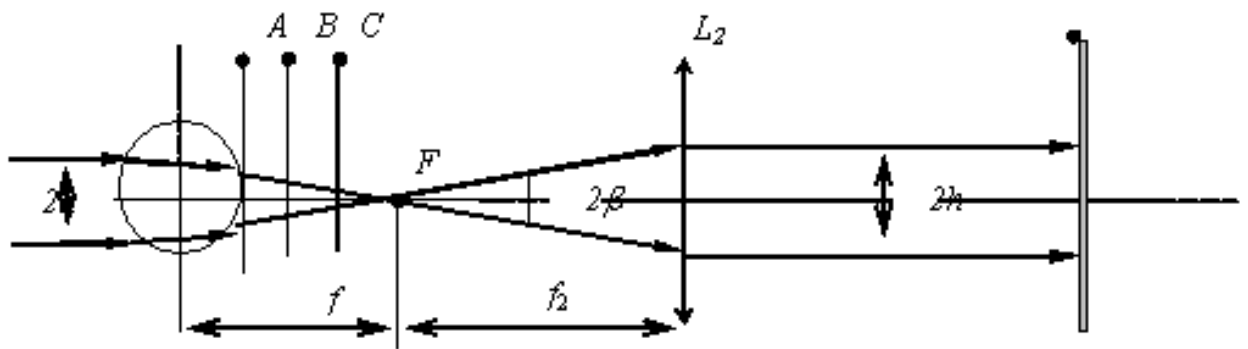


Рисунок 3.2 - Схема измерения угловой расходимости светового поля, прошедшего волноводную линзу

Если фокус волноводной линзы совпадает с фокусом линзы  $L_2$ , то угловая расходимость светового поля, прошедшего через линзу, не будет меняться в направлении нормали к плоскости рисунка. Это можно зафиксировать, изменяя расстояние между экраном и линзой  $L_2$ . Зная фокусное расстояние этой линзы  $f_2$ , можно определить угол  $\beta$ , определяющий угловую расходимость в плоскости волновода прошедшего волноводную линзу светового поля. Измеряя при помощи координатной сетки микроскопа радиус  $R_c$  (см. рис. 2.3) и расстояние  $a$  между направлением падения тонкого (узкоапертурного) пучка на волноводную линзу и осевой линией (см. рис. 3.2 и рис. 2.3) можно на основании соотношений приведенных в предыдущем пункте определить фокусное расстояние призмы и глубину ее залегания в подложке  $H$  (см. рис. 2.3).

Отметим, что при работе с широкоапертурным пучком под  $2a$  следует понимать величину его апертуры и добиваться его симметричного прохождения через линзу (см. рис. 3.2)

### 3.2 Задание

1. Установить поляризацию падающего пучка так, чтобы она соответствовала эффективному возбуждению ТЕ-мод.

2. Изменяя угол падения лазерного луча на вводную призму добиться эффективного возбуждения волноводной ТЕ-моды.

3. Наблюдая в микроскоп трек волноводной моды добиться симметричного ее падения на волноводную линзу. Этого можно достичь меняя высоту расположения лазера относительно голографического стола, на котором расположена экспериментальная установка. В это же время измерить радиус линзы  $R_c$  в плоскости волновода.

4. Изменяя расстояние между линзой  $L_2$  и волноводом добиться отсутствия угловой расходимости в направлении соответствующем нормали к плоскости рис. 5 у светового поля прошедшего линзу.

5. Измерить геометрические размеры светового поля прошедшего линзу  $L_2$  в указанном в п. 3 направлении

6. Измерить фокусное расстояние линзы  $L_2$  и рассчитать угловую расходимость прошедшего волноводную линзу светового поля  $\beta$ .

7. Используя приведенные в п. 3 соотношения, рассчитать фокусное расстояние  $f$ , радиус сферического углубления  $R_0$  и глубину залегания призмы в подложке  $H$ .

8. Прodelать п.п. 1-7 для ТМ-мод.

### 3.3 Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Схемы различных типов линз (ОК6, ПК8, ПК10).
- 4 Схема эксперимента для измерения фокусного расстояния геодезической линзы (ОК6, ПК8, ПК10).
- 5 Результаты эксперимента и их анализ (ОК5, ОК7, ПК2, ПК11, ПК13, ПК21, ПК49).
- 6 Ответы на контрольные вопросы.
- 7 Выводы.
- 8 Список использованных источников

## Список литературы

1. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 528 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1136 8. Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=684](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=684)
2. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие. – Томск: Томск. гос.ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. - 149 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/802>.
3. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. - 142 с. Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/410/73410/files/nikonorov1.pdf>
4. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2012. - 198 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/741>.
5. Информационная оптика: Учебное пособие для вузов / Николай Николаевич Евтихийев, Ольга Анатольевна Евтихьева, Игорь Николаевич Компанец ; ред. Н. Н. Евтихийев ; Федеральная целевая программа "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2000 годы". - М. : Издательство МЭИ, 2000. - 612 с. : ил. - (в пер.) – Экз. - 19
6. Волноводная оптоэлектроника: Пер. с англ. / Ред. Т. Тамир. - М. : Мир, 1991. - 574[2] с. : ил, табл. - Библиогр. в конце глав. -Предм. указ.: с. 564-572. - ISBN 5-03-001903-0 (в пер.) – Экз. - 6
7. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации : Монография / Александр Сергеевич Семенов, Владимир Леонидович Смирнов, Анатолий Васильевич Шмалько. - М.: Радио и связь, 1990. - 225 с. : ил. - Библиогр.: с. 212-221. - ISBN 5-256-00738-6 – Экз. – 12
8. Шангин А.С. Интегральная и волноводная фотоника: Методические указания к практическим занятиям. - Томск: ТУСУР, 2012. - 75 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/1106>.
9. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики. Сборник задач для студентов: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТУСУР, 2012. – 59 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2273>.
10. Ефанов В.И. Сборник задач по волоконно-оптическим линиям связи: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям. - Томск: ТУСУР, 2012. – 50с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/788>.

Учебное пособие

Башкиров А.И., Литвинов Р.В

Интегральная и волноводная фотоника

Методические указания к лабораторным работам

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40