

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

кафедра  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Осипов О.В.,  
Табаков Д.П.,  
Солдатов А.А.,  
Морозов С.В.

**ФИЗИЧЕСКАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ  
ОПТИКА**  
методические указания к лабораторным занятиям

**ЧАСТЬ I**

САМАРА — 2018

**УДК 631.385.6, 621.373.826, 621.383**

**Осипов Олег Владимирович, Табаков Дмитрий Петрович, Солдатов Александр Анатольевич, Морозов Сергей Владимирович.**

Методическая разработка для лабораторных занятий по дисциплине «Физическая и интегральная оптика. Часть I», Самара, 2018. 63 стр. с иллюстрациями

Методическая разработка предназначена для организации лабораторных занятий студентов, обучающихся по направлениям (специальностям) и профилям подготовки бакалавров

- 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи:
  - Оптические и проводные сети и системы связи;
  - Сети и системы радиосвязи;

Для организации лабораторных аудиторных занятий методическая разработка представляет собой набор лабораторных работ, которые содержат несколько вариантов исходных данных, краткие теоретические сведения, а также расчетные выражения необходимые для выполнения заданий.

Для организации самостоятельной работы студентов методическая разработка содержит список рекомендуемой литературы, а также список теоретических вопросов для подготовки к итоговому контролю.

## Содержание

<b>ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1</b>	
Расчет корней трансцендентных уравнений . . . . .	5
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2</b>	
Расчет дисперсионных характеристик плоского трехслойного оптического волновода . . . . .	13
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3</b>	
Электродинамический анализ градиентных оптических волноводов . . . . .	20
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4</b>	
Электродинамический анализ собственных волн оптических волноводов . . . . .	32
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5</b>	
Исследование интегрального электрооптического вращателя плоскости поляризации . . . . .	46
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>63</b>

## **Цели и задачи дисциплины «Физическая и интегральная оптика»**

Цели преподавания дисциплины «Физическая и интегральная оптика»:

- Формирование у студентов физических и теоретических основ для понимания принципов работы базовых элементов интегральных оптических схем.
- Формирование базовой подготовки студентов по интегральной оптике для решения производственных и исследовательских задач.
- Овладение основами расчётов характеристик базовых элементов интегральных оптических схем, получение общих знаний по их применению.

Задачи изучения дисциплины «Физическая и интегральная оптика»:

- Приобретение студентами знаний о физических принципах работы интегральных оптических устройств различного назначения, созданных на базе планарных и полосковых оптических волноводов.
- Приобретение студентами практических навыков вычисления характеристик базовых элементов интегральных оптических схем с использованием ПЭВМ.

Аттестация по этому виду учебной работы проводится после выполнения и защиты лабораторных работ, подразумевающей индивидуальное собеседование студента с преподавателем. Выполненные лабораторные работы следует оформить на листах формата А4.

# Лабораторная работа №1

## РАСЧЕТ КОРНЕЙ ТРАНСЦЕНДЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ

### 1.1 Цели работы

- Освоить навыки программирования в программном пакете «Mathima»;
- Реализовать алгоритмы численного поиска корней трансцендентных уравнений;
- Исследовать основные характеристики предложенных алгоритмов.

### 1.2 Краткие теоретические сведения

#### 1.2.1 Метод бисекции

Пусть задано уравнение вида  $y = f(x)$ , которое на некотором интервале  $[a; b]$  имеет корень  $x^*$ , при котором  $f(x^*) = 0$ . Пусть график этой функции имеет вид, показанный на рисунке 1.1.

- Если  $f(a)f(b) < 0$ , это означает, что на интервале  $[a; b]$  имеется корень  $x^*$ . Метод бисекции заключается в следующем. Первое

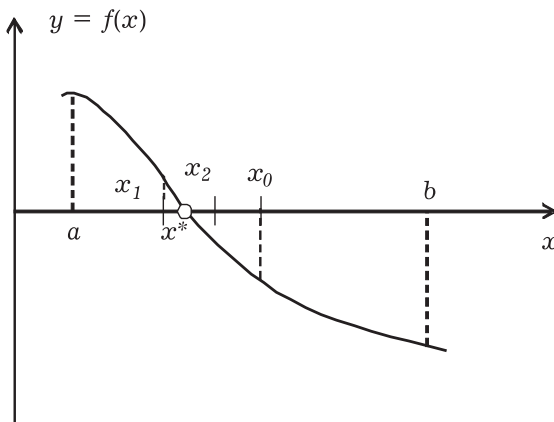


Рис. 1.1. Метод бисекции

приближение выбирается в виде середины интервала  $[a; b]$ :

$$x_0 = (a + b)/2.$$

- Если  $f(a)f(x_0) < 0$ , то корень лежит в интервале  $[a; x_0]$ , в противном случае в  $[x_0; b]$ . Для функции, показанной на рисунке 1 выполняется первое условие, поэтому второе приближение выбирается в виде середины интервала  $[a; x_0]$ :

$$x_1 = (a + x_0)/2.$$

- Если  $f(a)f(x_1) < 0$ , то корень лежит в интервале  $[a; x_1]$ , в противном случае в  $[x_1; x_0]$ . Для функции, показанной на рисунке 1 выполняется второе условие, поэтому третье приближение выбирается в виде середины интервала  $[x_1; x_0]$ :

$$x_2 = (x_1 + x_0)/2.$$

- Подобный процесс выполняется до выполнения условия

$$|f(x_k)| < e,$$

где  $x_k$  —  $k$ -ое приближение к корню;  $e$  — заранее заданное малое число.

### 1.2.2 Метод хорд

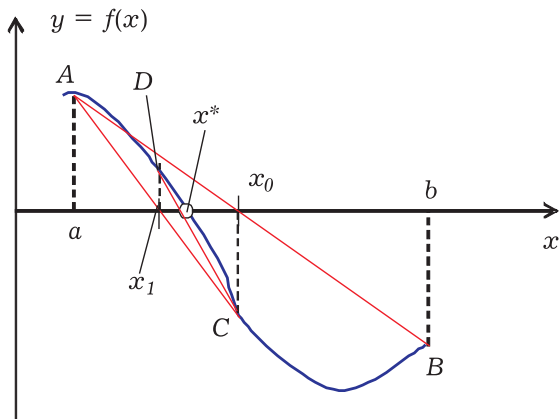
Пусть задано уравнение вида  $y = f(x)$ , которое на некотором интервале  $[a; b]$  имеет корень  $x^*$ , при котором  $f(x^*) = 0$ . Пусть график этой функции имеет вид, показанный на рисунке 1.2.

- Если  $f(a)f(b) < 0$ , это означает, что на интервале  $[a; b]$  имеется корень  $x^*$ . Метод хорд заключается в следующем. Проводим хорду  $AB$  из точки  $(a, f(a))$  в точку  $(b, f(b))$  и в качестве первого приближения выбираем точку  $x_0$ :

$$x_0 = a - (f(b) - f(a))/(b - a).$$

- Если  $f(a)f(x_0) < 0$ , то корень лежит в интервале  $[a; x_0]$ , в противном случае в  $[x_0; b]$ . Для функции, показанной на рисунке 1.2 выполняется первое условие, поэтому проводим хорду  $AC$  из точки  $(a, f(a))$  в точку  $(x_0, f(x_0))$ , и в качестве первого приближения выбираем точку  $x_1$ :

$$x_1 = a - (f(x_0) - f(a))/(x_0 - a).$$



**Рис. 1.2.** Метод хорд

- Если  $f(a)f(x_1) < 0$ , то корень лежит в интервале  $[a; x_1]$ , в противном случае в  $[x_1; x_0]$ . Для функции, показанной на рисунке 1.2, выполняется второе условие, поэтому проводим хорду  $AD$  из точки  $(x_0, f(x_0))$  в точку  $(x_1, f(x_1))$  и в качестве первого приближения выбираем точку  $x_2$ :

$$x_2 = x_1 - (f(x_1) - f(x_0))/(x_1 - x_0).$$

- Подобный процесс выполняется до выполнения условия

$$|f(x_k)| < \epsilon,$$

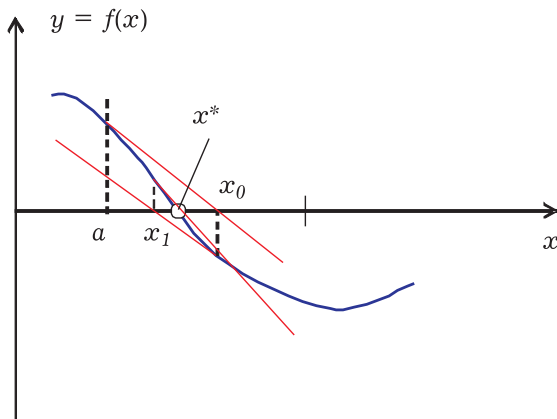
где  $x_k$  —  $k$ -ое приближение к корню;  $\epsilon$  — заранее заданное малое число.

Общая формула выбора приближения для метода хорд имеет вид:

$$x_k = x_{k-1} - (f(x_{k-1}) - f(x_{k-2}))/x_{k-1} - x_{k-2}.$$

### 1.2.3 Метод Ньютона

Пусть задано уравнение вида  $y = f(x)$ , которое вблизи некоторой точки  $a$  имеет корень  $x^*$ , при котором  $f(x^*) = 0$ . Пусть график этой функции имеет вид, показанный на рисунке 1.3.



**Рис. 1.3.** Метод Ньютона

- В точке  $x = a$  проводится касательная к графику функции  $y = f(x)$ , которая пересекает ось  $x$  в точке  $x_0$ . Из определения производной функции в точке:

$$f'(a) = f(a)/(x_0 - a)$$

находим значение  $x_0$ :

$$x_0 = a - f(a)/f'(a).$$

- В точке  $x = x_0$  проводится касательная к графику функции  $y = f(x)$ , которая пересекает ось  $x$  в точке  $x_1$ :

$$x_1 = x_0 - f(x_0)/f'(x_0).$$

- Подобный процесс выполняется до выполнения условия  $|f(x_k)| < \epsilon$ , где  $x_k$  —  $k$ -ое приближение к корню;  $\epsilon$  — заранее заданное малое число.

Общая формула выбора приближения для метода Ньютона имеет вид:

$$x_k = x_{k-1} - f(x_{k-1})/f'(x_{k-1}). \quad (1.1)$$

На каждом шаге итерации производная определяется следующим образом:

$$f'(x_k) = (f(x_k + e) - f(x_k))/e,$$

где  $e$  — малое число.



### 1.3 Домашнее задание

- Ознакомиться с соответствующими разделами из источников, представленных в методических указаниях к данной работе;
- Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями.

### 1.4 Задание на работу

Определить корень  $x^*$  уравнения  $f(x) = 0$  с точностью  $\epsilon$  с помощью предложенных численных методов. Функция  $f(x)$  выбирается из таблицы 1.1 в соответствии с номером бригады.

Таблица 1.1. Варианты заданий на работу

№	$f(x)$	м. бисекции	м. хорд	м. Ньютона
1	$2 \sin x + \cos x - 2^{-x}$	+	+	+
2	$2 \cos x - \sin x - x^2$	+	+	+
3	$x^5 - 3x^2 - 5x - 5$	+	+	+
4	$\cos x - \sin x + 0.5x$	+	+	+
5	$\cos x - \sin x - 0.5x^2$	+	+	+
6	$e^{-2x} - x^2 + 0.5x$	+	+	+

Таблица 1.2. Таблица результатов

$\epsilon$	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$
$k$ , метод бисекции				
$k$ , метод хорд				
$k$ , метод Ньютона				

Результаты расчетов представить в виде таблицы 1.2. Здесь  $k$  — число итераций, необходимое для достижения заданной точности. Под таблицей указать значение корня с точностью  $\epsilon = 10^{-3}$ .

### 1.5 Порядок выполнения работы

#### 1.5.1 Подготовительные операции

Перед выполнением лабораторной работы необходимо:

- запустить графический интерфейс «wxMaxima»;
- создать и сохранить файл рабочего листа «LabRoot.wxm»;

- перейти в режим численных расчетов, ввести функцию  $f(x)$  как показано в примере, первоначальные значения  $a$  и  $b$ , а также точность расчета  $e$ :

```

1 numer: true$
2 f(x):=x^2 - 2$
3 a: 0$ b: 5$ e: 10^(-3)$

```

- построить график функции  $f(x)$

```

1 wxplot2d([f(x)], [x,a,b],
2 [plot_format, gnuplot],
3 [gnuplot_preamble, "set grid;"]);

```

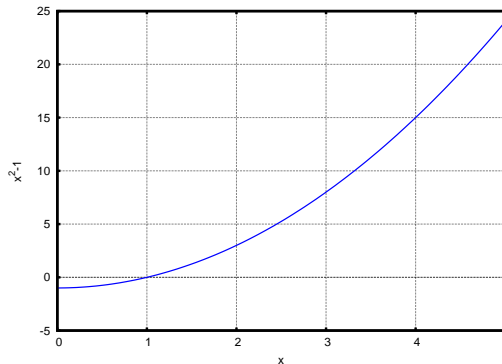


Рис. 1.4. График исследуемой функции

- вместо функции представленной в примере, подставить функцию заданную по варианту;
- построить график этой функции;
- по графику определить число корней и подобрать значения  $a$  и  $b$  таким образом, чтобы интервал  $[a; b]$  содержал один корень;
- задать первоначальное значение точности  $e = 10^{-3}$ .

### 1.5.2 Определение корня уравнения методом бисекции

Реализация алгоритма метода бисекции показана ниже. В текст программы введена дополнительная константа  $s$ , показывающая число итераций, необходимое для достижения заданной точности  $e$ .

```

1 /* решение методом бисекции */
2 bisect(f1,sp,e):=
3 block([a,b,it],
4 define(f(x),f1),
5 a:sp[1], b:sp[2], it:0, c:a,
6 for i:1 while abs(f(c))>e do
7 (
8 it:it+1, c:(a+b)/2,
9 if f(c)=0 or f(c)=0.0 then return(c),
10 if f(a)*f(c)<0 then b:c else a:c), [c,it])$
11 kill(x)$ bisect(f(x),[a,b],e); /* результат */

```

**Задание.** Реализуйте указанный алгоритм. При помощи функции `bisect(f(x),[a,b],e)` найдите корень заданной функции с необходимой точностью и заполните первую строку таблицы 1.2.

### 1.5.3 Определение корня уравнения методом хорд

Реализация алгоритма метода хорд показана ниже.

```

1 /* решение методом хорд */
2 chords(f1,sp,e):=
3 block([a,b,it],
4 define(f(x),f1),
5 define(g(a,b),a-f(a)*(b-a)/(f(b)-f(a))),
6 a:sp[1], b:sp[2], it:0, c:a,
7 for i:1 while abs(f(c))>e do
8 (
9 it:it+1, c:g(a,b),
10 if f(a)*f(c)<0 then b:c else a:c), [c,it])$
11 chords(f(x),[a,b],e); /* результат */

```

**Задание.** Реализуйте указанный алгоритм. При помощи функции `chords(f(x),[a,b],e)` найдите корень заданной функции с необходимой точностью и заполните вторую строку таблицы 1.2.

### 1.5.4 Определение корня уравнения методом Ньютона

**Задание.** Реализуйте указанный ниже алгоритм. При помощи функции `newton(f(x),b,e)` найдите корень заданной функции с необходимой точностью и заполните третью строку таблицы 1.2. Сделайте вывод о том, какой из изученных методов является наиболее быстродействующим, позволяющим за меньшее число итера-

ций определить корень уравнения с заданной точностью. Укажите недостатки рассмотренных методов.

```
1 /* решение методом Ньютона */
2 newton(f1, b, e):=
3 block(
4   define(f2(x),f1),
5   define(g(x), diff(f2(x), x)),
6   z: b + 2*e, c: b, it:0,
7   while abs(f(c)) > e do
8     (
9     z:c, c:c - f2(c)/g(c), it:it+1), [c,it])$
10  newton(f(x),b,e); /* результат */
```

## 1.6 Содержание отчета

- Цель работы;
- Задание на работу в соответствии с номером бригады;
- График исследуемой функции;
- Таблица результатов расчетов, значение корня  $x^*$  с точностью  $e = 10^{-3}$ ;
- Выводы по результатам расчетов;

## 1.7 Контрольные вопросы

1. Дать определение трансцендентного уравнения. Привести примеры подобных уравнений;
2. Пояснить принцип итерационного расчета корней трансцендентных уравнений;
3. Метод бисекции: суть метода, его достоинства и недостатки;
4. Дать комментарии к реализации метода бисекции в СКМ «Махіма»;
5. Метод хорд: суть метода, его достоинства и недостатки;
6. Дать комментарии к реализации метода хорд в СКМ «Махіма»;
7. Метод Ньютона: суть метода, его достоинства и недостатки;
8. Дать комментарии к реализации метода Ньютона в СКМ «Махіма»;
9. Перечислить основные характеристики итерационных методов и сравнить исследованные методы расчёта корней трансцендентных уравнений;

Лабораторная работа №2  
**РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЛОСКОГО ТРЕХСЛОЙНОГО  
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА**

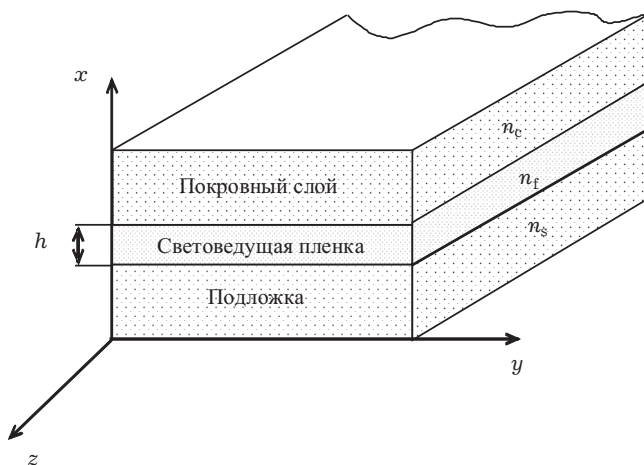
## 2.1 Цель работы

- Научиться применять численные методы поиска корней в программном пакете «Matha»;
- Получить навыки расчета дисперсионных характеристик мод плоского трехслойного оптического волновода;

## 2.2 Краткие теоретические сведения

### 2.2.1 Дисперсионное уравнение для волноводных мод плоского трехслойного диэлектрического волновода. Подход геометрической оптики

В лабораторной работе изучается методика расчета дисперсионных характеристик плоского трехслойного диэлектрического оптического волновода (световод показан на рис. 2.1).



**Рис. 2.1.**

Рассматриваемая структура состоит из трех диэлектрических слоев: волноведущей пленки с показателем преломления  $n_f$ , покровного слоя ( $n_c$ ) и подложки ( $n_s$ ). Для устранения межмодовой дисперсии пленка может иметь плавно изменяющийся показатель преломления  $n_f = n_f(x)$ . Согласно лучевой теории, в этом случае различные моды, имеющие неодинаковые фазовые скорости будут испытывать различные по величине рефракционные искривления траектории луча. Для возможности канализации излучения в центральном слое необходимо выполнение условия:  $n_f > n_c, n_s$ . В этом случае световая волна будет распространяться вдоль волноведущей пленки путем переотражений от границ раздела «пленка-покровный слой» и «пленка-подложка», где будет выполняться условие полного внутреннего отражения. Различные углы переотражений будут соответствовать различным типам собственных волн (модам). При этом необходимо выполнение условия фазового согласования:

$$k_0 n_f h \cos \theta - \psi_c - \psi_s = \pi \nu, \quad \nu = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.1)$$

где  $h$  – толщина волноведущей пленки,  $\theta$  – угол переотражения,  $\psi_c, \psi_s$  – сдвиги фаз при отражении световой волны от покровного слоя и подложки соответственно,  $\nu$  – индекс, определяющий порядковый номер моды. В формуле (2.1):

$$\psi_{c,s} = \arctg \frac{\sqrt{n_{c,s}^2 \sin^2 \theta - n_f^2}}{n_{c,s} \cos \theta}$$

– сдвиги фаз при отражении от границ раздела «пленка-покровный слой» и «пленка-подложка».

Из приведенного соотношения следует вывод, что в рассматриваемой световедущей структуре возможно распространение бесконечного числа мод, обладающих дискретными углами переотражения  $\theta$ .

В интегральной оптике принято при построении дисперсионных характеристик переходить к безразмерным нормированным величинам, аналогам волнового числа  $k_0$  и постоянной распространения  $\beta = k_0 n_f \sin \theta$  ( $k_0 = \omega/c$  – волновое число для вакуума). Обычно используют три нормированных параметра:

- $N = \beta/k_0 = n_f \sin \theta$  – эффективный волноводный показатель преломления;

- $V = k_0 h \sqrt{n_f^2 - n_s^2}$  – нормированная частота;
- $b = \frac{N^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}$  – нормированный эффективный волноводный показатель преломления.

Для описания степени асимметрии показателей преломления подложки и покровного слоя вводят параметр асимметрии:

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}. \quad (2.2)$$

При  $a = 0$  ( $n_c = n_s$ ) оптический волновод называется **симметричным**; при  $a \neq 0$  ( $n_c \neq n_s$ ) – **несимметричным**.

В результате введения нормированных параметров дисперсионное уравнение для плоского трехслойного оптического волновода (2.1) для случая постоянного показателя преломления световедущей пленки имеет вид:

$$V\sqrt{1-b} = \nu\pi + \arctg\sqrt{\frac{b}{1-b}} + \arctg\sqrt{\frac{b+a}{1-b}} \quad (2.3)$$

Частоты отсечек такого волновода определяются из соотношения:

$$V_\nu = \arctg\sqrt{a} + \nu\pi. \quad (2.4)$$

## 2.3 Домашнее задание

- Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями;
- Ознакомиться с соответствующими разделами из источников, представленных в методических указаниях к данной работе.

## 2.4 Задание на работу

Рассчитать дисперсионные характеристики мод плоского трехслойного оптического волновода. Показатели преломления и номера мод выбираются из таблицы 2.1 в соответствии с номером бригады.

Результаты расчета привести в виде графиков дисперсионных характеристик, а также в виде таблицы с приведенной постоянной распространения.

В таблице  $N_f$  – показатель преломления в середине световедущей пленки;  $N_c$  – показатель преломления покровного слоя;  $N_s$  – показатель преломления подложки.

Таблица 2.1. Варианты заданий на работу

п/п	$n_f$	$n_c$	$n_s$	$\nu$ (номер моды)
1	4.0	1.0	1.0	0,1,2
2	4.0	2.0	1.5	0,1,2
3	4.0	1.5	2.0	0,1,2
4	4.0	1.7	2.3	0,1,2
5	4.0	2.2	1.0	0,1,2
6	4.0	2.2	2.0	0,1,2

## 2.5 Порядок выполнения работы

### 2.5.1 Подготовительные операции

Перед выполнением лабораторной работы необходимо:

- запустить графический интерфейс «wxMaxima»;
- создать и сохранить файл рабочего листа «LabDh.wxm»;
- перейти в режим численных расчетов и организовать ввод заданных по варианту параметров  $n_f, n_c, n_s$  и  $\nu$  (см. таблицу 2.1), а также прочих параметров необходимых для моделирования:

```

1 numer:true$ /* численный режим */
2 fpprintprec:5$ /* число выводимых знаков */
3 nf:4.0$ /* показ. прел. световода */
4 nc:1.0$ /* показ. прел. прел. слоя
   */
5 ns:1.0$ /* показ. прел. подложки */
6 vmax:20.0$ /* максимальная частота */
7 vstp:1.0$ /* шаг расчета по частоте */
8 nmax:3$ /* максимальный номер моды */
9 eps:1e-5$ /* точность опред. корня */
10 kmax:40$ /* макс. число итераций */
11 /*интервал поиска нормированных частот*/
12 [bmin,bmax]:[0.0,0.999]$

```

- по формуле (2.2) вычислите параметр асимметрии  $a$ , критическую частоту  $\text{vmin}()$ , заданную как функция без аргументов, и задайте нормированное дисперсионное уравнение  $f(b)$ . Параметр  $b$  может изменяться в пределах от нуля до единицы.



```

1 a:abs((ns^2-nc^2)/(nf^2-ns^2))$
2 vmin():=%pi*nu+atan(sqrt(a))$
3 f(b):=v*sqrt(1-b)-%pi*nu-atan(sqrt(b/(1-b)))
   -atan(sqrt((b+a)/(1-b)))$

```

- также необходимо задать некоторые дополнительные функции:

```

1 /* добавление элемента в список */
2 add(x,list):=buildq([x,list],list:append(
   list,[x]))$
3 /* легенды для графиков */
4 legends():=
5 block([out],out:['legend'],
6   for i:0 thru nmax
7   do add(concat("nu=",i),out),out)$

```

## 2.5.2 Реализация метода хорд

```

1 chords(sp):=
2 block([a,b,c,k],
3 /* начальный интервал */
4 a:sp[1], b:sp[2],c:a,
5 /* номер итерации */
6 k:1,
7 /* вычислительный цикл */
8 while abs(f(c))>eps do
9 /* приближение к корню */
10 (c:(a-f(a)*(b-a)/(f(b)-f(a))),
11 /* выбор нового интервала */
12 (if f(a)*f(c)<0 then b:c else a:c),
13 /* увеличение номера итерации */
14 k:k+1,
15 /* превышение числа итераций */
16 (if k>kmax then
17   return((print("nu=", nu,"i=",i," - нет
   сходимости"),false))),
18 /* значения корня */
19 c)$

```

### 2.5.3 Реализация алгоритма расчета дисперсионных характеристик

```
1 dh_solve():=
2 (lines:[], /* линии на построение */
3 (for i:0 thru nmax do /* цикл по модам */
4 (nu:i, /* номер моды */
5 v:vmin(), /* норм. частота отсечки */
6 vlist:[vmin()], /* список частот */
7 blist:[0], /* список пост. распр. */
8 (while v<vmax do /* цикл по частотам */
9 (v:v+vstp, /* текущая частота */
10 b:chords([bmin,bmax]),
11 /* добавление элементов в списки */
12 add(v,vlist), add(b,blist))),
13 /* добавление моды на построение */
14 add(['discrete',vlist,blist],lines))))$
```

**Задание.** Реализуйте указанный алгоритм.

### 2.5.4 Функция вывода дисперсионных характеристик

```
1 dh_print(n):=
2 block([len,v,b],
3 v:lines[n+1][2], /* частоты */
4 b:lines[n+1][3], /* постоянные распротр. */
5 len:length(v), /* длина списков */
6 /* цикл печати */
7 for i:1 thru len do print(v[i], " ",b[i]), true
8 )$
```

### 2.5.5 Программа расчета

```
1 dh_solve(); /* запуск функции расчета */
2 plot2d(lines,[x,0,vmax], /* вывод ДХ */
3 [xlabel,"v",[ylabel,"b"],legends(),
4 [gnuplot_preamble,
5 "set grid;set key bottom;set title '
6 Дисперсионная характеристика'"]);
7 dh_print(0); /* печать таблицы ДХ */
```

**Задание.** Реализуйте указанный алгоритм. При помощи функции `dh_solve()` запустите программу расчета. Используя функцию `plot2d` получите графики дисперсионных кривых. Также необходимо вывести таблицу постоянной распространения, которую можно получить используя функцию `dh_print(n)`, где  $n$  – номер моды ( $n = 0, 1, 2$ ).

## 2.6 Содержание отчета

- Цель работы;
- Задание на работу в соответствии с номером бригады;
- График дисперсионных кривых;
- Таблица приведенной постоянной распространения;
- Выводы по результатам расчетов.

## 2.7 Контрольные вопросы

1. Понятие дисперсионной характеристики моды в оптическом волноводе;
2. Типы мод оптических волноводов;
3. Характеристики мод в оптическом волноводе: частота отсечки, частота, длина волны, постоянная распространения, фазовая скорость, групповая скорость;
4. Запредельный и одноволновый режимы работы оптического волновода;
5. Нормированные характеристики мод в оптическом волноводе;
6. Метод расчёта дисперсионных характеристик мод;
7. Использование СКМ «Maxima» для расчёта дисперсионных характеристик мод;
8. Принцип вычисления корней с помощью функции `plot2d`.

Лабораторная работа №3  
**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ  
ВОЛНОВОДОВ**

### 3.1 Цель работы

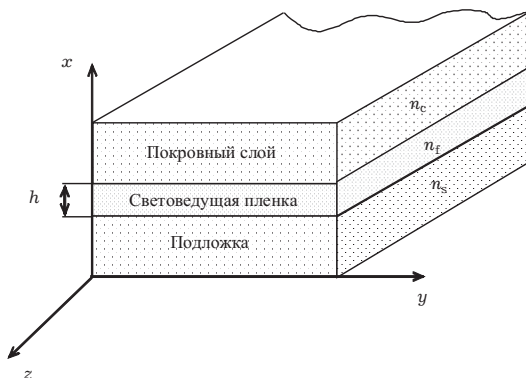
- Исследовать дисперсионные характеристики градиентных оптических волноводов с непрерывно изменяющимся показателем преломления;
- Исследовать распределения электрических полей мод градиентных оптических волноводов с непрерывно изменяющимся показателем преломления;

### 3.2 Краткие теоретические сведения

#### 3.2.1 Плоский трехслойный волновод с постоянной величиной показателя преломления световедущей пленки

В предлагаемой лабораторной работе производится электродинамический анализ плоского трехслойного диэлектрического оптического волновода (световод показан на рисунке 3.1).

Рассматриваемая структура состоит из трех диэлектрических слоев: волноведущей пленки с показателем преломления  $n_f$ , по-



**Рис. 3.1.**

кровного слоя ( $n_c$ ) и подложки ( $n_s$ ). Для устранения межмодовой дисперсии пленка может иметь плавно изменяющийся показатель преломления  $n_f = n_f(x)$ . Согласно лучевой теории, в этом случае различные моды, имеющие неодинаковые фазовые скорости будут испытывать различные по величине рефракционные искривления траектории луча.

Для возможности канализации излучения в центральном слое необходимо выполнение условия:  $n_f > n_c, n_s$ . В этом случае световая волна будет распространяться вдоль волноведущей пленки путем переотражений от границ раздела «пленка-покровный слой» и «пленка-подложка», где будет выполняться условие полного внутреннего отражения. Различные углы переотражений будут соответствовать различным типам собственных волн (модам). При этом необходимо выполнение условия фазового согласования:

$$kn_f h \cos \theta - \psi_c - \psi_s = \pi \nu, \quad \nu = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.1)$$

где  $h$  – толщина волноведущей пленки,  $\theta$  – угол переотражения,  $\psi_c, \psi_s$  – сдвиги фаз при отражении световой волны от покровного слоя и подложки соответственно,  $\nu$  – индекс, определяющий порядковый номер моды.

Из приведенного соотношения следует вывод, что в рассматриваемой световедущей структуре возможно распространение бесконечного числа мод, обладающих дискретными углами переотражения  $\theta$ .

В интегральной оптике принято при построении дисперсионных характеристик переходить к безразмерным нормированным величинам, аналогам волнового числа  $k$  и постоянной распространения  $\beta = k_0 n_f \sin \theta$  ( $k_0 = \omega/c$  – волновое число для вакуума). Обычно используют три нормированных параметра:  $N = \beta/k_0 = n_f \sin \theta$  – эффективный волноводный показатель преломления;  $V = k_0 h \sqrt{n_f^2 - n_s^2}$  – нормированная частота;  $b = \frac{N^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}$  – нормированный эффективный волноводный показатель преломления. Для описания степени несимметрии показателей преломления подложки и покровного слоя вводят параметр асимметрии:

$$a = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}. \quad (3.2)$$

В результате введения нормированных параметров дисперсионное уравнение для плоского трехслойного оптического волново-

да для случая неизменного показателя преломления волноведущей пленки имеет вид:

$$V\sqrt{1-b} = \nu\pi + \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{b}{1-b}} + \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{b+a}{1-b}}. \quad (3.3)$$

Частоты отсечек такого волновода определяются из соотношения:

$$V_\nu = \operatorname{arctg}\sqrt{a} + \nu\pi. \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Плоский трехслойный волновод с показателем преломления световедущей пленки, изменяющимся по параболическому закону

Некоторые технологические процессы, такие как диффузия и ионная имплантация, приводят к тому, что волноведущий слой оптического волновода имеет показатель преломления, который плавно изменяется вдоль некоторого поперечного направления. Такая структура обеспечивает периодическую фокусировку светового пучка в центральной (осевой) части волновода.

Одним из примеров такого плавноизменяющегося профиля является квадратичная среда (профиль соответствующий ей называется параболическим). Зависимость диэлектрической проницаемость световедущего слоя от координаты  $x$  имеет вид:

$$n^2(x) = n_f^2 \left( 1 - \frac{x^2}{x_0^2} \right), \quad (3.5)$$

где  $n_f$  – максимальное значение показателя преломления в центре волновода;  $2x_0 = h$ .

В этом случае зависимость нормированного эффективного показателя преломления от волнового числа  $k_0 = \omega/c$  ( $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость света) имеет вид:

$$N_\nu^2 = n_f^2 - (\nu + 1/2) \frac{2n_f}{k_0 x_0}. \quad (3.6)$$

Переходя к нормированной частоте  $V$ , приходим к следующему дисперсионному уравнению:

$$b = 1 - \frac{4(\nu + 1/2)n_f}{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}. \quad (3.7)$$

Частоты отсечек определяются из выражения:

$$V_\nu = \frac{4n_f(\nu + 1/2)}{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}. \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Плоский трехслойный волновод с показателем преломления световедущей пленки, изменяющимся по закону $1/ch^2(x)$

Закон изменения показателя преломления в данном случае имеет вид:

$$n^2(x) = n_s^2 + \frac{2n_s(n_f - n_s)}{\text{ch}^2(2x/h)}. \quad (3.9)$$

В этом случае зависимость нормированного эффективного показателя преломления от волнового числа  $k_0$  имеет вид:

$$N_\nu^2 = n_s^2 + \frac{4}{k_0^2 h^2} \left( \frac{1}{2} \sqrt{1 + V^2} - 1 - \nu \right)^2, \quad (3.10)$$

где  $V = k_0 h \sqrt{2n_s(n_f - n_s)}$ .

Дисперсионное уравнение в нормированных величинах может быть записано в следующем виде:

$$b = \frac{N_\nu^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} = \frac{8n_s \left[ \frac{1}{2} (\sqrt{1 + V^2} - 1) - \nu \right]^2}{V^2(n_f + n_s)}. \quad (3.11)$$

Частоты отсечек определяются из соотношения:

$$V_\nu = 2\sqrt{\nu(\nu + 1)}. \quad (3.12)$$

### 3.2.4 Межмодовая дисперсия

Вследствие явления полного внутреннего отражения на поверхностях раздела «пленка-подложка» и «пленка-покровный слой» область распространения света оказывается ограниченной. В ней распространяется большое число мод, образуемых лучами с различными углами падения на поверхности раздела, удовлетворяющими условию полного внутреннего отражения. Поскольку длина лучей, соответствующих различным модам, разная, время прохождения световой энергии, переносимой различными модами будет различным. Поэтому передаваемые по волноводу сигналы всегда будут

искажаться. Если на вход световода подать короткий импульс, переносимый совокупностью различных мод, на его выходе либо происходит уширение входного импульса, либо вместо одного импульса наблюдается серия их. Описанное явление называется межмодовой дисперсией.

Для ее устранения у световедущей пленки делают плавно изменяющимся показатель преломления  $n(x)$ , где  $x$  – поперечная координата. Показатель преломления, как правило, постепенно убывает от максимального значения в середине пленки до минимальных значений на границах её раздела с подложкой и покровным слоем. Плоские оптические волноводы такого типа называются градиентными или световодами с плавно изменяющимся профилем показателя преломления. Согласно геометрической оптике, в этом случае различные моды, имеющие неодинаковые фазовые скорости будут испытывать различные рефракционные искривления траекторий лучей их образующих, что приводит к их периодической самофокусировке (рисунок 3.2). Лучи, введенные в градиентный волновод под малыми углами к его оси, рефрагируют слабо. Если луч вводится под большим углом, то при распространении световой энергии вдоль волновода он будет испытывать большое рефракционное искривление. Геометрическая длина пути распространяющегося света вдоль сильно искривлённого луча, естественно, больше, но оптическая длина пути за счет того, что значительная часть пути луча находится в оптически менее плотной среде, оказывается близкой оптическому пути вдоль слабо искривленного луча. В результате межмодовая дисперсия уменьшается. В этом случае удается уравнивать времена распространения световой энергии вдоль лучей, падающих на торец под различными углами, при помощи выбора необходимого закона  $n(x)$ . Как показывают расче-

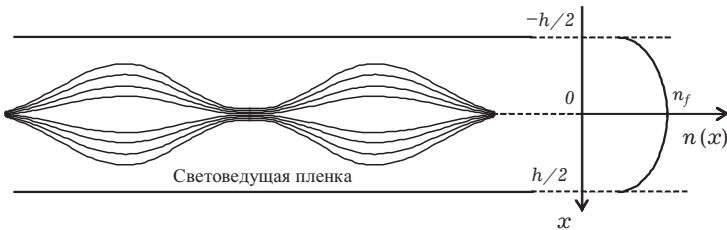


Рис. 3.2.



ты, это достигается у волноводов, в которых профиль показателя преломления описывается квадратичной функцией или функцией вида  $1/\text{ch}^2(x)$  (функция Пешля-Теллера). Кроме этого, использование градиентных пленок позволяет концентрировать передаваемую энергию вблизи плоскости симметрии пленки, что, в свою очередь, уменьшает величину потерь на границах раздела «пленка-подложка» и «пленка-покровный слой». На практике для изготовления пленок с плавно изменяющимся профилем показателя преломления применяют методы диффузии и ионной имплантации.

### 3.3 Домашнее задание

- Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями;
- Ознакомиться с соответствующими разделами из источников, представленных в методических указаниях к данной работе.

### 3.4 Задание на работу

**Таблица 3.1.** Варианты заданий

п/п	$n_f$	$n_c$	$n_s$	номер моды	Тип поляризации
1	4.0	1.0	1.0	0,1,2	ТЕ
2	4.0	2.0	1.5	0,1,2	ТЕ
3	4.0	1.5	2.0	0,1,2	ТЕ
4	4.0	1.7	2.3	0,1,2	ТЕ
5	4.0	2.2	1.0	0,1,2	ТЕ
6	4.0	2.2	2.0	0,1,2	ТЕ

В таблице  $n_f$  – показатель преломления в середине световедущей пленки;  $n_c$  – показатель преломления покровного слоя;  $n_s$  – показатель преломления подложки.

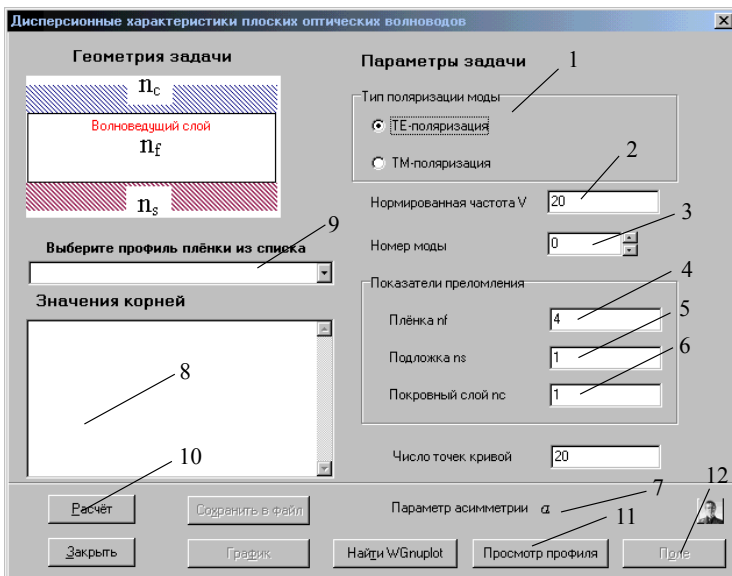


Рис. 3.3. Интерфейс программы «LabWork»

## 3.5 Порядок выполнения работы

### 3.5.1 Подготовительные операции

Для выполнения лабораторной работы, необходимо изучить интерфейс программы, показанный на рисунке 3.3.

1. Выбор типа поляризации собственной волны
2. Предел изменения частоты световой волны
3. Выбор номера моды
4. Показатель преломления световедущей пленки
5. Показатель преломления подложки
6. Показатель преломления покровного слоя
7. Величина параметра асимметрии волноведущей структуры
8. Список, отображающий значения нормированных частот  $V$  (1 столбец) и соответствующих им постоянных распространения  $\mathbf{b}$  (2 столбец). Используя данные этого списка производится построение дисперсионных характеристик.
9. Выбор профиля показателя преломления волноведущей пленки:

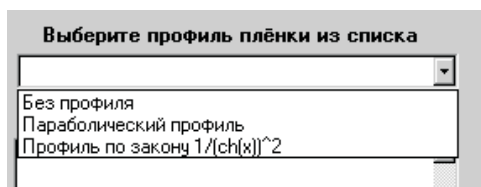


Рис. 3.4. Выбор вида профиля показателя преломления

10. Кнопка **РАСЧЕТ**. При нажатии происходит расчет дисперсионной характеристики при заданных параметрах и полученные значения выводятся в список 8.
11. Кнопка **ПРОСМОТР ПРОФИЛЯ**. При нажатии на экране монитора отображается график, определяющий зависимость показателя преломления от поперечной координаты  $x$ .

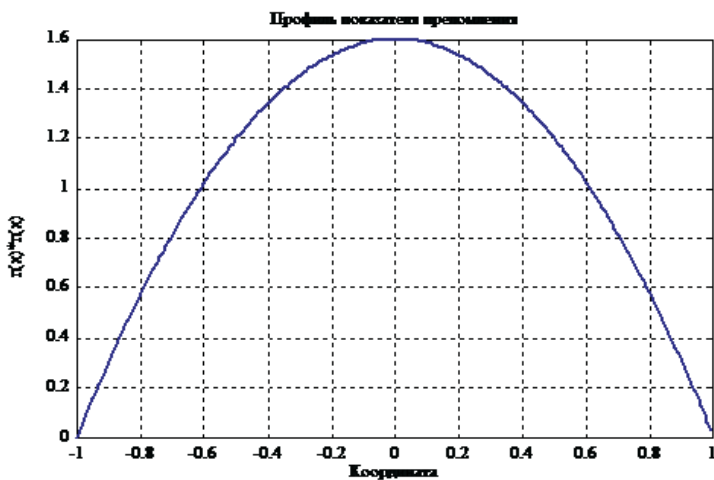


Рис. 3.5. Пример профиля показателя преломления

12. Кнопка **ПОЛЕ**. При нажатии на экране отображается график, иллюстрирующий зависимость компоненты электрического поля  $E_y$  от поперечной координаты  $x$  для заданного профиля показателя преломления и выбранной моды.

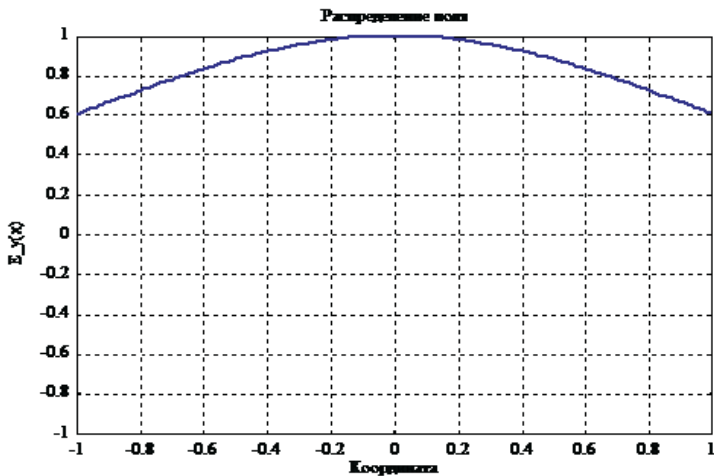


Рис. 3.6. Пример распределения электрического поля моды

### Упражнение 1. Исследование дисперсионных характеристик плоского оптического волновода с постоянным показателем преломления волноведущего слоя

Геометрия оптического волновода показана на рисунке 3.7.



Рис. 3.7.

Для выполнения упражнения выберите в выпадающем списке значение *Без профиля*.

1. Для указанных параметров геометрии задачи (см. таблицу) построить дисперсионные характеристики (зависимости  $b(V)$ ) для

первых четырех типов собственных волн. Определить по графикам частоты отсечек данных мод и найти частотный диапазон одноволновости (интервал  $\Delta V$  между частотами отсечек нулевой и первой мод).

2. Построить зависимость показателя преломления от поперечной координаты.

**В отчете** должны присутствовать четыре графика, отображающие дисперсионные характеристики для необходимых типов мод, значения частот отсечек и частотный интервал одноволнового режима.

### Упражнение 2. Исследование дисперсионных характеристик плоского оптического волновода с профилем показателя преломления световедущей пленки изменяющимся по параболическому закону

Геометрия оптического волновода показана на рисунке 3.8.



Рис. 3.8.

Для выполнения упражнения выберите в выпадающем списке значение **Параболический профиль**.

1. Для указанных параметров геометрии задачи (см. таблицу) построить дисперсионные характеристики (зависимости  $b(V)$ ) для первых четырех типов мод. Определить по графикам частоты отсечек данных мод и найти частотный диапазон одноволновости (интервал  $\Delta V$  между частотами отсечек нулевой и первой мод).
2. Построить зависимость показателя преломления от поперечной координаты. (Для этого нажмите кнопку **ПРОСМОТР ПРОФИЛЯ**).

3. Построить распределения полей первых четырех типов мод. (Для этого нажмите кнопку **ПОЛЕ**.)

**Отчет** должен содержать четыре графика, отображающие дисперсионные характеристики для указанных типов собственных волн, значения частот отсечек и величину диапазона одноволновости. Необходимо построить распределения полей вдоль поперечной координаты  $x$  для мод с индексами  $n = 0, 1, 2, 3$ .

**Упражнение 3. Исследование дисперсионных характеристик плоского оптического волновода с профилем показателя преломления световедущей пленки изменяющимся по закону  $1/ch^2(x)$**

Геометрия оптического волновода показана на рисунке 3.9.



**Рис. 3.9.**

Для выполнения упражнения выберите в выпадающем списке значение *профиль по закону Пешля-Теллера*.

1. Для указанных параметров геометрии задачи (см. таблицу) построить дисперсионные характеристики (зависимости  $b(V)$ ) для первых четырех типов мод. Определить по графикам частоты отсечек данных мод и найти частотный диапазон одноволновости (интервал  $\Delta V$  между частотами отсечек нулевой и первой мод).
2. Построить зависимость показателя преломления от поперечной координаты. (Для этого нажмите кнопку **ПРОСМОТР ПРОФИЛЯ**).

3. Построить распределения полей первых четырех типов мод. (Для этого нажмите кнопку **ПОЛЕ**.)

**Отчет** должен содержать четыре графика, отображающие дисперсионные характеристики для указанных типов собственных волн, значения частот отсечек и величину диапазона одноволновости. Необходимо построить распределения полей вдоль поперечной координаты  $x$  для мод с индексами  $n = 0, 1, 2, 3$ .

**Значения параметров, используемых при расчетах:**

- Нормированная частота – предел расчета дисперсионных характеристик по частоте  $V = 20.0$ ;
- Число точек кривой – число точек по нормированной частоте  $V$ , в которых производится расчет  $N = 20$ ;

### 3.6 Содержание отчета

- Цель работы;
- Задание на работу в соответствии с номером бригады;
- Исходные данные для расчета;
- Таблицы результатов расчета;
- Графики результатов расчета;
- Выводы по результатам расчета;

### 3.7 Контрольные вопросы

1. Механизм распространение электромагнитных волн в оптическом волноводе;
2. Характеристики волн в оптических волноводах;
3. Типы поляризации волн в оптических волноводах;
4. Понятие рефракции в неоднородной среде;
5. Межмодовая дисперсия;
6. Подавление межмодовой дисперсии в градиентных световодах;
7. Оптический волновод с параболическим профилем показателя преломления;
8. Оптический волновод с профилем показателя преломления по закону  $1/ch^2(x)$ ;
9. Оптический волновод с экспоненциальным профилем показателя преломления;
10. Способы изготовления градиентных оптических волноводов.

Лабораторная работа №4  
**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
СОБСТВЕННЫХ ВОЛН  
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ**

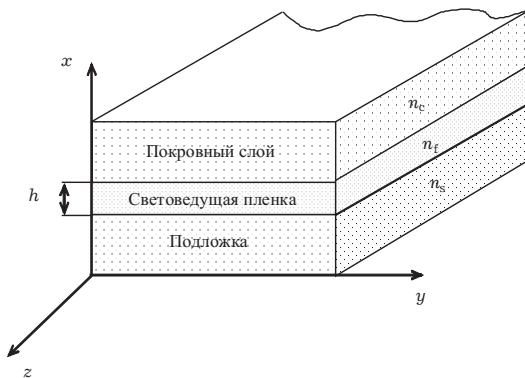
## 4.1 Цель работы

- Получение навыков расчёта дисперсионных характеристик плоских трёхслойных оптических волноводов при помощи программного пакета «wxMaxima».

## 4.2 Краткие теоретические сведения

### 4.2.1 Плоский трёхслойный волновод с постоянной величиной показателя преломления световедущей пленки

В предлагаемой лабораторной работе производится электродинамический анализ плоского трехслойного диэлектрического оптического волновода (световод показан на рис. 4.1).



**Рис. 4.1.**

Рассматриваемая структура состоит из трех диэлектрических слоев: волноведущей пленки с показателем преломления  $n_f$ , покровного слоя ( $n_c$ ) и подложки ( $n_s$ ). Рассмотрим электродинамическую теорию плоского трехслойного оптического волновода, базирующуюся на использовании уравнений Максвелла.



Обозначим через  $\varepsilon^{(j)}$ ,  $\mu^{(j)}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) относительные диэлектрические и магнитные проницаемости подложки, световедущей пленки и покровного слоя, соответственно. Будем решать задачу при следующих допущениях:

- Показатель преломления световедущей пленки  $n_f$  является постоянным и не зависит от поперечной координаты  $x$ .
- Будем считать, что волноведущая структура является неограниченной вдоль оси  $Oy$ .
- Будем считать, что составляющие векторов электромагнитного поля в покровном слое и подложке экспоненциально уменьшаются по закону  $\exp(-\alpha|x|)$ , где  $\alpha$  – положительный коэффициент.

В плоском трехслойном оптическом волноводе возможно распространение двух типов собственных волн (волноводных мод):

- ТЕ (поперечно-электрические волны), у которых присутствует продольная составляющая вектора напряженности магнитного поля  $H_z$ , а также компоненты  $H_x$  и  $E_y$ ;
- ТМ (поперечно-магнитные волны), у которых присутствует продольная составляющая вектора напряженности электрического поля  $E_z$ , а также компоненты  $E_x$  и  $H_y$ .

Как будет показано ниже, анализ для ТЕ и ТМ-мод может производиться раздельно друг от друга. Будем представлять комплексные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей распространяющихся волн в следующем виде:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(x, y, z) &= \mathbf{e}(x, y)e^{i\beta z}, \\ \mathbf{H}(x, y, z) &= \mathbf{h}(x, y)e^{i\beta z},\end{aligned}\tag{4.1}$$

где  $\mathbf{e}(x, y)$  и  $\mathbf{h}(x, y)$  – функции, определяющие электрическое и магнитное поля в поперечной плоскости волновода;  $\beta$  – постоянная распространения какой-либо волноводной моды.

Запишем уравнения Максвелла для электромагнитного поля в произвольном диэлектрическом слое волновода:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -ik_0\mu\mathbf{H}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = ik_0\varepsilon\mathbf{E},\tag{4.2}$$

где  $\varepsilon$  и  $\mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости слоя;  $k_0 = \omega/c$  – волновое число для вакуума.

Записывая (4.2) в проекциях на оси декартовой системы координат, с учетом принятых допущений получаем две системы уравнений:

$$\begin{aligned} \beta e_y &= k_0 \mu h_x, \\ \frac{\partial e_y}{\partial x} &= -i k_0 \mu h_z, \\ i \beta h_x - \frac{\partial h_z}{\partial x} &= i k_0 \varepsilon e_y, \end{aligned} \quad (4.3)$$

которая описывает электромагнитное поле ТЕ-мод и

$$\begin{aligned} -\beta h_y &= k_0 \varepsilon e_x, \\ \frac{\partial h_y}{\partial x} &= i k_0 \varepsilon e_z, \\ i \beta h_x - \frac{\partial e_z}{\partial x} &= -i k_0 \mu h_y, \end{aligned} \quad (4.4)$$

которая описывает электромагнитное поле ТМ-мод.

#### 4.2.2 Дисперсионное уравнение для ТЕ-мод плоского трехслойного волновода

Рассмотрим сначала систему уравнений (4.3), которая описывает электромагнитное поле ТЕ-моды. Выражая из первых двух уравнений системы (4.3) составляющие  $h_x$  и  $h_z$ , и подставляя эти выражения в третье уравнение из (4.3), получаем однородное уравнение Гельмгольца для составляющей  $e_y$ :

$$\frac{d^2 e_y}{dx^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] e_y = 0, \quad (4.5)$$

где  $n = \sqrt{\varepsilon \mu}$  – показатель преломления слоя.

Тангенциальная составляющая  $h_z$  определяется из следующего соотношения:

$$h_z = \frac{i}{k_0 \mu} \frac{de_y}{dx}. \quad (4.6)$$

Получим дисперсионное уравнение для ТЕ-мод. Запишем решение уравнения Гельмгольца (4.5) для подложки, световедущей пленки и покровного слоя волновода, показанного на рис. 4.1.

В области 1 (подложка) решение уравнения (4.5) является экспоненциально затухающим:

$$e_y^{(1)} = A e^{r x}, x < -h, \quad (4.7)$$

где  $r = \sqrt{k_0^2 n_s^2 - \beta^2}$ ,  $A$  – неизвестная постоянная.

Составляющая  $h_z^{(1)}$  определяется из уравнения (4.6):

$$h_z^{(1)} = \frac{ir}{k_0 \mu_1} A e^{rx}. \quad (4.8)$$

В области 2 (световедущая пленка) решение уравнения (4.5) представляет собой распространяющуюся волну:

$$e_y^{(2)} = B \cos(qx) + C \sin(qx), \quad -h < x < 0, \quad (4.9)$$

где  $q = \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2}$ ,  $B$  и  $C$  – неизвестные постоянные.

Составляющая  $h_z^{(2)}$  определяется из уравнения (4.6):

$$h_z^{(2)} = \frac{iq}{k_0 \mu_2} [-B \sin(qx) + C \cos(qx)]. \quad (4.10)$$

В области 3 (покровный слой) решение уравнения (4.5) является экспоненциально затухающим:

$$e_y^{(3)} = D e^{-px}, \quad x > 0, \quad (4.11)$$

где  $p = \sqrt{k_0^2 n_c^2 - \beta^2}$ ,  $D$  – неизвестная постоянная.

Составляющая  $h_z^{(3)}$  определяется из уравнения (4.6):

$$h_z^{(3)} = -\frac{ip}{k_0 \mu_3} D e^{-px}. \quad (4.12)$$

Воспользуемся граничными условиями, заключающимися в непрерывности тангенциальных составляющих векторов напряжённости электрического и магнитного полей на границе раздела двух диэлектрических сред:

$$\begin{aligned} e_y^{(2)} &= e_y^{(3)}, \quad h_z^{(2)} = h_z^{(3)}(x=0), \\ e_y^{(2)} &= e_y^{(1)}, \quad h_z^{(2)} = h_z^{(1)}(x=-h). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Подставляя в граничные условия (4.13) явные выражения для составляющих (4.7)-(4.12), приходим к системе алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов:

$$\begin{aligned} B &= D, \\ \frac{q}{k_0 \mu_2} C &= -\frac{p}{k_0 \mu_3} D, \\ A e^{rh} &= B \cos(qh) - C \sin(qh), \\ -\frac{r}{k_0 \mu_1} A e^{rh} &= \frac{q}{k_0 \mu_2} [B \sin(qh) + C \cos(qh)]. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Равенство нулю определителя системы уравнений (4.14) соответствует дисперсионному уравнению для ТЕ-мод плоского трёхслойного оптического волновода:

$$\operatorname{tg}(qh) = \frac{q\mu_2 [p\mu_1 + r\mu_3]}{pr\mu_2^2 - q^2\mu_1\mu_3}. \quad (4.15)$$

На практике слои волновода изготавливаются из немагнитных диэлектриков, у которых  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ . В этом случае дисперсионное уравнение (4.15) упрощается:

$$\operatorname{tg}(qh) = \frac{q[p+r]}{pr - q^2}. \quad (4.16)$$

Уравнение (4.16) выражает связь  $\beta = \beta(k_0)$ . Однако явным образом из него эту зависимость получить нельзя и дисперсионное уравнение (4.16) может быть решено только численно. Различные корни решения соответствуют разным ТЕ-модам.

#### 4.2.3 Дисперсионное уравнение для ТМ-мод плоского трехслойного волновода

Дисперсионное уравнение для ТМ-мод получается аналогичным образом с использованием системы уравнений (4.4). Однако его можно записать автоматически, исходя из уравнения (4.15) для ТЕ-мод. Для этого воспользуемся принципом перестановочной двойственности и в уравнении (4.15) произведем замену:

$$\mu_j \rightarrow -\varepsilon_j \quad (j = 1, 2, 3).$$

Дисперсионное уравнение для ТМ-мод имеет следующий вид:

$$\operatorname{tg}(qh) = \frac{q\varepsilon_2 [p\varepsilon_1 + r\varepsilon_3]}{pr\varepsilon_2^2 - q^2\varepsilon_1\varepsilon_3}. \quad (4.17)$$

Следует учесть, что  $n = \sqrt{\varepsilon}$ , поэтому  $\varepsilon_2 = n_f^2, \varepsilon_1 = n_s^2, \varepsilon_3 = n_c^2$ .

#### 4.2.4 Дисперсионное уравнение для ТЕ и ТМ-мод плоского трехслойного волновода в нормированном виде

Дисперсионная характеристика представляет собой график зависимости  $\beta = \beta(k_0)$ . Однако, как видно из уравнений (4.16) и

(4.17) данную зависимость в явном виде получить не представляется возможным. Поэтому дисперсионное уравнение для собственных волн регулярной линии передачи можно записать следующим образом:

$$F(\beta, k_0) = 0, \quad (4.18)$$

которое в общем случае является трансцендентным и может быть решено только численными методами.

На первом этапе производится переход от величин  $\beta$  и  $k_0$ , имеющих размерность  $1/\text{м}$  к безразмерным параметрам. Будем использовать два нормированных параметра:

$V = k_0 h$  – нормированная ширина волновода;  $\Gamma = (\beta/k_0)^2$  – нормированная постоянная распространения.

Используя новые нормированные параметры, несложно переписать уравнение (4.16) для ТЕ-мод в следующем виде:

$$\text{tg} \left( V \sqrt{n_f^2 - \Gamma} \right) = \frac{\sqrt{n_f^2 - \Gamma} \left[ \sqrt{n_s^2 - \Gamma} + \sqrt{n_c^2 - \Gamma} \right]}{n_f^2 - \Gamma - \sqrt{n_s^2 - \Gamma} \sqrt{n_c^2 - \Gamma}}. \quad (4.19)$$

В нормированных переменных дисперсионное уравнение имеет вид:

$$F(\Gamma, V) = 0. \quad (4.20)$$

Уравнение для частот отсечек для ТЕ-мод несложно получить из (4.19) при  $\Gamma = 0$ :

$$\text{tg}(V n_f) = \frac{n_f [n_s + n_c]}{n_f^2 - n_s n_c}. \quad (4.21)$$

Путем численного решения уравнения (4.21) определяются его корни  $V$ , соответствующие частотам отсечек ТЕ-мод. Первый корень является нормированной частотой отсечки нулевой ТЕ-моды, второй корень – первой ТЕ-моды и т.д. Аналогично несложно записать дисперсионное уравнение для ТМ-мод (4.17) в нормированном виде:

$$\text{tg} \left( V \sqrt{n_f^2 - \Gamma} \right) = \frac{\varepsilon_2 \sqrt{n_f^2 - \Gamma} \left[ \varepsilon_1 \sqrt{n_s^2 - \Gamma} + \varepsilon_3 \sqrt{n_c^2 - \Gamma} \right]}{\varepsilon_2^2 (n_f^2 - \Gamma) - \varepsilon_1 \varepsilon_3 \sqrt{n_s^2 - \Gamma} \sqrt{n_c^2 - \Gamma}}. \quad (4.22)$$

Нормированные частоты отсечек ТМ-мод определяются из следующего соотношения, которое получается из (4.22) при  $\Gamma = 0$ :

$$\operatorname{tg}(Vn_f) = \frac{\varepsilon_2 n_f [\varepsilon_1 n_s + \varepsilon_3 n_c]}{\varepsilon_2^2 n_f^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_3 n_s n_c}. \quad (4.23)$$

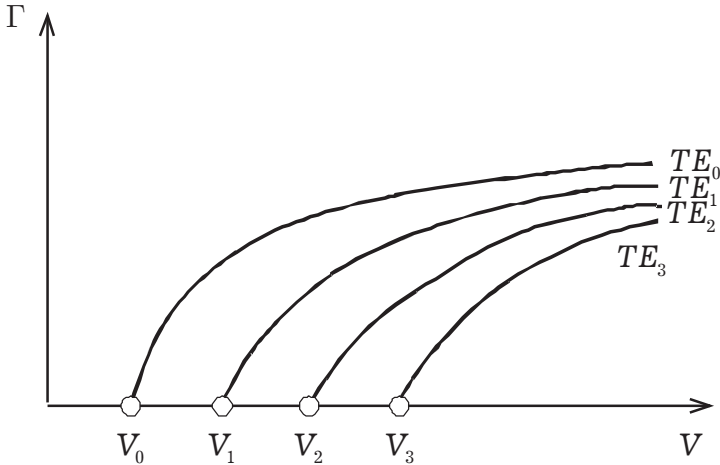
#### 4.2.5 Алгоритм расчета дисперсионных характеристик плоского трехслойного оптического волновода

Рассмотрим алгоритм расчета дисперсионных характеристик плоского трехслойного оптического волновода на примере ТЕ-мод.

На первом этапе при выбранных параметрах  $n_s$ ,  $n_c$  и  $n_f$  путем численного решения уравнения (4.21) определяются нормированные частоты отсечек  $V_n$ . Для решения уравнения (4.21) может использоваться любой итерационный метод нахождения корней (метод бисекции, метод хорд, метод секущих и т.д.). Уравнение (4.21) имеет бесконечное число корней  $V_n$ , каждый из которых определяет частоту отсечки ТЕ-моды с индексом  $n$  (порядковый номер корня). Самый минимальный по значению корень соответствует частоте отсечки нулевой (основной) ТЕ-моды.

На втором этапе при различных значениях нормированной частоты  $V$  численно решается уравнение (4.19) и определяются его корни  $\Gamma$ . Расчет необходимо начинать с нормированной частоты  $V$ , равной частоте отсечки нулевой моды  $V_0$ , которая была рассчитана на первом этапе. Очевидно, что при  $V_0 < V < V_1$  уравнение (4.19) будет иметь один корень, соответствующий нормированной постоянной распространения нулевой ТЕ-моды. При  $V_1 < V < V_2$  уравнение (4.19) будет иметь уже два корня, больший по значению из которых соответствует нулевой моде, а меньший – первой. При  $V_2 < V < V_3$  уравнение (4.19) будет иметь три корня и т.д.

Таким образом, для каждой частоты  $V$  путем численного решения уравнения (4.19) определяется набор корней  $\Gamma_p$  ( $p = 0, 1, \dots$ ), каждый из которых соответствует собственной волне  $TE_{N-p}$  ( $N$  – общее число корней на частоте). В результате строится график функции  $\Gamma = \Gamma(V)$ , которая имеет несколько ветвей, соответствующих различным собственным волнам. Примерный вид дисперсионной характеристики представлен на рис. 4.2. По оси абсцисс отложены значения нормированной частоты  $V$ , а по оси ординат – соответствующие им значения нормированной постоянной распространения  $\Gamma$ . Кружками отмечены частоты отсечек собственных волн (рис. 4.2).



**Рис. 4.2.** Типичный вид дисперсионной характеристики

Для построения дисперсионных характеристик ТМ-мод необходимо численно решать уравнение (4.22), предварительно перейдя в нем к нормированным переменным. Частоты отсечек ТМ-мод определяются путем решения уравнения (4.23).

Алгоритм расчета дисперсионных характеристик ТМ-мод плоского трехслойного оптического волновода аналогичен рассмотренному выше случаю ТЕ-мод. Ниже рассматриваются возможности СКМ «Махіта» для расчета дисперсионных характеристик плоских оптических волноводов в автоматическом режиме.

### 4.3 Домашнее задание

- Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями;
- Ознакомиться с соответствующими разделами из источников, представленных в методических указаниях к данной работе.

### 4.4 Задание на работу

Рассчитать дисперсионные характеристики мод плоского трехслойного оптического волновода. Показатели преломления и номера мод выбираются из таблицы 4.1 в соответствии с номером брига-

ды. Результаты расчета привести в виде графиков дисперсионных характеристик, а также в виде таблицы с приведенной постоянной распространения.

**Таблица 4.1.** Варианты заданий

п/п	$n_f$	$n_c$	$n_s$	$\varepsilon_f$	$\varepsilon_c$	$\varepsilon_s$	Тип моды
1	4	3.2	3.6	-	-	-	ТЕ (n=0,1,2)
2	4	3.2	3.6	$n_f^2$	$n_c^2$	$n_s^2$	ТМ (n=0,1,2)
3	3	2.5	2.5	-	-	-	ТЕ (n=0,1,2)
4	3	2.5	2.5	$n_f^2$	$n_c^2$	$n_s^2$	ТМ (n=0,1,2)
5	3.8	3.3	3.5	-	-	-	ТЕ (n=0,1,2)
6	3.8	3.3	3.5	$n_f^2$	$n_c^2$	$n_s^2$	ТМ (n=0,1,2)
7	4.2	4.0	4.0	-	-	-	ТЕ (n=0,1,2)
7	4.2	4.0	4.0	$n_f^2$	$n_c^2$	$n_s^2$	ТМ (n=0,1,2)

## 4.5 Порядок выполнения работы

### 4.5.1 Подготовительные операции

Перед выполнением лабораторной работы необходимо:

- запустить графический интерфейс «wxMaxima»;
- создать и сохранить файл рабочего листа «Lab-dh-ed.wxm».

### 4.5.2 Параметры моделирования

```

1 kill(all)$ /* удаление определений */
2 numer:true$ /* численный режим */
3 fpprintprec:5$ /* число выводимых знаков */
4 /* показатели преломления: */
5 nf:4$ /* волноведущий слой */
6 ns:1$ /* подложка */
7 nc:3.4 /* покровный слой */
8 eps:1e-6$ /* точность определения корня */
9 kmax:40$ /* максимальное число итераций */
10 /* интервал поиска корней */
11 [bmin,bmax]:[0.0,0.999]$

```



### 4.5.3 Вычисляемые параметры

```
1 /* параметр асимметрии */
2 a:abs((ns^2-nc^2)/(nf^2-ns^2))$
3 /* дисперсионное уравнение */
4 de(b,v):=
5 block([pf,ps,pc],
6 pf:sqrt(1-b), ps:sqrt(b), pc:sqrt(a+b),
7 (pf*pf-pc*ps)*sin(v*pf)-pf*(ps+pc)*cos(v+pf))$
```

### 4.5.4 Функции реализации

```
1 /* макрос для добавления элемента в список */
2 add(x,list):=buildq([x,list],list:append(list
3 ,[x]))$
4 /* легенды для графиков */
5 legends(nmax):=
6 block([out],out:['legend'],
7 for i:0 thru nmax
8 do add(concat("nu=",i),out),out)$
```

### 4.5.5 Реализация метода хорд

```
1 chords(sp):=
2 block([a,b,c,k],
3 /* начальный интервал */
4 a:sp[1],b:sp[2],c:a,
5 k:1, /* номер итерации */
6 /* вычислительный цикл */
7 while abs(f(c))>eps do
8 /* приближение к корню */
9 (c:(a-f(a)*(b-a)/(f(b)-f(a))),
10 /* выбор нового корня */
11 (if f(a)*f(c)<0 then b:c else a:c),
12 k:k+1, /* увеличение номера итерации */
13 /* превышение числа итераций */
14 (if k>kmax then
15 return((print("nu=",nu,"i=",i,"нет сходимости"
16 ),false))),
17 /* значение корня */
18 c)$
```

#### 4.5.6 Определение границ интервалов локализации корня

```
1 schange(pmin, pmax, pstp) :=
2 block([out, p1, p2],
3 out: [], /* список интервалов */
4 p1: 0, p2: p1 + pstp, /* границы интервалов */
5 while p2 < pmax do /* цикл по частоте */
6 (
7 if f(p1) * f(p2) <= 0 /* условие наличия корня */
8 /* внесения интервала в список */
9 then add([p1, p2], out),
10 /* смена границ интервала */
11 p1: p2, p2: p2 + pstp), out)$
```

#### 4.5.7 Определение всех корней диапазона

```
1 roots(pmin, pmax, pstp) :=
2 block([ln, sp, out],
3 /* список интервалов */
4 sp: schange(pmin, pmax, pstp),
5 ln: length(sp), /* число интервалов */
6 out: [], /* список корней */
7 for i: 1 thru ln do /* цикл по интервалам */
8 /* внесение корня в список */
9 add(chords(sp[i]), out), out)$
```

#### 4.5.8 Определение частот отсечек

```
1 f(v) := de(0.0, v)$ /* уравнение крит. частот */
2 vstp: 0.1$ /* шаг расчета по частоте */
3 /* вычисление крит. частот */
4 vcr: roots(0, 16.5, vstp);
```

Вычисление частот отсечек `roots(vmin, vmax, vstp)` позволяет определить частотный диапазон расчета корней исходя из условия, что  $vmin < vcr\_n$ , где  $vcr\_n$  – частота отсечки моды с индексом  $n =$  минимальная и максимальная расчетные частоты равны:

```
1 vmin: 0.1$ vmax: 13.0$
```

#### 4.5.9 Определение корней дисперсионного уравнения

```
1 v:vmin$          /* текущая частота */
2 f(b):=de(b,v)$  /* уравнение */
3 bstp:0.01$      /* шаг по b */
4 /* вычисление постоянных распространения */
5 v:0.97$ roots(bmin,bmax,bstp);
```

#### 4.5.10 Расчет дисперсионных характеристик

```
1 dh_solve():=
2 block([fcnt,mcnt,rcnt,rts,nfreqs],
3 lines:[], /* линии на построение */
4 dh_roots:[], /* список для хранения корней */
5 v:vmin, /* минимальная частота */
6 nfreqs:[], /* список норм. частот */
7 (while v<vmax /* цикл по частотам */
8 (
9 /* определение постоянных распространения */
10 b:roots(bmin,bmax,bstp),
11 add(v,nfreqs), /* добавление частот */
12 /* добавление постоянных распространения */
13 add(reverse(b),dh_roots),
14 v:v+vstp)), /* текущая частота */
15 fcnt:length(dh_roots), /* число частот */
16 mcnt:length(last(dh_roots)), /* число мод */
17 /* графики */
18 lines:makelist(['discrete',[[]],[],mcnt),
19 for i:1 thru fcnt do /* цикл по частотам */
20 (
21 rts:dh_roots[i], /* корни уравнения */
22 rcnt:length(rts), /* число корней */
23 for j:1 thru rcnt do /* цикл по корням */
24 (
25 /* запись частот */
26 add(nfreqs[i],lines[j][2]),
27 /* запись корней */
28 add(rts[j],lines[j][3]))), true)$
```

```

1 /* вывод ДХ на печать */
2 dh_print(n):=
3 block([len,v,b],
4 v:lines[n+1][2], /* частоты */
5 b:lines[n+1][3], /* пост. распространения */
6 len:length(v), /* длина списков */
7 /* цикл печати */
8 for i:1 thru len do print(v[i],",",b[i]),true)$

```

#### 4.5.11 Программа расчета

```

1 /* запуск функции расчета */
2 dh_solve();
3 /* вывод дисперсионных характеристик */
4 plot2d(lines,
5 [xlabel,"v"],[ylabel,"b"],[x,0,vmax], legends(
6     length(lines)),
7 [gnuplot_preamble,
8 "set grid; set key left; set title '
9     Дисперсионная характеристика'"]);
10 /* печать таблицы ДХ */
11 dh_print(3);

```

В операторе `dh_print`,  $n$  – номер моды (0, 1, 2, 3...). Набирать текст программы нужно внимательно, т.к. ошибка в одном символе приводит к сбою программы.

Для ТМ-мод в пункте «Вычисляемые параметры», строка "7" заменяется следующей:

```

1 (nf^4*pf*pf - ns^2*nc^2*pc*ps)*sin(v*pf) - nf
   ^2*pf*(ns^2*ps+nc^2*pc)*cos(v*pf)$

```

## 4.6 Содержание отчета

- Цель работы;
- Задание на работу в соответствии с номером бригады;
- Исходное уравнение для расчета;
- Таблица результатов расчета;
- Дисперсионные кривые;
- Выводы по результатам расчета;

## 4.7 Контрольные вопросы

1. Виды оптических волноводов, используемых в интегральной оптике;
2. Уравнения Максвелла для описания электромагнитных полей волн в оптических волноводах;
3. ТЕ и ТМ-моды;
4. Уравнения Гельмгольца для ТЕ и ТМ-мод;
5. Вывод дисперсионного уравнения для ТЕ-мод плоского трёхслойного оптического волновода;
6. Вывод дисперсионного уравнения для ТМ-мод плоского трёхслойного оптического волновода;
7. Алгоритм расчёта частот отсечек и дисперсионных характеристик собственных волн плоского трёхслойного оптического волновода;
8. Численный расчёт дисперсионных характеристик;
9. Матричная теория описания электромагнитных волн в многослойных оптических волноводах;
10. Применение матричной теории для вывода дисперсионного уравнения для ТЕ-мод трёхслойного диэлектрического волновода.

Лабораторная работа №5  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО  
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ВРАЩАТЕЛЯ  
ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

## 5.1 Цель работы

- получение навыков расчёта характеристик интегральных электрооптических вращателей плоскости поляризации и выбора параметров изучаемых устройств

## 5.2 Краткие теоретические сведения

### 5.2.1 Эффект Поккельса в кристаллах

Устройства для модуляции, разделения и контроля поляризации находят широкое применение в системах оптической связи когерентного типа. Примером такого устройства может служить интегральный оптический преобразователь излучения ТЕ  $\Leftrightarrow$  ТМ.

В основе работы поляризационных устройств лежит электрооптический эффект Поккельса в кристаллах. Известно, что для анизотропных сред (к которым относятся и кристаллы) одно из материальных уравнений принимает тензорный вид:

$$\mathbf{D} = \overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} \mathbf{E}, \quad (5.1)$$

где

$$\overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

– тензор диэлектрической проницаемости.

В любом кристалле всегда существуют три взаимоперпендикулярных направления, такие что вдоль этих осей

$$D_x = \varepsilon_{xx}E_x, \quad D_y = \varepsilon_{yy}E_y, \quad D_z = \varepsilon_{zz}E_z. \quad (5.2)$$

Эти оси называются главными оптическими осями и относительно их тензор диэлектрической проницаемости приводится к диагональному виду. По аналогии можно ввести тензор показателей преломления:

$$\overset{\leftrightarrow}{n} = \begin{pmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

где  $n_j = \sqrt{\varepsilon_{jj}\mu}$   $j = x, y, z$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость кристалла (в большинстве случаев её можно положить равной 1).

Из закона сохранения энергии можно получить для плотности электрической энергии следующее выражение:

$$\begin{aligned} W_{\text{э}} &= \frac{1}{8\pi} (\mathbf{E}, \mathbf{D}) = \frac{1}{8\pi} (E_x D_x + E_y D_y + E_z D_z) = \\ &= \frac{1}{8\pi} \left( \frac{D_x^2}{\varepsilon_{xx}} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_{yy}} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_{zz}} \right) = \text{const.} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Обозначая:

$$D_x/\text{const} = x, \quad D_y/\text{const} = y, \quad D_z/\text{const} = z,$$

приходим к уравнению эллипсоида

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1. \quad (5.5)$$

Уравнение (5.5) описывает эллипсоид показателей преломления.

При приложении внешнего электрического поля  $\mathbf{E}$  (эффект Поккельса) произойдёт линейное изменение элементов тензора показателей преломления на величину

$$\Delta n_i = -\frac{n^3}{2} \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j, \quad (5.6)$$

где  $n$  – показатель преломления обыкновенной или необыкновенной волны в кристалле;  $r_{ij}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ;  $j = 1, 2, 3$ ) – элементы электрооптического тензора размерности  $3 \times 6$ . Учитывая коэффициенты тензора  $\overset{\leftrightarrow}{r}$  можно найти шесть значений изменения показателя преломления  $\Delta n$  в виде симметричной матрицы  $6 \times 3$ . Например, если в качестве материала для создания поляризационного устройства выступает ниобат лития, то для него данный тензор имеет вид:

$$\Delta n_{ij} = -\frac{n^3}{2} \begin{pmatrix} -r_{22}E_y + r_{13}E_z & -r_{22}E_x & r_{51}E_x \\ -r_{22}E_x & r_{22}E_y + r_{13}E_z & r_{51}E_y \\ r_{51}E_x & r_{51}E_y & r_{33}E_x \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Недиагональные элементы матрицы (5.7) определяют электрооптическое взаимодействие между ортогонально поляризованными компонентами электромагнитной волны. Например, коэффициент

$$\Delta n_{13} = \Delta n_{xz} = -\frac{n^3}{2} r_{51} E_x. \quad (5.8)$$

задает вращение эллипсоида показателей преломления, которое благодаря наличию составляющей  $E_x$  внешнего электрического поля приводит к появлению связи между ортогональными составляющими  $E_x$  и  $E_z$  поля электромагнитной волны.

Таким образом, недиагональные элементы матрицы электрооптических коэффициентов определяют изменение поляризации и появляется возможность создания интегрально-оптических поляризационных устройств (например, на основе волноводов типа  $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$ ).

### 5.2.2 Поляризация электромагнитной волны

Электромагнитная волна характеризуется тремя векторами:  $\mathbf{E}$  (вектор напряженности электрического поля),  $\mathbf{H}$  (вектор напряженности магнитного поля) и  $\mathbf{S}$  (вектор Умова-Пойнтинга, задающий направление переноса волной энергии).

**Поляризация** — это направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  электромагнитного поля (ЭМП) волны в пространстве при фиксированном направлении распространения. **Плоскость поляризации** — это плоскость, в которой лежат векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ .

Существуют следующие виды поляризации:

- **линейная**, когда вектор  $\mathbf{E}$  совершает колебания вдоль выбранного направления (по прямой линии);
- **круговая**, когда вектор  $\mathbf{E}$  вращается по окружности (правокруговая —  $\mathbf{E}$  вращается против часовой стрелки; левокруговая — по часовой стрелке);
- **эллиптическая**, когда вектор  $\mathbf{E}$  вращается по эллипсу (правоэллиптическая —  $\mathbf{E}$  вращается против часовой стрелки; левоэллиптическая — по часовой стрелке);
- **хаотическая**, когда вектор  $\mathbf{E}$  в различных точках пространства колеблется в различных направлениях.

Различные виды поляризации электромагнитной волны (ЭМВ) показаны на рисунке 5.1.

В оптических волноводах распространяются электромагнитные волны с двумя типами линейной поляризации. Рассмотрим их на примере распространения электромагнитной волны в канальном световоде (рисунок 5.2а). В общем случае в структуре поля ЭМВ могут присутствовать шесть составляющих ЭМП:



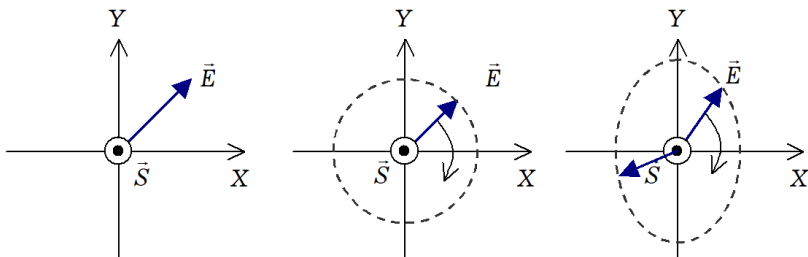


Рис. 5.1. Виды поляризации

$E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ . Составляющие  $E_z$  и  $H_z$  называются продольными. В канальном волноводе возможно распространение мод с двумя ортогональными линейными поляризациями.

- **TE-волна (H-волна)** (рисунок 5.2,а) — поперечно-электрическая волна, у которой в структуре поля отсутствует продольная составляющая  $E_z$  электрического поля; она имеет следующие составляющие:  $E_x, E_y, H_x, H_y, H_z, E_z \equiv 0$ .
- **TM-волна (E-волна)** (рисунок 5.2,в) — поперечно-электрическая волна, у которой в структуре поля отсутствует продольная составляющая  $H_z$  магнитного поля; она имеет следующие составляющие:  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z \equiv 0$ .

В электродинамике существует теорема, согласно которой ЭМВ с произвольной эллиптической поляризацией всегда можно представить в виде суперпозиции двух волн TE и TM с различными амплитудами.

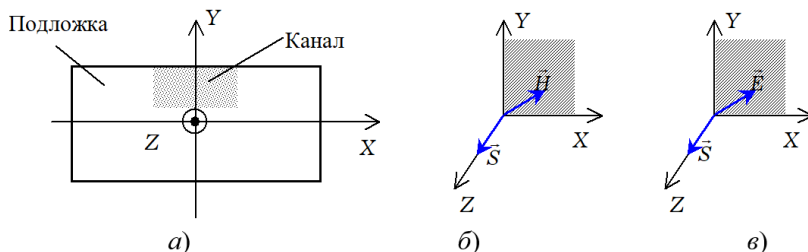


Рис. 5.2. К суперпозиции волн

Для характеристики поляризации волны удобно использовать два параметра: угол поляризации  $\theta$  и фазовый сдвиг между ТЕ и ТМ составляющими  $\phi$ . Угол поляризации  $\theta$  определяет отношение амплитуд ТЕ и ТМ волн. В связи с этим комплексные амплитуды ТЕ и ТМ волн представляются в виде:

$$E_{\text{ТЕ}} = \cos \theta, E_{\text{ТМ}} = \sin \theta e^{i\phi}. \quad (5.9)$$

Условием линейной поляризации излучения является равенство нулю фазового сдвига  $\phi = 0$ . В этом случае электромагнитная волна линейно поляризована под углом  $\theta$ . Если  $\theta = 0$ , то в составе излучения присутствует только ТЕ-составляющая; если  $\theta = \pi/2$  — только ТМ-составляющая. Правокруговая поляризация описывается набором параметров  $\theta = \pi/4, \phi = \pi/2$ . Левокруговая поляризация —  $\theta = \pi/4, \phi = -\pi/2$ . Для эллиптически-поляризованной волны углы  $\theta$  и  $\phi$  принимают произвольные значения.

Для ряда практических задач необходимо создание интегральных оптических устройств способных преобразовывать поляризацию входного излучения ( $i$  — «input» — вход) в определенную поляризацию ( $o$  — «output» — выход) на выходе:

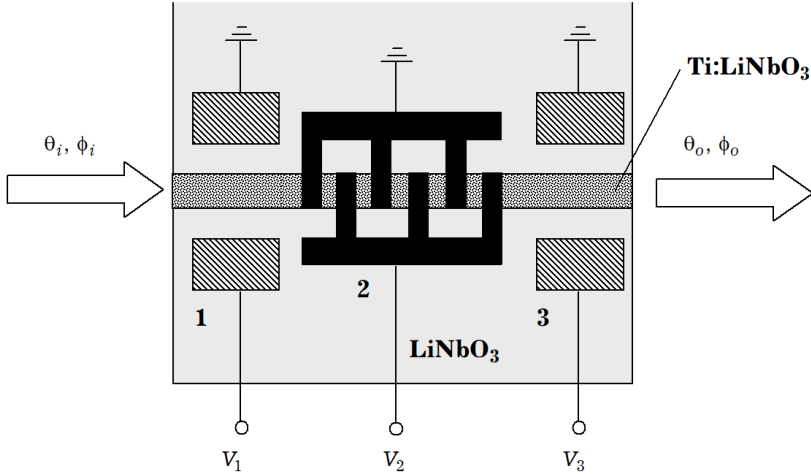
$$\theta_i, \phi_i \Rightarrow \theta_o, \phi_o.$$

Такое устройство для преобразования поляризации имеет очень большое значение, поскольку обыкновенное одномодовое оптическое волокно не сохраняет поляризации, в то время как когерентные системы связи требуют использование сигналов с известной поляризацией. Во многих случаях вполне достаточно, чтобы выходной сигнал представлял собой ТЕ или ТМ-моду. При этом на вход устройства может поступать произвольный эллиптически-поляризованный сигнал.

### 5.2.3 Интегрально-оптический вращатель плоскости поляризации

Устройство интегрально-оптического вращателя плоскости поляризации приведено на рисунке 5.3 (вид на подложку сверху). ИОС изготавливается на подложке из  $\text{LiNbO}_3$  (ниобат лития), волноводная система представляет собой канальный волновод на основе соединения  $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$ . Принцип работы данного устройства основан на электрооптическом эффекте Поккельса. Основным элементом рассматриваемого устройства является периодическая металлическая электродная структура 2, выполняющая роль

преобразователя типа поляризации. Данным элемент помещается между двумя фазосдвигающими ячейками 1 и 3, назначение которых состоит в изменении фазового сдвига между ТЕ и ТМ-составляющими электромагнитного излучения в канальном волноводе.



**Рис. 5.3.** Оптический вращатель

Рассмотрим принцип работы электрооптического вращателя плоскости поляризации.

Первая фазосдвигающая ячейка характеризуется матрицей передачи вида

$$\begin{bmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -ie^{i\Delta\phi_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ -ie^{i\Delta\phi_1} \sin \theta_i \end{bmatrix}, \quad (5.10)$$

где  $\Delta\phi_1$  — фазовый сдвиг, создаваемый ячейкой 1.

Матрица передачи электрооптического преобразователя поляризации имеет вид:

$$\begin{bmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} \cos \chi L_2 \\ \sin \chi L_2 \end{bmatrix}, \quad (5.11)$$

где  $L_2$  — длина периодической электродной системы;  $\chi$  — параметр, пропорциональный коэффициенту  $r_{51}$ , управляющему напряжению  $V_2$  и показателю преломления канального волновода  $n$ .

Вторая фазосдвигающая ячейка описывается следующей матрицей передачи:

$$\begin{bmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} \end{bmatrix}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ -ie^{i\Delta\phi_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -ie^{i\Delta\phi_3} \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

где  $\Delta\phi_3$  — фазовый сдвиг, создаваемый ячейкой 3.

Матрица передачи всего устройства получается путем перемножения матриц передачи отдельных его участков (5.10), (5.11) и (5.12) и имеет вид:

$$\begin{bmatrix} E_{TE} \\ E_{TM} \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} \alpha_{cc} - ie^{i(\phi_i + \Delta\phi_1)}\alpha_{ss} \\ e^{i\Delta\phi_3} [e^{i(\phi_i + \Delta\phi_1)}\alpha_{cc} - i\alpha_{ss}] \end{bmatrix}, \quad (5.13)$$

здесь и далее:

$$\begin{aligned} \alpha_{ss} &= \sin(\chi L_2) \sin \theta_i & \alpha_{sc} &= \sin(\chi L_2) \cos \theta_i, \\ \alpha_{cs} &= \cos(\chi L_2) \sin \theta_i & \alpha_{cc} &= \cos(\chi L_2) \cos \theta_i. \end{aligned}$$

Используя выражение (5.13), несложно получить соотношения для угла поляризации на выходе устройства

$$\theta_o = \frac{1}{2} \arccos [\cos 2\theta_i \cos 2\chi L_2 + \sin 2\theta_i \cos 2\chi L_2 \sin \phi'_i] \quad (5.14)$$

и относительного наведённого фазового сдвига

$$\begin{aligned} \phi_o &= \phi'_i + \Delta\phi_3 + \\ &+ \arctg \left[ \frac{\alpha_{cs} \sin \phi'_i - \alpha_{sc}}{\alpha_{cs} \cos \phi'_i} \right] + \arctg \left[ \frac{\alpha_{cc} \cos \phi'_i}{\alpha_{cc} + \alpha_{ss} \sin \phi'_i} \right], \end{aligned} \quad (5.15)$$

где  $\phi'_1 = \phi_i + \Delta\phi_1$  — относительный наведённый фазовый сдвиг после первого фазосдвигающего участка на входе участка преобразования типа поляризации излучения.

Процесс преобразования поляризации происходит в три этапа.

1. На вход устройства подается эллиптически-поляризованное излучение  $(\theta_i, \phi_i)$ . После прохождения волной первого фазосдвигающего участка под действием модулирующего напряжения  $V_1$  между ТЕ и ТМ-составляющими появляется дополнительный наведённый сдвиг фазы  $\Delta\phi_1$ , а угол поляризации  $\theta$  остаётся неизменным.

2. На участке 2 происходит преобразование типа поляризации световой волны, а именно изменяется угол поляризации  $\theta$ . Это является следствием электрооптического эффекта Поккельса — появление недиагональных элементов тензора  $\overset{\leftrightarrow}{\hat{n}}$  приводит к наличию связи между ТЕ и ТМ-составляющими, что в свою очередь ведёт к изменению их амплитуд. В результате этого процесса плоскость поляризации поворачивается на некоторый угол, определяемый значениями  $\Delta n_{13}, L_2$ .
3. На втором фазосдвигающем участке 3 вследствие действия модулирующего напряжения  $V_3$  происходит дополнительный наведенный фазовый сдвиг  $\Delta\phi_3$ , который необходим для получения нужного типа поляризации излучения на выходе.

Наличие первого фазосдвигающего участка необходимо для обеспечения возможности произвольного преобразования поляризации. На рисунке 4 приведены зависимости угла поляризации на выходе устройства  $\theta_o$  от величины параметра связи  $\chi L_2$  при различных значениях угла поляризации на входе  $\theta_i$ . Зависимости построены в предположении отсутствия первого фазосдвигающего участка, то есть при  $\phi'_i = 0$ . Из графиков видно, что если на входе сигнал представлен только ТЕ или ТМ поляризацией ( $\theta_i = 0$  или  $\theta_i = \pi/2$ ), то на выходе устройства можно получить произвольное значение угла поляризации  $\theta_o$  за счет выбора соответствующего параметра связи  $\chi L_2$ .

Однако когда угол  $0 < \theta_i < \pi/2$ , то диапазон допустимых значений  $\theta_o$  ограничивается некоторым интервалом значений. Например, при  $\theta_i = \pi/3$ :  $\pi/6 < \theta_o < \pi/3$ . Более того, из рисунка 5.4 несложно заметить, что для угла поляризации  $\theta_i = \pi/4$  (круговая поляризация) вообще не удастся произвести изменение типа поляризации ни при одном значении параметра связи  $\chi L_2$ . Кроме того, можно отметить, что и при  $\phi'_i \neq 0$  диапазон допустимых значений  $\theta_o$  будет ограничен.

Для обеспечения возможности произвольного преобразования угла поляризации необходимо, чтобы первый фазосдвигающий участок создавал относительное изменение фазы между ТЕ и ТМ-составляющими  $\phi'_i = \phi_i + \Delta\phi_1 = \pm\pi/2$ . В этом случае из выражения (5.14) несложно получить, что

$$\theta_i - \theta_o = \pm\chi L_2. \quad (5.16)$$

В этом случае происходит вращение плоскости поляризации по

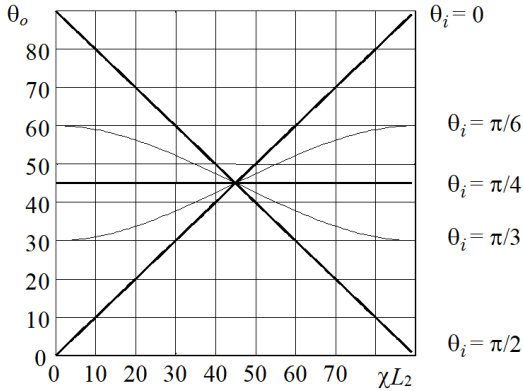


Рис. 5.4. Характеристики вращателя

линейному закону и преобразователь работает в режиме *линейного вращателя*.

В результате можно сделать вывод, что лишь в двух частных случаях при  $\phi'_i = \phi_i + \Delta\phi_1 = \pm\pi/2$  возможно произвольное преобразование типа поляризации. Следовательно, наличие первого фазосдвигающего участка необходимо для того, чтобы сделать сдвиг фаз равным одному из двух значений.

Относительный сдвиг фазы на выходе устройства  $\phi_o$  определяется вторым фазосдвигающим участком 3 (рисунок 5.3). В оптимальном случае:

$$\phi_o = \Delta\phi_3 \pm \pi/2, \phi'_i = \pm\pi/2. \quad (5.17)$$

Из данного соотношения следует, что относительный фазовый сдвиг на выходе преобразователя мод такой же, как и на его входе. Режим линейного вращателя плоскости поляризации реализуется, когда первый фазосдвигающий участок дает сдвиг  $\phi'_i = -\pi/2$ , а второй —  $\phi_o = 0$ . При произвольной поляризации на входе и необходимости получения ТЕ или ТМ-поляризации на выходе величина  $\phi_o$  не имеет значения и второй фазосдвигающий участок не нужен.

В случае, когда на вход устройства подается ТЕ или ТМ-поляризованное излучение, наоборот, не нужен первый фазосдвигающий участок и в этом случае на выходе можно получить произвольный тип поляризации.

## 5.3 Домашнее задание

- Ознакомиться с краткими теоретическими сведениями;
- Ознакомиться с соответствующими разделами из источников, представленных в методических указаниях к данной работе.

## 5.4 Порядок выполнения работы

### 5.4.1 Подготовительные операции

#### ОПИСАНИЕ РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ

Запустите программу **FIO2**. Для этого щелкните по соответствующей иконке. На экране монитора появится главное окно программы Lab2.

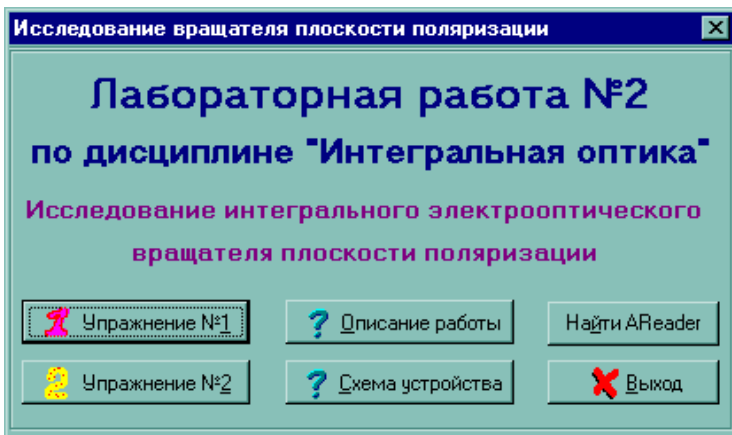


Рис. 5.5. Вход в программу

В главном окне имеются кнопки для выполнения упражнений 1 и 2:

- Кнопка **УПРАЖНЕНИЕ 1**– для выполнения упражнений 1.1, 1.2, 1.3;
- Кнопка **УПРАЖНЕНИЕ 2**– для выполнения упражнений 2.1, 2.2, 1.3.
- Кнопка **СХЕМА УСТРОЙСТВА**– для отображения схемы вращателя.

## УПРАЖНЕНИЕ 1 (1.1, 1.2, 1.3)

Для того чтобы выполнять упражнение щелкните по кнопке «Упражнение №1». На экране монитора появится следующее окно:

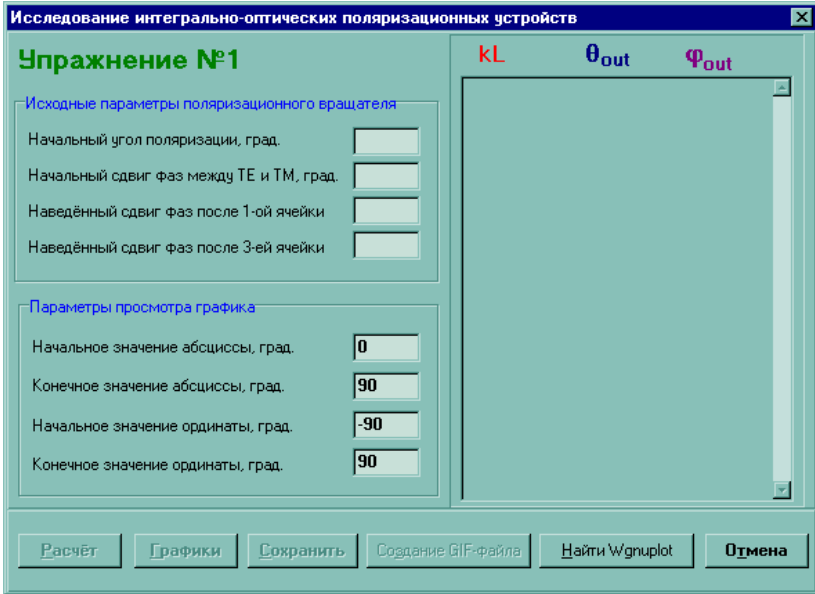


Рис. 5.6. Панель элементов окна

### ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОКНА

- Кнопка **РАСЧЕТ** – вычисление характеристик при заданных параметрах;
- Кнопка **ГРАФИКИ** – графики поляризационных характеристик при заданных параметрах (ее необходимо нажимать только после нажатия на кнопку **РАСЧЕТ**);
- Поле **Начальный угол поляризации** – значение  $\theta_i$ ;
- Поле **Начальный сдвиг фаз между ТЕ и ТМ** – значение  $\phi_i$ ;
- Поле **Наведенный сдвиг фаз после первой ячейки** – значение  $\Delta\phi_1$ ;
- Поле **Наведенный сдвиг фаз после третьей ячейки** – значение  $\Delta\phi_3$ .



В поля группы «**Параметры просмотра графика**» вводятся:

- $X_{\min}$  — минимальное значение абсциссы;
- $X_{\max}$  — максимальное значение абсциссы;
- $Y_{\min}$  — минимальное значение ординаты;
- $Y_{\max}$  — максимальное значение ординаты.

### УПРАЖНЕНИЕ 2 (2.1, 2.2)

Для того, чтобы выполнять упражнение щёлкните по кнопке «**Упражнение №2**». На экране монитора появится следующее окно:

The screenshot shows a software window titled "Вычисление управляющего параметра для заданной поляризации на выходе" (Calculation of the control parameter for a given polarization at the output). The window contains a form for "Упражнение №2" (Exercise No. 2) with the following elements:

- Требуемые параметры поляризационного вращателя** (Required parameters of the polarization rotator):
  - Угол поляризации на выходе, град. (Polarization angle at the output, degrees): 90
  - Значение сдвига фаз на выходе, град. (Phase shift value at the output, degrees): 0
- Исходные параметры поляризационного вращателя** (Initial parameters of the polarization rotator):
  - Начальный угол поляризации, град. (Initial polarization angle, degrees): 0
  - Начальный сдвиг фаз между ТЕ и ТМ, град. (Initial phase shift between TE and TM, degrees): 0
  - Наведённый сдвиг фаз после 1-ой ячейки (Induced phase shift after the 1st cell): 10
  - Наведённый сдвиг фаз после 3-ей ячейки (Induced phase shift after the 3rd cell): 0
- Границы интервала** (Interval boundaries):
  - $X_{\min}$ : 0
  - $X_{\max}$ : 90
- Тип вращателя** (Rotator type):
  - Произвольное вращение (Arbitrary rotation)
  - Линейное вращение (Linear rotation)
- Тип преобразования** (Transformation type):
  - TE -> TM
- Значение управляющего параметра** (Control parameter value): [Empty field]

At the bottom of the window, there are four buttons: "Расчёт" (Calculation), "Построить график функции" (Build function graph), "Сохранить" (Save), and "Отмена" (Cancel).

Рис. 5.7. Панель элементов окна для упражнения 2

### ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОКНА

- Кнопка **РАСЧЕТ**– вычисление параметра  $\chi L_2$ , при котором возможно преобразование;
- Кнопка **ПОСТРОИТЬ ГРАФИК ФУНКЦИИ**– график поляризационной характеристики при заданных параметрах;
- Поле **Начальный угол поляризации** – значение  $\theta_i$ ;
- Поле **Начальный сдвиг фаз между ТЕ и ТМ** – значение  $\phi_i$ ;

- Поле **Наведенный сдвиг фаз после первой ячейки** – значение  $\Delta\phi_1$ ;
- Поле **Наведенный сдвиг фаз после третьей ячейки** – значение  $\Delta\phi_3$ ;
- Поле **Угол поляризации на выходе** – значение  $\theta_o$ ;
- Поле **Значение сдвига фаз на выходе** – значение  $\phi_o$ .

В поля группы «**Границы интервала**» вводятся значения левого и правого концов интервала смены знака поляризационной функции.

Переключатель «**Тип вращателя**» позволяет выбрать режимы линейного и произвольного вращения.

Список «**Тип преобразования**» позволяет выбрать одну из следующих схем преобразования:

TE→TM, TM→TE, ПКП→ТЕ, ЛКП→ТЕ,  
 ПКП→ТМ, ЛКП→ТМ, ПКП→ЛКП, ЛКП→ПКП,  
 ТЕ→ПКП, ТЕ→ЛКП, ТМ→ПКП, ТМ→ЛКП.

### **Упражнение 1.1. Исследование поляризационных характеристик оптического вращателя плоскости поляризации при отсутствии первого и второго фазосдвигающих участков**

1. Для выполнения данного упражнения щелкните по кнопке **УПРАЖНЕНИЕ №1**. В результате на экране появится окно с названием «Исследование интегрально-оптических поляризационных устройств». Для выполнения данного упражнения необходимо установить значения  $\phi_i = 0$ ,  $\Delta\phi_1 = 0$ ,  $\Delta\phi_3 = 0$  в соответствующих полях диалогового окна.
2. Необходимо снять зависимости  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2)$ ,  $\phi_o = \phi_o(\chi L_2)$  при следующих значениях угла поляризации на входе устройства:  $\theta_i = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90$ . Полученные данные необходимо представить в виде набора графиков в двух системах координат –  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2)$  и  $\phi_o = \phi_o(\chi L_2)$ . В каждой системе координат должно быть построено по 7 графиков. Необходимо сделать вывод о том, в каких пределах возможно преобразование угла поляризации в рассматриваемом случае.

### **Упражнение 1.2. Исследование поляризационных характеристик оптического вращателя плоскости поляризации при наличии первого фазосдвигающего участка**

1. Для выполнения данного упражнения щелкните по кнопке **УПРАЖНЕНИЕ №1**. В результате на экране появится окно с названием «Исследование интегрально-оптических поляризационных устройств». Для выполнения упражнения необходимо установить значения  $\phi_i = 0, \Delta\phi_1 = nn \times 10, \Delta\phi_3 = 0$  ( $nn$  – номер бригады) в соответствующих полях диалогового окна.
2. Необходимо снять зависимости  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2), \phi_o = \phi_o(\chi L_2)$  при следующих значениях угла поляризации на входе устройства:  $\theta_i = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90$ . Полученные данные необходимо представить в виде набора графиков в двух системах координат —  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2)$  и  $\phi_o = \phi_o(\chi L_2)$ . В каждой системе координат должно быть построено по 7 графиков. Необходимо сделать вывод о том, в каких пределах возможно преобразование угла поляризации в рассматриваемом случае.

### **Упражнение 1.3. Исследование поляризационных характеристик линейного оптического вращателя плоскости поляризации**

1. Для выполнения данного упражнения щелкните по кнопке **УПРАЖНЕНИЕ №1**. В результате на экране появится окно с названием «Исследование интегрально-оптических поляризационных устройств». Для выполнения данного упражнения необходимо установить значения  $\phi_i = 0, \Delta\phi_1 = -\pi/2, \Delta\phi_3 = 0$  в соответствующих полях диалогового окна.
2. Необходимо снять зависимости  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2), \phi_o = \phi_o(\chi L_2)$  при следующих значениях угла поляризации на входе устройства:  $\theta_i = 0, 30, 45, 60, 90$ . Полученные данные необходимо представить в виде набора графиков в двух системах координат —  $\theta_o = \theta_o(\chi L_2)$  и  $\phi_o = \phi_o(\chi L_2)$ . В каждой системе координат должно быть построено по 5 графиков. Необходимо сделать вывод о том, в каких пределах возможно преобразование угла поляризации в рассматриваемом случае.

## Упражнение 2.1. Исследование различных типов преобразователей поляризации

1. Для выполнения данного упражнения щёлкните по кнопке **УПРАЖНЕНИЕ №2**. В результате на экране появится окно с названием «Вычисление управляющего параметра для заданной поляризации на выходе». Целью данного упражнения является нахождения значения параметра связи  $\chi L_2$ , при котором возможно провести заданное преобразование поляризации. Для выбора видов преобразования поляризации служит выпадающий список «**Тип преобразования**», в котором имеются 12 различных видов преобразований.
2. После выбора определенного элемента списка программа автоматически заполняет поля  $\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o$  в зависимости от вида изменения типа поляризации. Значение фазового сдвига на выходе  $\Delta\phi_3$  установите равным нулю, а значение  $\Delta\phi_1 = nn \times 10$  ( $nn$  – номер бригады).
3. Для 12 видов преобразования необходимо определить значения управляющего параметра связи  $\chi L_2$ , при котором функция  $F(\theta_i, \theta_o, \phi_i, \phi_o, \Delta\phi_1, \chi L_2) = 0$ . Это может быть сделано следующим образом. После заполнения всех полей нажмите на кнопку **ПОСТРОИТЬ ГРАФИК ФУНКЦИИ**. В результате будет выведено окно с графиком функции. По графику необходимо определить интервал, внутри которого функция обращается в нуль и ввести эти значения в поля **X\_min** и **X\_max**. Сужая интервал  $[X\_min, X\_max]$ , в конце концов определите значение  $\chi L_2$ , при котором функция обращается в нуль. В результате при данном значении  $\chi L_2$  исследуемое преобразование поляризации возможно.

В отчете для каждого из 12 видов преобразования должны присутствовать графики функций и соответствующее значение параметра  $\chi L_2$ . В некоторых случаях из графика будет видно, что данное преобразование невозможно ни при одном значении  $\chi L_2$ . В этом случае путем изменения значения параметра  $\Delta\phi_1$  необходимо достичь ситуации, когда данное преобразование становится возможным.

Вариант	$\theta_i$	$\phi_i$	$\theta_o$	$\phi_o$	$\Delta\phi_3$
1	30	60	50	30	0
2	15	60	60	50	0
3	70	30	25	60	0
4	80	30	40	15	0
5	75	15	15	75	0
6	60	15	30	30	0
7	15	15	60	15	0
8	15	60	30	30	0

## Упражнение 2.2. Исследование произвольного вращателя плоскости поляризации

- Для выполнения данного упражнения щёлкните по кнопке **УПРАЖНЕНИЕ №2**. В результате на экране появится окно с названием «Вычисление управляющего параметра для заданной поляризации на выходе». Целью данного упражнения является нахождения значения параметра связи  $\chi L_2$ , при котором возможно провести произвольное преобразование поляризации. Исходные данные выбираются из таблицы:

Необходимо провести исследование для 10 различных значений параметра  $\Delta\phi_1$  (его значения выбираются произвольно). Для каждого значения  $\Delta\phi_1$  в отчете необходимо привести график поляризационной функции и указать соответствующее значение управляющего параметра  $\chi L_2$ , при котором это преобразование возможно (если, конечно, при данном  $\Delta\phi_1$  оно возможно).

### Пример выполнения упражнения 2.2

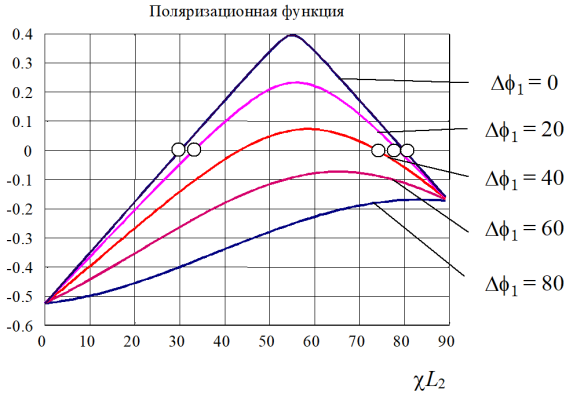
Пусть задано преобразование вида:  $\{55^\circ, 5^\circ\} \Rightarrow \{25^\circ, 45^\circ\}$

Выберем значения  $\Delta\phi_1 = 0, 20, 40, 60, 80$  и построим графики поляризационной функции (см. рисунок 5.8 )

**Исходные данные:**  $\theta_i = 55^\circ, \phi_i = 5^\circ, \theta_o = 25^\circ, \phi_o = 45^\circ$ .

Исследования проводились для значений параметра  $\Delta\phi_1$ :

- $\Delta\phi_1 = 0^\circ$ . В этом случае не существует значения  $\chi L_2$ , при котором данное преобразование было бы возможным.
- $\Delta\phi_1 = 20^\circ$ . В этом случае не существует значения  $\chi L_2$ , при котором данное преобразование было бы возможным.



**Рис. 5.8.** Поляризационная характеристика

- $\Delta\phi_1 = 40^\circ$ . Преобразование возможно при двух значениях параметра  $\chi L_2$ :  $43.4^\circ$  и  $74.0^\circ$ .
- $\Delta\phi_1 = 60^\circ$ . Преобразование возможно при двух значениях параметра  $\chi L_2$ :  $33.1^\circ$  и  $78.7^\circ$ .
- $\Delta\phi_1 = 80^\circ$ . Преобразование возможно при двух значениях параметра  $\chi L_2$ :  $30.1^\circ$  и  $79.9^\circ$ .

Значения параметра  $\chi L_2$ , при которых преобразование  $\{55^\circ, 5^\circ\} \Rightarrow \{25^\circ, 45^\circ\}$  возможно при выбранном  $\Delta\phi_1$  показаны кружками.

## 5.5 Контрольные вопросы

1. Эффект Керра;
2. Эффект Поккельса;
3. Тензор показателей преломления;
4. Устройство и принцип работы фазового модулятора емкостного типа;
5. Устройство и принцип работы фазового модулятора бегущей волны;
6. Виды поляризации электромагнитных волн;
7. Устройство и принцип работы ТЕ $\Leftrightarrow$ ТМ-преобразователя;
8. Устройство и принцип работы интегрально-оптического преобразователя поляризации.

## Список литературы

- [1] Самарский А.А. Введение в численные методы. — М.: Наука, 1988.
- [2] Компьютерная математика с Maxima: Руководство для школьников и студентов /Е.А.Чичкарёв - М. : ALT Linux, 2009. — 233 с. : ил. (Библиотека ALT Linux).
- [3] Мостовской А.П. Численные методы и система «wxMaxima»
- [4] Интегральная оптика / Под ред. Тамира Т. — М.: Мир, 1978.
- [5] Волноводная оптоэлектроника / Под ред. Тамира Т. — М.: Мир, 1991.
- [6] Планарные и волоконные оптические волноводы. — М.: Мир, 1980.
- [7] М.С.Содха, А.К.Гхатак. Неоднородные оптические волноводы. — М.: Связь, 1980.
- [8] Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. — М.: Радио и связь, 1981, с.138-141, с.148-152, 179-181.
- [9] Федоров Н.Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. — М.:Атомиздат, 1979, с.188-192, 199-202, 249-252.
- [10] Андрушко Л.М., Бурмистенко В.М. Электронные и квантовые приборы СВЧ. — М.: Связь, 1974, с.118-127,167-170.
- [11] Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника.- М.: Высшая школа, 2001,297-334.
- [12] Бочкарёва Т.С., Неганов В.А., Осипов О.В., Соболев В.А. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов / Под ред. Неганова В.А. — М: Радио и связь, 2003.
- [13] Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн.: Учебное пособие для вузов. — М.: Наука, 1989.
- [14] Неганов В.А., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика. Т.1 / Под ред. В.А. Неганова — М.: Радио и связь, 2000.
- [15] Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. — М.: Радио и связь, 1988.
- [16] Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов / Под ред. Ю.В. Пименова — М.: Радио и связь, 2000.