

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ
ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДАХ
ПРИ ПОМОЩИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

Башкиров, А.И., Литвинов Р.В.

Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах при помощи геодезической линзы = Интегральная и волноводная фотоника: методические указания к лабораторной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / А.А. 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, 2012. - 14 с.

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

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

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

«__» _____ 2012 г.

Интегральная и волноводная фотоника

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ВОЛНОВОДНЫХ МОД В ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДАХ ПРИ ПОМОЩИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

РАЗРАБОТЧИКИ

Доцент каф. ЭП

_____ А.И. Башкиров

_____ 2012 г

Доцент каф.ЭП

_____ Р.В. Литвинов

Содержание

1	Введение	5
2	Теоретическая часть	5
2.1	Общие понятия.....	5
2.2	Основные расчетные формулы для сферических геодезических линз.....	8
2.3	Контрольные вопросы	10
3	Экспериментальная часть	10
3.1	Экспериментальная установка и методика измерений	10
3.2	Задание	12
3.3	Содержание отчета	12
	Список литературы.....	13

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.

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)

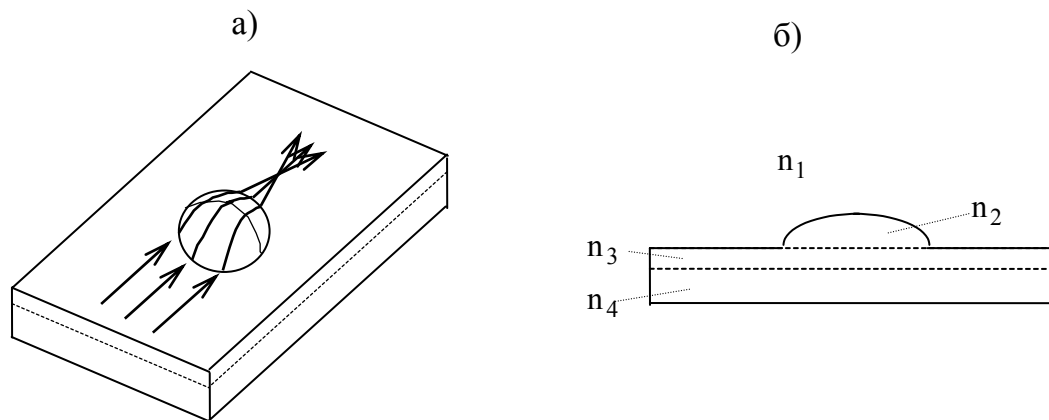


Рисунок 2.1 - Волноводная структура линзы Люнеберга. (а) - общий вид прохождения лучей. (б) - продольное сечение по осевому лучу

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), брэгговские линзы и линзы выполненные в виде дифракционной решетки с переменным шагом.

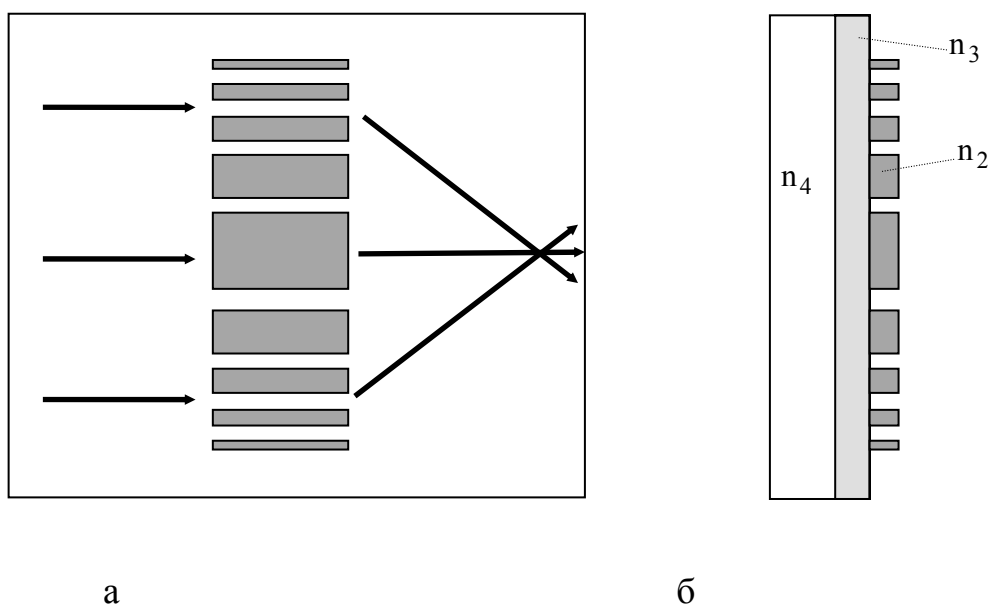


Рисунок 2.2 - Линза Френеля - линза типа дифракционной решетки. (а) - вид сверху, стрелками показан ход лучей, (б) - вид сбоку.

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.

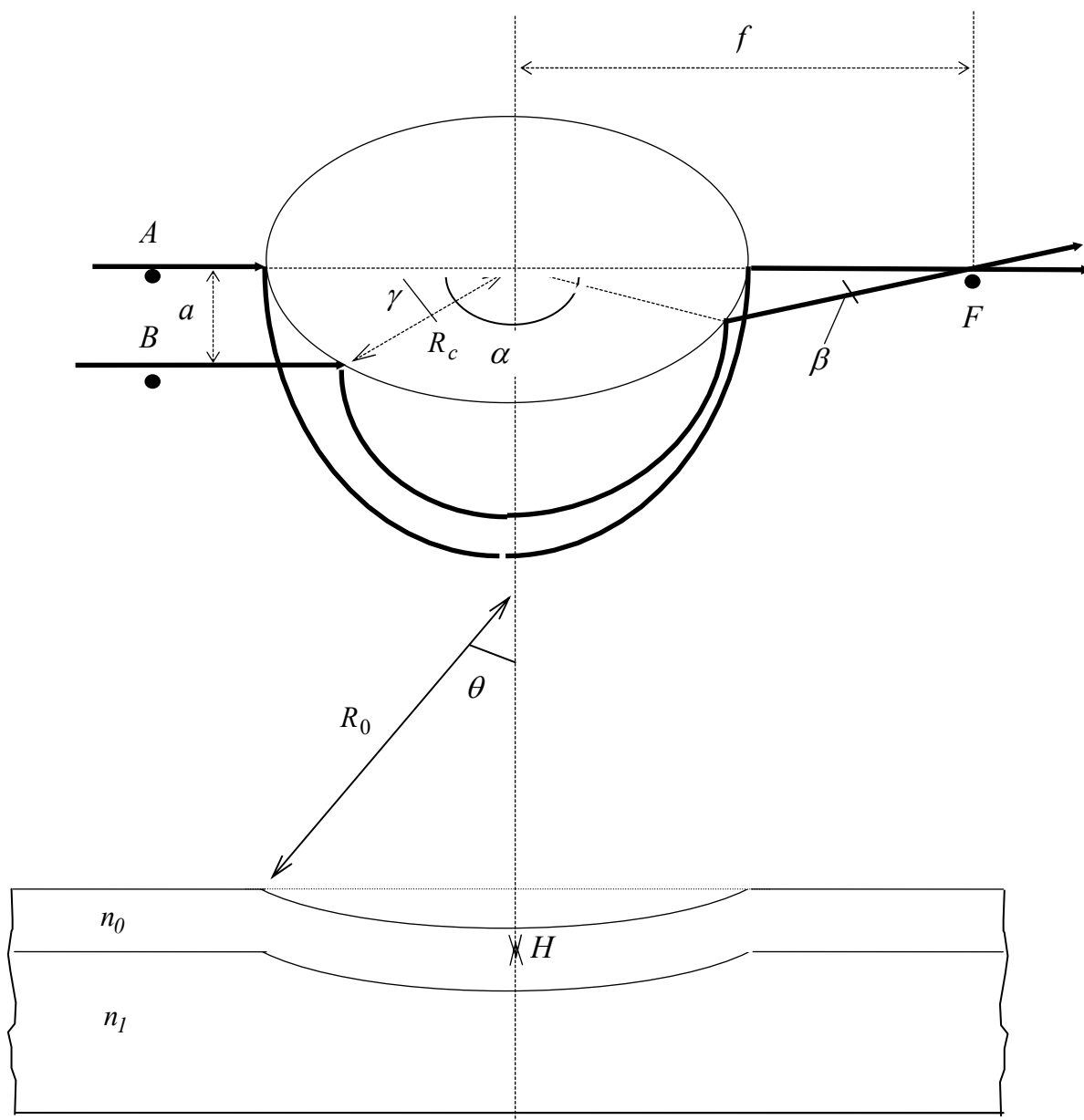


Рисунок 2.3 - Геодезическая линза. Геометрия и ход лучей

Геодезическая линза представляет собой углубление (см. 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. 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 α - определяет траекторию прохождения луча по сферической поверхности, падающего на эту поверхность на расстоянии a от ее оси, угол β - угол отклонения луча, прошедшего геодезическую линзу.

Применение принципа Ферма позволяет следующим образом выразить углы α и β через угол $\gamma = \arcsin(a/R_0)$ и угол θ (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 абберации.

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).

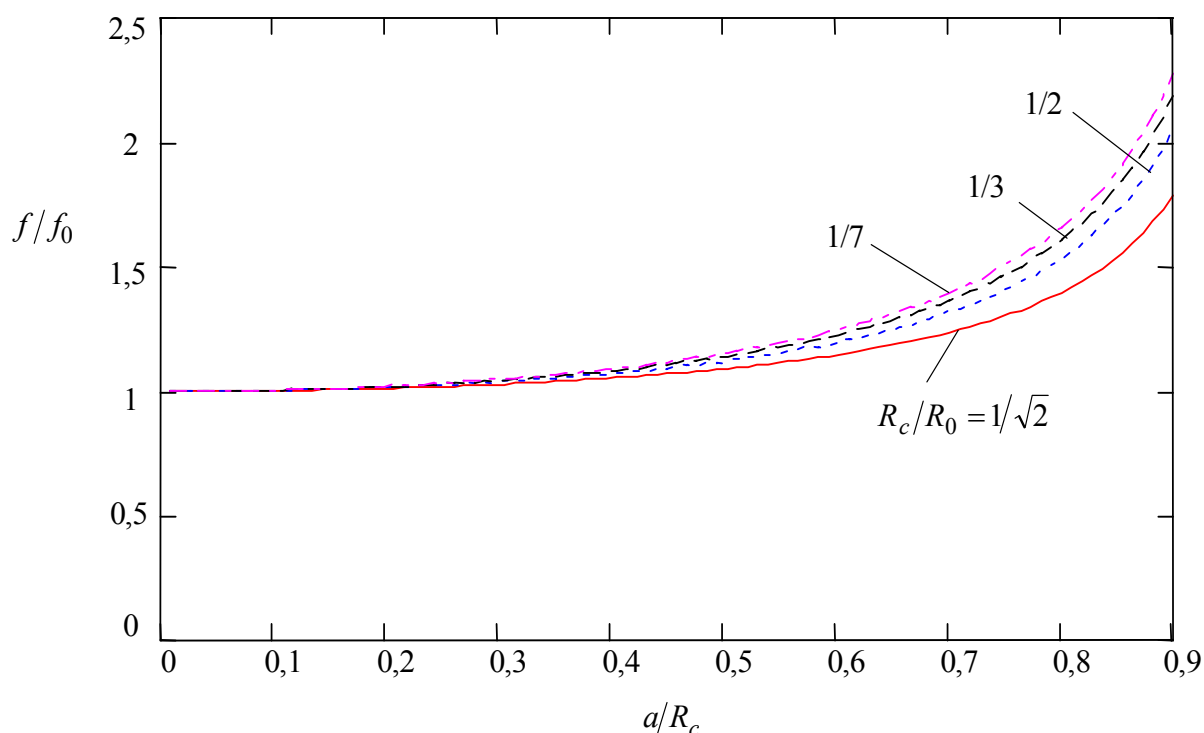


Рисунок 2.4 - Зависимость фокусного расстояния нормированного на свое параксиальное значение f/f_0 от отношения a/R_c для различных величин отношения радиуса линзы в плоскости волновода R_0 к радиусу сферического углубления R_c

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. Объяснить 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. 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.

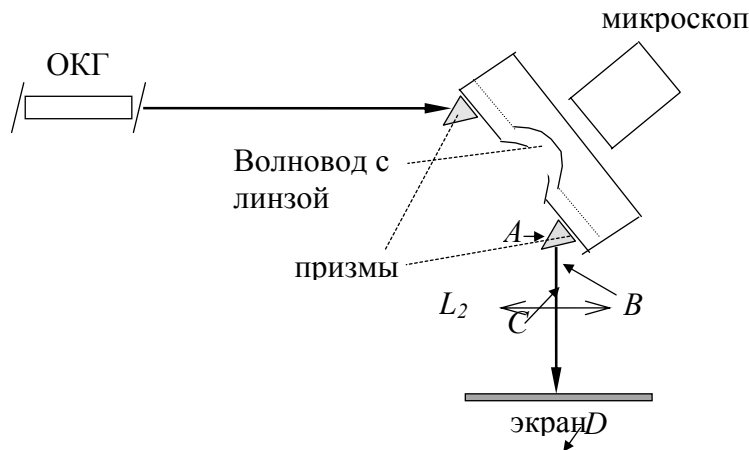


Рисунок 3.1 - Схема экспериментальной установки

Линза L_2 предназначена для измерения фокусного расстояния волноводной

линзы. Для понимания методики этого измерения рассмотрим, распространение света в ломанной поверхности $ABCD$ (см. рис. 5) перпендикулярной плоскости рисунка. Для удобства мысленно развернем эту ломанную поверхность в одну плоскость (см. рис. 6), 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).

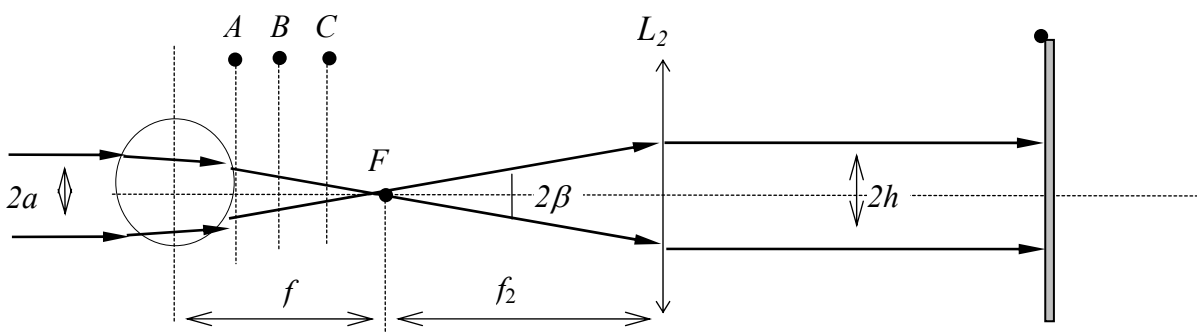


Рисунок 3.2 - Схема измерения угловой расходимости светового поля, прошедшего волноводную линзу

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 β , 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. Попутно 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 β .

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. 1-7 для ТМ-мод.

3.3 Содержание отчета

1 Титульный лист.

2 Цель работы.

3 Схема эксперимента.

- 4 Результаты эксперимента и их анализ.
- 5 Ответы на контрольные вопросы.
- 6 Выводы.
- 7 Список использованных источников

Список литературы

1. Информационная оптика / Н.Н.Евтихеев, О.А.Евтихеева, И.Н.Компанец, А.Е.Краснов, Ю.Н.Кульчин, С.Б.Одинокоев, Б.С.Ринкевичус.– М.: МЭИ, 2000. – 112 с.
2. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. - 142 с. <http://window.edu.ru/resource/410/73410/files/nikonorov1.pdf>.
3. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2012. - 198 с. (Научно - образовательный портал ТУСУРа, <http://edu.tusur.ru>).
4. Информационная оптика: учебное пособие для вузов / Н.Н.Евтихеев, О.А.Евтихеева, И.Н.Компанец, А.Е.Краснов, Ю.Н.Кульчин, С.Б.Одинокоев, Б.С.Ринкевичус - М.: Издательство МЭИ, 2000. - 612 с.
5. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990.– 225 с.
6. Шангина Л.И. Квантовая и оптическая электроника: Учебное методическое пособие по практическим занятиям. - Томск: ТУСУР, 2012.-228 с. (Научно - образовательный портал ТУСУРа, <http://edu.tusur.ru>).
7. Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям. – Томск: ТУСУР, 2012. – 31 с. (Научно - образовательный портал ТУСУРа, <http://edu.tusur.ru>).

Учебное пособие

Башкиров А.И., Литвинов Р.В.

Исследование фокусировки волноводных мод в планарных волноводах
при помощи геодезической линзы

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Интегральная и волноводная фотоника»

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