

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Игнатъев А.И., Киселев С.С., Никоноров Н.В., Сидоров
А. И., Рохмин А.С.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ и ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума



Санкт-Петербург

2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

**Игнатъев А.И., Киселев С.С., Никоноров Н.В.,
Сидоров А. И., Рохмин А.С.**

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И
ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ**

Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума

**Санкт-Петербург
2009**

А.И. Игнатъев, С.С. Киселев, Н.В. Никоноров, А. И. Сидоров, А.С. Рохмин. «Материалы и технологии интегральной и волоконной оптики». Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. - 78 стр.

Описаны основные типы и свойства оптических волноводов, применяемых в интегральной оптике. Рассмотрены материалы и технологии, применяемые для изготовления оптических волноводов и устройств интегральной оптики. Приведены примеры интегрально-оптических устройств. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» при изучении дисциплин «Основы фотоники», «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также по направлению 200200 «Оптехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения, оптотехники, фотоники и оптоинформатики в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200600 - «Фотоника и оптоинформатика» и 200200 – «Оптехника».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009.

© А.И. Игнатъев, С.С. Киселев, Н.В. Никоноров, А. И. Сидоров, А.С. Рохмин. 2009.

Содержание

Введение	6 стр.
<i>Лабораторная работа № 1</i> ИЗУЧЕНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ	7 стр.
<i>Лабораторная работа № 2</i> ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НА СВЕТОРАССЕЯНИЕ В ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ	14 стр.
<i>Лабораторная работа № 3</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ SOI	19 стр.
<i>Лабораторная работа № 4</i> ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК Y- РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ	27 стр.
<i>Лабораторная работа № 5</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБМЕНА $Na^+ \leftrightarrow K^+$ ИЗ РАСПЛАВА СОЛИ	31 стр.
<i>Лабораторная работа № 6</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБМЕНА $Na^+ \leftrightarrow Ag^+$ ИЗ РАСПЛАВА СОЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	36 стр.
<i>Лабораторная работа № 7</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА	42 стр.
<i>Лабораторная работа № 8</i> ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ВОЛНОВОДОВ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ	56 стр.
Приложение 1. Параметры полупроводниковых лазерных модулей и светодиодов, используемых в лабораторных работах 1, 2 и 4	68 стр.
Приложение 2. Коэффициенты пропускания калиброванных ослабителей излучения, используемых в лабораторных работах 1, 2 и 4	68 стр.
Приложение 3. Показатели преломления некоторых материалов, используемых в волоконной и интегральной оптике	69 стр.
Приложение 4. Методика численного моделирования в программе IONEX, используемой в лабораторных работах 5 и 6	69 стр.

Целью учебного пособия является:

Сформировать у студентов знания, умения и навыки в области технологий волноводной фотоники, включая физические принципы построения элементов и систем интегральной оптики, основы оптики планарных волноводов, конструирование пассивных и активных интегрально-оптических элементов и устройств фотоники, с целью последующего использования полученных компетенций при разработке и использовании приборов и устройств современной волноводной фотоники и интегральной оптики.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические волноводы представляют собой протяженные структуры, внутри которых могут распространяться электромагнитные волны в видимой и инфракрасной областях спектра. В простейшем случае, оптический волновод представляет собой диэлектрический стержень круглого сечения (волокно) или прямоугольного сечения с поперечным размером, сравнимым с длиной волны. Несмотря на такую простоту, распространение электромагнитной волны в подобной структуре существенно отличается от ее распространения в свободном пространстве или в диэлектрическом стержне с поперечным размером много большим длины волны. Описанием свойств оптических волноводов и созданием на их основе новых оптических устройств для передачи и обработки информации занимается специальное направление науки и техники – волоконная и интегральная оптика. Оптические волокна используются в волоконно-оптических линиях связи и позволяют передавать большие объемы информации на расстояния в десятки тысяч километров. Интегрально-оптические устройства на основе оптических волноводов обладают сверхвысоким быстродействием и малой мощностью управления. Возможность передачи больших объемов информации и обработки этой информации с высокой скоростью и малыми энергозатратами на управление определяет бурное развитие интегральной и волоконной оптики в настоящее время.

В данном лабораторном практикуме основное внимание уделено физическим принципам распространения электромагнитных волн в оптических волноводах, методам изготовления оптических волноводов и устройств на их основе и измерения их характеристик. В задачи лабораторного практикума входит формирование практических навыков изготовления оптических волноводов, юстировки оптических схем с оптическими волокнами и волноводами, а также изучение методов обработки экспериментальных результатов и расчета параметров волноводов.

ИЗУЧЕНИЕ МОДОВОГО СОСТАВА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с экспериментальными и расчетными методами исследования модового состава оптических волноводов круглого и прямоугольного сечения.

Предметом исследования в работе является изучение влияния геометрии оптического волновода и его поперечного размера на количество возбуждаемых волноводных мод.

1.1. Общие сведения

Модовый состав оптического волновода определяется его геометрической формой, размером поперечного сечения, длиной волны и поляризацией излучения, а также условиями возбуждения волноводных мод. На рис. 1.1 (слева) показано поперечное распределение электрической компоненты поля для трех низших типов волноводных мод с индексами $N = 0, 1, 2$. Индекс соответствует количеству нулей функции $E(x)$ – количеству пересечений зависимости с осью x (на рис. 1.1 нули функции показаны пунктирными кругами). Наблюдаемое на выходном торце волновода изображение формируется распределением интенсивности $I(x)$ в каждой волноводной моде. Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды поля, поэтому распределение интенсивности для низших мод имеет вид, показанный на рис. 1.1 (справа). Если в волноводе распространяется несколько типов мод, то распределение интенсивности будет формироваться суммарным распределением интенсивностей в каждой моде. Это создает неопределенность в определении модового состава. Например, распределение, показанное на рис. 1.1, *в* (справа) может быть сформировано либо модой с индексом $N = 2$, либо двумя модами – с $N = 0$ и $N = 1$.

В оптических волноводах круглого сечения, кроме ТЕ и ТМ-мод могут возникать гибридные ЕН-моды. Распределения электрического поля для некоторых типов мод в волноводе круглого сечения показаны на рис. 1.2 в виде векторных диаграмм. В областях, где вектор отсутствует, а также между областями, где векторы имеют противоположное направление, амплитуда поля стремится к нулю.

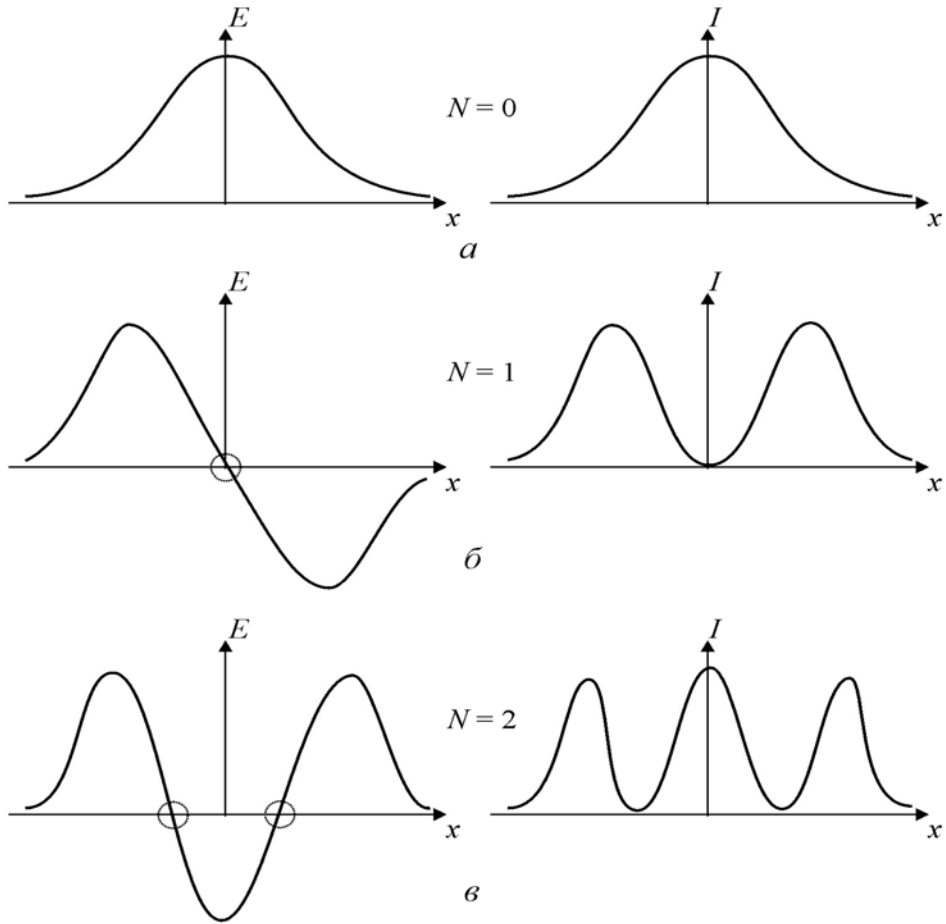


Рис. 1.1. Распределение амплитуды и интенсивности электромагнитной волны в волноводе

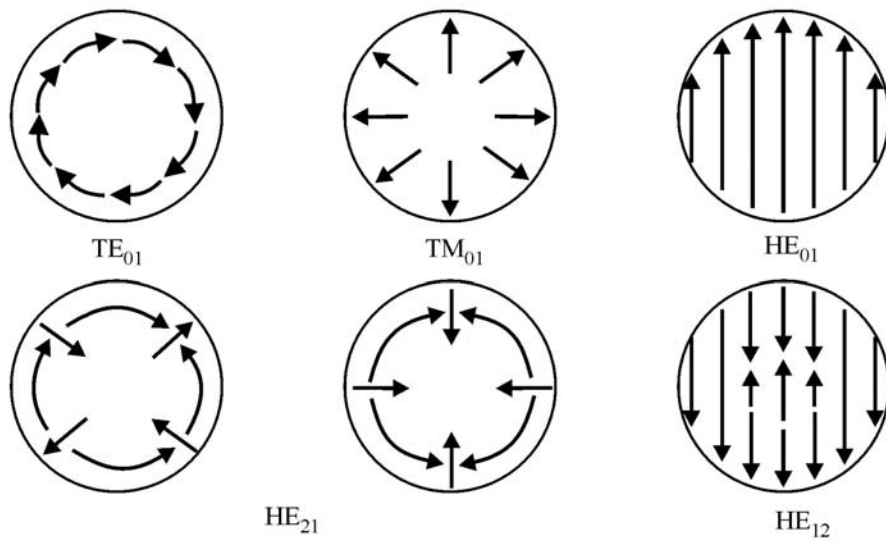


Рис.1.2. Распределение E -компоненты поля в оптических волокнах

Указанные факторы затрудняют точный анализ модового состава волноводов. Поэтому в данной лабораторной работе производится только оценка модового состава и количества мод в волноводе.

1.2. Измерительная установка

Схема измерительной установки показана на рис. 1.3. Источником излучения является полупроводниковый лазерный модуль KLM-650/20 (1), имеющий длину волны излучения 650 нм и среднюю мощность излучения 20 мВт. Питание лазерного модуля осуществляется от источника постоянного напряжения (2). С помощью линзы (3) излучение лазера фокусируется на входной торец волновода (5). Фокусное расстояние линзы – 10 мм. При необходимости, мощность лазерного излучения ослабляется с помощью калиброванного ослабителя (4). Ослабитель изготовлен из цветного оптического стекла СС-1. Коэффициент пропускания ослабителя на длине волны 650 нм равен 37 %. Изображение выходного торца волновода увеличивается с помощью телескопической лупы ЛПШ-474 (6). Увеличенное изображение регистрируется с помощью вебкамеры (7) Look 320S и передается на персональный компьютер (8).

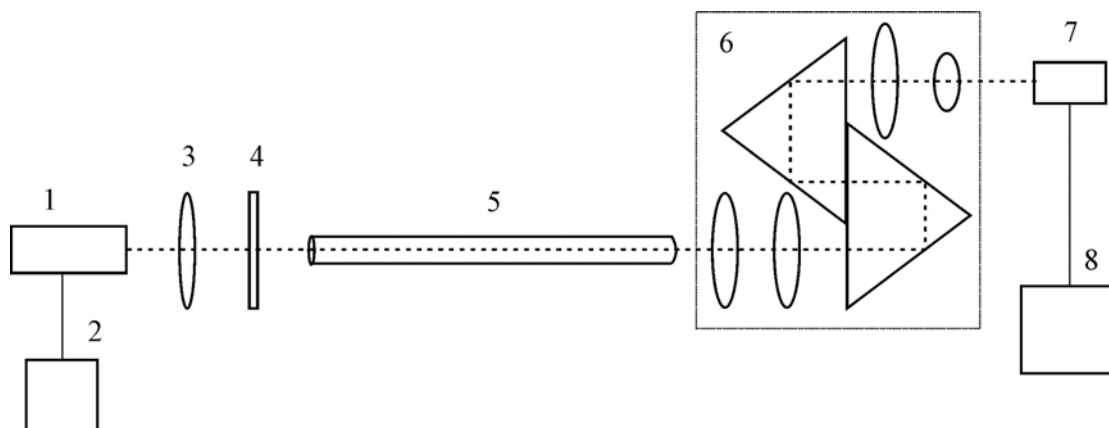


Рис. 1.3. Схема измерительной установки

В работе используются следующие образцы волноводов:

- № 1 – волновод прямоугольного сечения из лавсана без оболочки, $d = 150$ мкм, ширина – 3 мм. Показатель преломления волновода равен 1.57;
- № 2 – кварцевое волокно в полиэтиленовой оболочке, $\varnothing = 80$ мкм. Показатели преломления сердцевины и оболочки волновода равны 1.46 и 1.41 соответственно;
- № 3 – кварцевое волокно без оболочки, $\varnothing = 300$ мкм. Показатель преломления волновода равен 1.46;

№ 4 – стеклянный волновод круглого сечения в стеклянной оболочке, $\varnothing = 800$ мкм.

Длина отрезков волноводов – 14...15 см. Отрезки волноводов, для предотвращения повреждения и загрязнения, помещены в керамические трубки.

1.3. Задание и указания к его выполнению

1. С помощью лазерного модуля возбудить волноводные моды в отрезке прямоугольного или круглого волновода.

2. Зарегистрировать изображение распределения излучения на выходном торце волновода.

3. Построить контурные графики полученных изображений и графики распределения яркости по центральному сечению изображения.

Полученные в лабораторной работе изображения распределения мод необходимо обработать в программе Mathcad для повышения их информативности. Для этого каждое изображение следует сохранить в формате BMP в серых тонах (grayscale) с разрешением 100×100 пикселей в папке Mathcad (рис. 1.4, а). В программе Mathcad изображение следует преобразовать в матрицу A 100×100 элементов:

$A := \text{READBMP}(\text{"Name"}),$

где Name – имя файла с изображением.

Затем следует построить контурный график изображения используя графический редактор программы Mathcad (рис. 1.4, б). Количество контуров на графике рекомендуется установить от 3 до 5. Затем необходимо задать текущий индекс n , с максимальным значением, соответствующем количеству пикселей в строке матрицы A : $n := 1 \dots 100$.

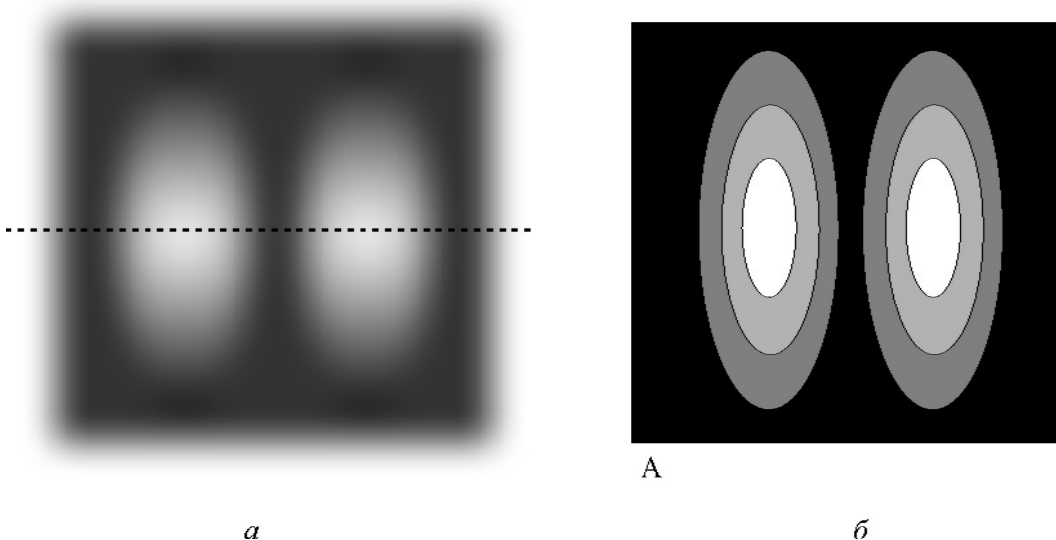


Рис.1.4. а – исходное изображение; б – изображение после цифровой обработки в Mathcad

После этого следует выделить центральную строку матрицы \mathbf{A} , показанную пунктиром на рис. 1.4, a :

$$B_n := A_{50,n}.$$

Затем следует построить график распределения яркости по центральному сечению изображения используя графический редактор программы Mathcad (рис. 1.5). По оси ординат откладывается номер оттенка серого цвета. В программе Mathcad количество оттенков в градации серого цвета – 256.

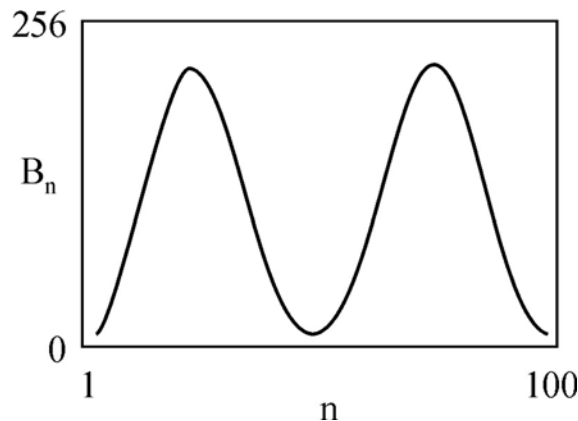


Рис. 1.5. График распределения яркости по центральному сечению изображения

4. Провести анализ модового состава и оценить количество мод, сформированных в волноводе.

5. Рассчитать максимальное количество волноводных мод в волноводе прямоугольного сечения.

Расчет количества направляемых мод в работе проводится для волновода прямоугольного сечения. Так как используемый волновод имеет ширину много большую толщины, его приближенно можно считать планарным. Максимальное количество M направляемых ТЕ-мод планарного волновода толщиной d определяется по формуле:

$$M = \left\lfloor \frac{1}{\pi} \left(2f - \arctg \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right) \right\rfloor_{\text{int}} .$$

Здесь n_1 и n_3 – показатели преломления сред вне сердцевины волновода; n_2 – показатель преломления сердцевины волновода; индекс «int» – указывает на то, что следует брать минимальное целое число, превышающее значение выражения в скобках; f – нормированная частота:

$$f = d k \sqrt{n_1^2 - n_2^2} ,$$

где k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$.

6. Объяснить связь модового состава и количества мод с формой и размером поперечного сечения волновода.

1.4. Указание мер безопасности

При работе с лазерным модулем необходимо принимать меры, исключающие попадание лазерного излучения в глаза.

1.5. Порядок выполнения работы

1. Подключите лазерный модуль KLM-650/20 к источнику питания, соблюдая полярность;
2. Включите источник питания и установите напряжение, равное 4...5 В;
3. Установите входной торец волновода прямоугольного сечения (№ 1) в фокусе лазерного луча;
4. Вращая юстировочные винты столика с лазером и перемещая фокусирующую линзу добейтесь максимально яркого свечения выходного торца волновода;
5. Включите компьютер и подключите веб-камеру к USB порту;
6. Перемещая лупу ЛПШ-474 добейтесь максимально четкого изображения торца волновода на мониторе компьютера;
7. Сохраните полученное изображение в формате BMP;
8. Установите в фокусе лазерного луча входной торец одного из волноводов круглого сечения (№ 2...№ 4);
9. Выполните п. п. 4...7;
10. Выключите источник питания лазерного модуля, отключите веб-камеру;
11. В математическом редакторе Mathcad постройте контурные графики полученных изображений и графики распределения яркости по центральному сечению изображения.

1.6. Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание принципов волноводного распространения электромагнитных волн;
3. Схема и описание лабораторной установки;
4. Изображения распределения интенсивности излучения на выходном торце прямоугольного и круглого волноводов;

5. Контурные графики полученных изображений и графики распределения яркости по центральному сечению изображения.
6. Оценка примерного количества направляемых мод прямоугольного и круглого волноводов;
7. Расчет максимального количества мод в прямоугольном волноводе;
8. Выводы.

1.7. Контрольные вопросы

1. От чего зависит распределение поля в волноводной моде?
2. Какие типы мод бывают в волноводах?
3. Чем определяется количество мод волновода?
4. Где используются оптические волноводы прямоугольного и круглого сечения?

1.8. Список рекомендуемой литературы

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2004.
2. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990.
3. Интегральная оптика. Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978.
4. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.
5. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НА СВЕТОРАССЕЯНИЕ В ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с экспериментальными и расчетными методами определения потерь в оптических волноводах.

Предметом исследования в работе является изучение влияния светорассеяния на потери оптического сигнала в полимерном волноводе.

2.1. Общие сведения

Оптические волокна, используемые в волоконных линиях связи, должны обеспечивать минимальные потери информации при ее передаче на большие расстояния. Затухание оптического сигнала в волноводе связано с его поглощением и рассеянием. Минимальными потерями на поглощение и рассеяние обладают оптические волокна из высококачественного кварцевого стекла. Поэтому такие волокна, несмотря на их высокую стоимость, используются в дальних волоконных линиях связи. Оптические волокна из полимерных материалов значительно дешевле. Однако такие волокна обладают существенно более высокими потерями. Поэтому они применяются, в основном, в локальных волоконных линиях связи.

Основным фактором, приводящим к потерям в полимерных волноводах, является светорассеяние. Повышенное светорассеяние связано с наличием локальных неоднородностей плотности полимера и невозможностью создания на полимерном волокне идеально гладкой поверхности. Локальные неоднородности плотности полимера приводят к возникновению внутри волновода малых областей с измененным показателем преломления. Эти области являются рассеивающими центрами, выводящими часть электромагнитной энергии из волновода (рис. 2.1, *а*). На поверхности полимерного волновода (рис. 2.1, *б*) могут быть относительно крупные неоднородности (порядка или больше длины

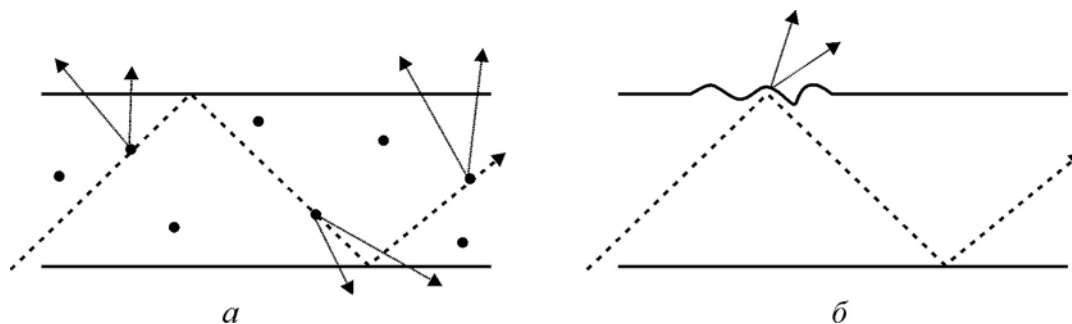


Рис. 2.1. Механизмы потерь на светорассеяние в полимерных волноводах

волны), либо наноразмерные неоднородности значительно меньшие длины волны. Первый тип неоднородностей может приводить к потерям при нарушении полного внутреннего отражения, за счет изменения угла падения луча на стенку волновода. Второй тип неоднородностей приводит к потерям только за счет светорассеяния.

Наноразмерные рассеивающие центры в полимере и на его поверхности можно приближенно рассматривать как сферические наночастицы, имеющие показатель преломления, отличный от показателя преломления окружающей среды. Сечение рассеяния таких наночастиц в дипольном приближении описывается выражением:

$$\sigma_s = \frac{128\pi^5 \varepsilon_h^2 r^6}{3\lambda^4} |\delta|^2, \quad \delta = 4\pi r^3 \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_h}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_h},$$

где ε_h и ε_p – диэлектрические проницаемости среды и наночастицы соответственно; r – радиус наночастицы; λ – длина волны излучения; δ – поляризуемость наночастицы. Для материалов без поглощения $\varepsilon = n^2$ (n – показатель преломления). Из данного выражения следует, что при увеличении длины волны излучения сечение рассеяния уменьшается пропорционально длине волны в четвертой степени. При увеличении радиуса наночастицы сечение рассеяния увеличивается пропорционально шестой степени радиуса.

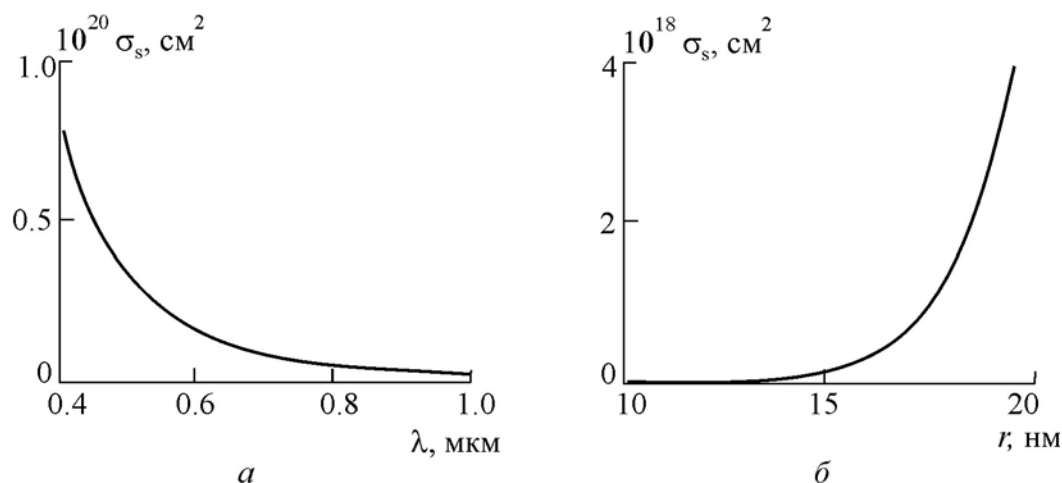


Рис. 2.2. Зависимость сечения светорассеяния от длины волны излучения (а) и радиуса рассеивающей частицы (б)

На рис. 2.2, а показана расчетная зависимость сечения рассеяния от длины излучения для наночастицы с $n_p = 1.51$, $r = 20$ нм, находящейся в среде с $n_h = 1.5$. Сильная зависимость рассеяния от длины волны приводит

к появлению спектральной дисперсии потерь полимерного волновода. Для наблюдения этой дисперсии в лабораторной работе используется широкополосный источник света – светодиод белого свечения. На рис. 2.2, б показана расчетная зависимость сечения рассеяния от радиуса наночастицы для фиксированной длины волны $\lambda = 650$ нм при $n_p = 1.51$ и $n_h = 1.5$. Из рисунка видно, что даже незначительное увеличение размера частиц приводит к существенному увеличению светорассеяния.

Коэффициент затухания (ослабления) оптического сигнала в волноводе обычно измеряется в дБ/м или в дБ/км. Расчет коэффициента затухания производится по формуле:

$$K = -\frac{10}{L} \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}} \eta},$$

где L – длина волновода; $P_{\text{ВЫХ}}$ – мощность излучения на выходе волновода; $P_{\text{ВХ}}$ – мощность источника излучения; η – эффективность ввода излучения в волновод. В этой лабораторной работе считается, что $\eta = 0.05$.

2.2. Измерительная установка

Схема измерительной установки показана на рис. 2.3. Источниками излучения (1) являются светодиод EP-2012-150-BW1 белого свечения, излучающий в спектральном интервале 450-700 нм и полупроводниковый лазерный модуль KLM-650-20, имеющий длину волны излучения 650 нм и среднюю мощность излучения 20 мВт. Питание светодиода и лазерного модуля осуществляется от источника постоянного напряжения (2). С помощью линзы (3) излучение лазера фокусируется на входной торце волновода (5). Фокусное расстояние линзы – 10 мм. При необходимости, мощность лазерного излучения ослабляется с помощью калиброванного ослабителя (4). Ослабитель изготовлен из цветного оптического стекла СС-1. Коэффициент пропускания ослабителя на длине волны 650 нм равен 37 %. Для фокусировки излучения светодиода используется конденсор, закрепленный на корпусе светодиода. Излучение с выходного торца

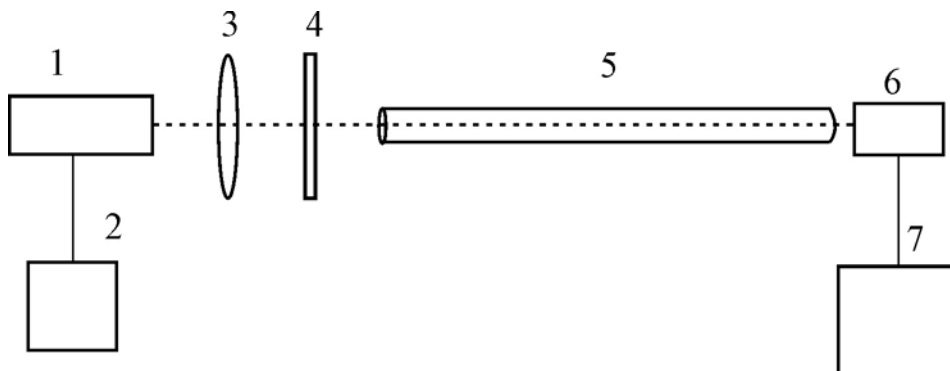


Рис. 2.3. Схема измерительной установки

волновода подается на кремниевый фотодиод (6) ФД-10К. Электрический сигнал с выхода фотодиода регистрируется милливольтметром (7).

В работе используются образцы прямоугольных волноводов, изготовленных из следующих полимерных материалов:

№ 1 – Полистирол, толщина 370 мкм;

№ 2 – Полистирол, толщина 150 мкм;

№ 3 – Лавсан, толщина 150 мкм;

№ 4 – Полистирол, толщина 80 мкм;

№ 5 – Ориентированный полипропилен, толщина 50 мкм;

Длина отрезков волноводов – 6 см. Отрезки волноводов, для предотвращения повреждения и загрязнения, помещены между пластинами из стекла и алюминия с чернением.

2.3. Задание и указания к его выполнению

1. С помощью лазерного модуля возбудить волноводные моды в отрезках оптических волноводов прямоугольного сечения.
2. Визуально оценить дисперсию потерь в волноводе, связанную со светорассеянием.
3. Измерить коэффициент затухания оптического сигнала в волноводах.

2.4. Указание мер безопасности

При работе с лазерным модулем необходимо принимать меры, исключающие попадание прямого или отраженного лазерного излучения в глаза.

2.5. Порядок выполнения работы

1. Подключите светодиод EP-2012-150-BW1 к источнику питания, соблюдая полярность;
2. Включите источник питания и установите напряжение 2.5...3 В;
3. Установите входной торец волновода № 3 в фокусе луча светодиода;
4. Вращая юстировочные винты столика со светодиодом добейтесь максимально яркого свечения выходного торца волновода;
5. Визуально определите цвет излучения, выходящего из торца волновода и распределение цвета выходящего через боковые поверхности волновода по его длине;
6. Повторите п. п. 3...5 для волновода № 1;
7. Выключите источник питания светодиода;
8. Подключите лазерный модуль KLM-650/20 к источнику питания, соблюдая полярность;
9. Включите источник питания и установите напряжение 4.5...5 В;

10. Установите входной торец волновода № 1 в фокусе лазерного луча;
11. Вращая юстировочные винты столика с лазером добейтесь максимально яркого свечения выходного торца волновода;
12. Расположите фотодиод вплотную к выходному торцу волокна, проведите точную юстировку лазера по максимуму сигнала фотодиода и зарегистрируйте максимальный сигнал фотодиода ($P_{\text{вых}}$);
13. Расположите фотодиод в фокус лазерного луча и зарегистрируйте сигнал фотодиода ($P_{\text{вх}}$);
14. Повторите п. п. 8...13 для одного из волноводов № 2...№ 5;
15. Выключите источник питания лазерного модуля.

2.6 . Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание потерь в оптических волноводах;
3. Схема и описание лабораторной установки;
4. Результаты наблюдения цвета излучения, выходящего из волновода при его возбуждении светодиодам белого свечения и объяснение наблюдаемого эффекта;
5. Расчет коэффициента затухания для двух волноводов;
7. Выводы.

2.7. Контрольные вопросы

1. С чем связано свечение боковых поверхностей полимерного волновода?
2. Чем определяется дисперсия потерь на светорассеяние в полимерном волноводе?

2.8. Список рекомендуемой литературы

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2004.
2. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.
3. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ SOI

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с методами расчета и оптимизации планарных оптических волноводов для интегральной оптики.

Предметом исследования в работе является изучение влияния толщины полупроводниковых и диэлектрических слоев на параметры кремниевого планарного волновода, изготовленного по технологии SOI.

3.1. Общие сведения

Планарный волновод представляет собой тонкий слой диэлектрика или полупроводника с высоким показателем преломления на подложке с низким показателем преломления. Среда над волноводом (например, воздух) также имеет низкий показатель преломления. Поперечное сечение планарного волновода ограничено только по вертикали, а в горизонтальном направлении – не ограничено. Волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления бывают симметричные и асимметричные. Соответствующие им распределения показателя преломления в поперечном направлении показаны на рис. 3.1.

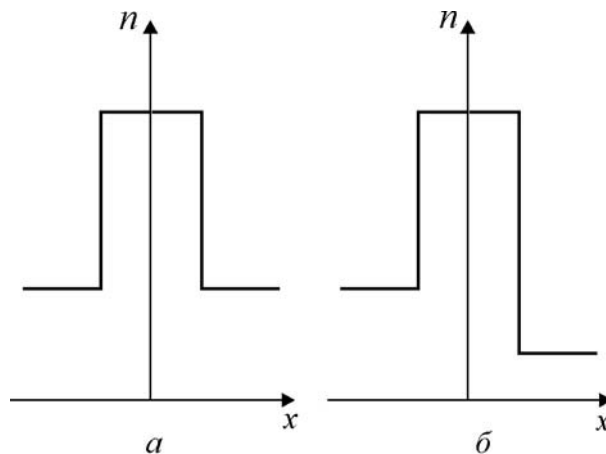


Рис. 3.1. Симметричный (а) и асимметричный (б) ступенчатые профили показателя преломления

В реальных интегрально-оптических устройствах наиболее часто используются асимметричные волноводы, так как они более технологичны. В спектральном интервале телекоммуникационных длин волн ($\lambda = 1 \dots 1.6$ мкм) используют планарные и полосковые волноводы из моно- и поликристаллического кремния, изготовленные по технологии SOI (silicon on insulator – кремний на изоляторе). Технология SOI состоит в том, что на подложке из монокристаллического кремния методом эпитаксии создают слой диэлектрика - диоксида кремния (SiO_2), имеющего низкий показатель преломления ($n = 1.45$). Поверх этого слоя методом эпитаксии формируют слой моно- либо поликристаллического кремния ($n = 3.48$), который является сердцевиной волновода (рис. 3.2). В том случае, если средой над пленкой кремния является воздух ($n = 1$), то данная структура образует планарный волновод с асимметричным профилем показателя преломления.

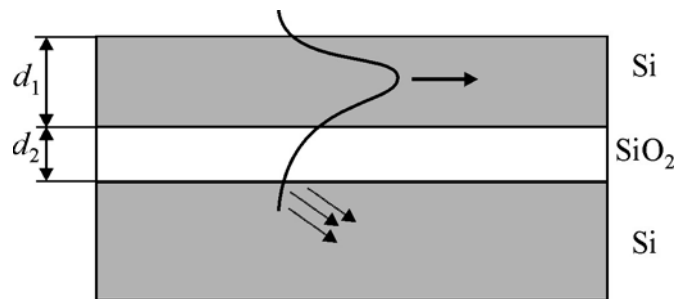


Рис. 3.2. Конструкция кремниевого волновода, изготовленного по технологии SOI

Толщины слоев кремния (d_1) и диоксида кремния (d_2) должны быть оптимизированы с точки зрения минимальных потерь оптического сигнала и минимальных технологических затрат. Минимальная толщина слоя кремния должна быть такой, чтобы в ней могла сформироваться направляемая мода с заданным индексом N (например, $N = 0$) на рабочей длине волны. Так как поле направляемой моды существует и вне сердцевины волновода, то при малой толщине слоя диоксида кремния это поле может проникать в кремниевую подложку (рис. 3.2). Из-за высокого показателя преломления кремния поле, проникшее в подложку, будет преобразовываться в излучательные моды, что приведет к потерям мощности оптического сигнала. Оптимальным, с точки зрения оптики, является изготовление слоя SiO_2 толщиной в десятки раз превышающей длину волны оптического сигнала. Однако, это не выгодно с технологической точки зрения. Поэтому требуется такая оптимизация толщины слоя SiO_2 при которой потери за счет вытекания мощности не превышают 5 % от полной мощности сигнала.

Рассмотрим планарный волновод, поперечное сечение которого ограничено только по одной координате: толщина волновода по оси x равна $d_1 = 2a$, ширина волновода по оси y бесконечна (рис. 3.3). Для определенности предположим, что профиль показателя преломления – асимметричный и $n_2 > n_3$. Учтем также, что для волноводного распространения электромагнитной волны необходимо, чтобы выполнялось условие $n_1 > (n_2, n_3)$.

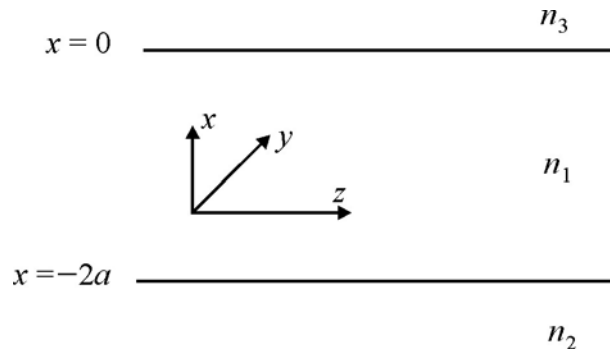


Рис. 3.3. Геометрия планарного волновода

Распространение лучей в планарном волноводе показано на рис. 3.4. Так как волновод в поперечном сечении ограничен только по оси x , то волноводное распространение лучей за счет полного внутреннего отражения возможно только в плоскости xz . Лучи, соответствующие моде низшего порядка ($N = 0$), падают на границы раздела сред с максимальным углом падения.

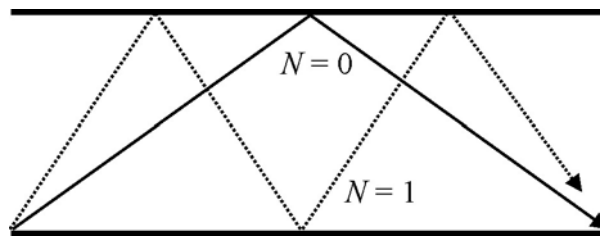


Рис. 3.4. Распространение лучей в планарном волноводе

Характеристическое уравнение для мод планарного волновода со ступенчатым профилем показателя преломления может быть получено в рамках лучевого приближения и методом решения волнового уравнения. Характеристическое уравнение для ТЕ-мод имеет следующий вид:

$$\operatorname{tg}(2aq - N\pi) = \frac{(p+r)q}{q^2 - pr}. \quad (3.1)$$

Здесь:

$$p^2 = \beta^2 - n_2^2 k^2, \quad q^2 = n_1^2 k^2 - \beta^2 \quad \text{и} \quad r^2 = \beta^2 - n_3^2 k^2.$$

Для ТМ-мод характеристическое уравнение примет следующую форму:

$$\operatorname{tg}(2aq - N\pi) = \frac{(n_3^2 p + n_2^2 r) n_1^2 q}{n_2^2 n_3^2 q^2 - n_1^4 pr}. \quad (3.2)$$

Решения характеристического уравнения в виде зависимостей константы распространения β от волнового числа k показаны на рис. 2.2.5. Из рисунка видно, что область допустимых значений для β , соответствующих направляемым модам, ограничена прямыми $\beta = kn_1$ и $\beta = kn_2$:

$$kn_3 \leq kn_2 \leq \beta \leq kn_1. \quad (3.3)$$

Условие отсечки для планарного волновода задается выражением $\beta = kn_2$.

На языке лучевого описания условие отсечки соответствует нарушению условия полного внутреннего отражения, а на языке модового описания – нарушению локализации поля электромагнитной волны внутри волновода и расплыванию поля.

Усредненное по времени значение потока энергии P в волноводе равно интегралу по поперечному сечению волновода от компоненты вектора Пойтинга в направлении оси z :

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} S_z dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z dx.$$

Полный поток энергии, распространяющийся в волноводе, представляет собой сумму мощностей, распространяющихся в каждой из трех областей волновода:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Отметим, что при вытекании электромагнитной волны в подложку, в случае тонкого слоя SiO_2 происходит уменьшение мощности P_3 , а следовательно и полной мощности сигнала в волноводе.

Для ТЕ-мод полный поток энергии можно представить в виде

$$P = \frac{\beta}{4\omega\mu_0} E_{y \max}^2 w_{\perp}.$$

Здесь $E_{y \max}$ – максимальное значение компоненты поля E_y ; w_{\perp} – эффективная ширина волновода для ТЕ-мод.

Для ТМ-мод полный поток энергии задается выражением

$$P = \frac{\beta}{4\omega\epsilon_0 n_1^2} H_{y \max}^2 w_{\parallel}.$$

Здесь $H_{y \max}$ – максимальное значение компоненты поля H_y ; w_{\parallel} – эффективная ширина волновода для ТМ-мод.

Для того чтобы получить распределение поля электромагнитной волны в волноводе, используется метод решения волновых уравнений. Ниже приведены выражения для распределения полей направляемых ТЕ-мод планарного волновода:

E -компонента:

$$E_y = \begin{cases} A \exp(-rx), & x \geq 0, \\ A \cos qx + B \sin qx, & 0 \geq x \geq -2a, \\ (A \cos 2aq - B \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x; \end{cases} \quad (3.4)$$

H -компонента:

$$H_z = -\frac{i}{\omega\mu_0} \begin{cases} -rA \exp(-rx), & x \geq 0, \\ q(-A \sin qx + B \cos qx), & 0 \geq x \geq -2a, \\ p(A \cos 2aq - B \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases}$$

Для направляемых ТМ-мод выражения для распределения поля принимают следующий вид:

H -компонента:

$$H_y = \begin{cases} C \exp(-rx), & x \geq 0, \\ C \cos qx + D \sin qx, & 0 \geq x \geq -2a, \\ (C \cos 2aq - D \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases}$$

E -компонента:

$$E_z = \frac{i}{\omega\epsilon_0} \begin{cases} -\frac{rC}{n_3^2} \exp(-rx), & x \geq 0, \\ \frac{q}{n_1^2} (-C \sin qx + D \cos qx), & 0 \geq x \geq -2a, \\ \frac{p}{n_2^2} (C \cos 2aq - D \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases} \quad (3.5)$$

Распределение E -компоненты поля ТЕ-моды планарного волновода для $N = 0$ и $N = 1$ показано на рис. 3.5.

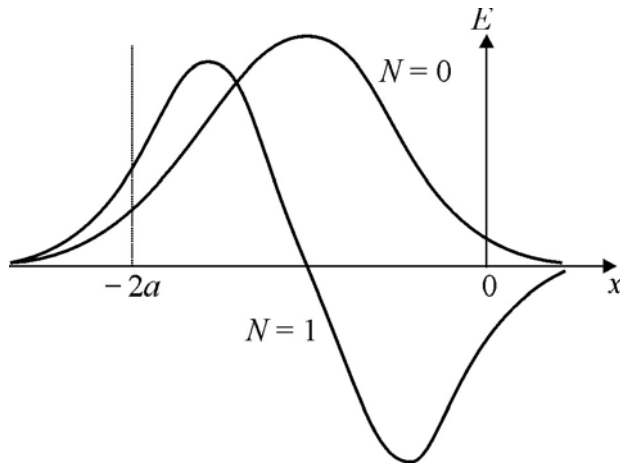


Рис. 3.5. Распределение E -компоненты поля ТЕ-моды планарного волновода

Из рисунка видно, что для низшей моды ($N = 0$) поле сосредоточено вблизи центральной оси волновода. Максимальная амплитуда поля в центре волновода равна $E_{2\max}$. Вне волновода электромагнитная волна также существует, однако ее амплитуда экспоненциально затухает по мере удаления от границы. Существование поля направляемой моды вне волновода является важным и полезным эффектом, который часто используется в оптических переключателях и коммутаторах, применяемых в интегральной оптике. В случае волноводов, изготовленных по технологии SOI, данный эффект является вредным, так как может приводить к потерям мощности оптического сигнала.

Для мод с более высокими индексами ($N \geq 1$) распределение поля усложняется (рис. 3.5). Однако при этом сохраняются основные свойства волны: сосредоточение поля в сердцевине волновода и его затухание вне этой области.

3.2. Методика численного моделирования

Для решения задачи оптимизации геометрии волновода методами численного моделирования необходимо подготовить программу в среде Mathcad. Для упрощения задачи оптимизации следует рассматривать волноводную структуру, в которой слой SiO_2 полубесконечный. Цель оптимизации – определить толщину слоя Si, при которой формируется заданная направляемая мода и расстояние от границы Si-SiO₂ в 3 области волноводной структуры до точки, в которой значение $(E_3/E_{2\max})^2$ не превышает 0.05. Это расстояние и будет оптимальной толщиной слоя SiO₂.

Программа численного моделирования имеет следующую структуру (рис. 3.6). Первый блок – исходные данные и определения. В этом блоке определяются обозначения параметров и символов и вводятся данные о показателях преломления, толщинах слоев, длине волны и параметрах моды: N , ТЕ- или ТМ-тип. Толщины слоев и длину волны рекомендуется

вводить в микрометрах. Второй блок – решение характеристического уравнения (3.1) или (3.2) относительно β для заданной волноводной моды. Рекомендуется для наглядности использовать графический метод решения. Решение ищется в области допустимых значений β (3.3). Проводится минимизация толщины слоя Si до значения, при котором решение характеристического уравнения еще существует. Третий блок – вычисление амплитуды поля волноводной моды в областях 2 и 3. Для этого используют выражения (3.4) или (3.5). Четвертый блок – построение графиков зависимостей $E_2(x)$ и $E_3(x)$. Пятый блок – вычисление значения E_{2max} , построение зависимости $(E_3(x)/E_{2max})^2$ и определение оптимальной толщины слоя SiO_2 .

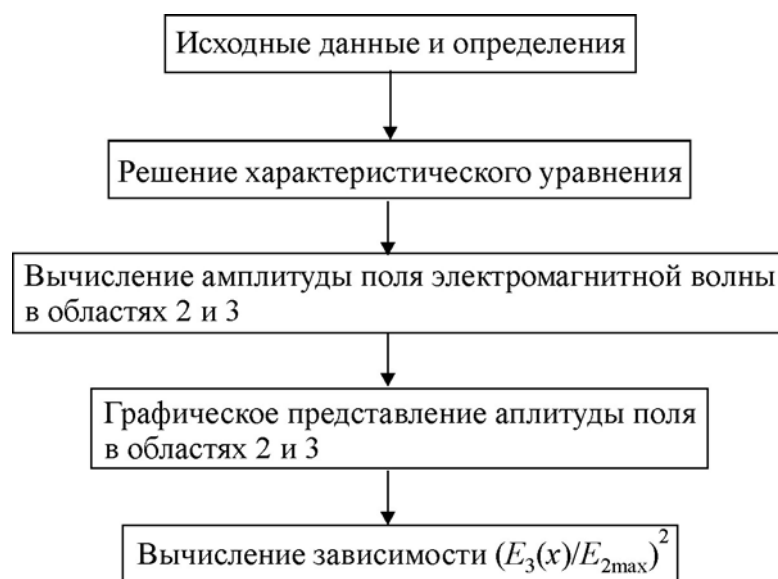


Рис. 3.6. Структура программы численного моделирования

3.3. Задание и указания к его выполнению

1. Вычислить оптимальную толщину слоя кремния для заданного типа волноводной моды и длины волны.
2. Вычислить оптимальную толщину слоя диоксида кремния для заданного типа волноводной моды и длины волны.

3.4. Порядок выполнения работы

1. Подготовить программу для численного моделирования в Mathcad;
2. Ввести в программу исходные данные: $n_1, n_2, n_3, d_2, N, \lambda$;
3. Определить оптимальную толщину сердцевины волновода;
4. Определить оптимальную толщину диэлектрического слоя.

Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание принципов волноводного распространения электромагнитных волн и основ технологии SOI;
3. Распечатку программы численного моделирования с графическим материалом;
4. Результаты оптимизации слоев кремния и диоксида кремния;
5. Выводы.

3.5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается технология SOI и каковы ее преимущества перед другими технологиями изготовления волноводов?
2. Для чего требуется оптимизировать толщины сердцевины волновода и промежуточного диэлектрического слоя?

3.7. Список рекомендуемой литературы

1. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990.
2. Интегральная оптика. Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978.
3. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.
4. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК Y-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное ознакомление с методом мультиплексирования оптических сигналов с помощью оптических волноводов.

Предметом исследования в работе является изучение распределения оптического сигнала Y-разветвителем.

4.1. Общие сведения

Y-разветвители используются для распределения оптического сигнала из одного волновода в два волновода. Название Y-разветвителя связано с его формой (см. рис. 4.1, а).

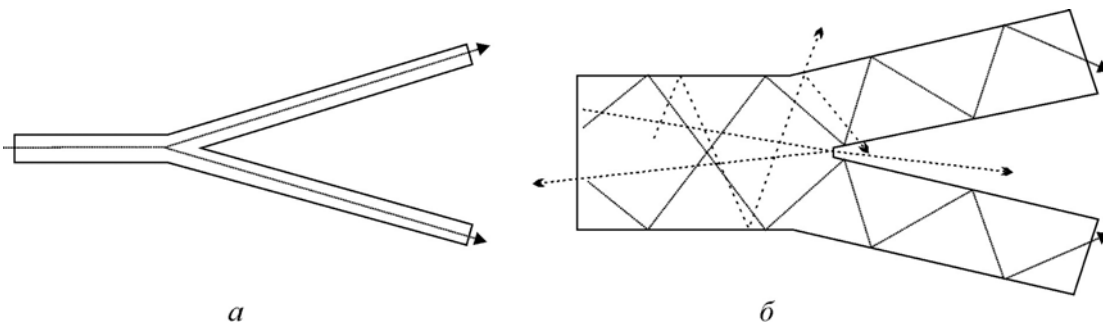


Рис. 4.1. Y-разветвитель.

Для волоконной оптики Y-разветвители изготавливаются путем приваривания двух выходных волокон к входному волокну. В интегральной оптике Y-разветвители изготавливают методами фотолитографии. Основными требованиями к Y-разветвителям являются:

1. Максимальная равномерность разделения оптического сигнала по выходным волноводам.
2. Минимальные потери проходящего излучения.
3. Минимальный отраженный сигнал.

На рис. 4.1, б показано распространение нескольких волноводных мод в области ветвления Y-разветвителя. Для обеспечения равномерности распределения оптического сигнала необходимо, чтобы плечи Y-разветвителя были абсолютно одинаковы и симметричны. Для обеспечения минимальных потерь необходимо, чтобы угол между осью входного волновода и осью каждого плеча был минимален. В противном случае часть излучения может выходить через боковые поверхности плеч Y-разветвителя из-за нарушения полного внутреннего отражения. В

области сращивания волноводов происходят потери сигнала для мод низших порядков, связанные с выходом излучения из волновода. Кроме того, в этой области возникает отраженный сигнал, распространяющийся по входному волноводу в обратном направлении.

4.2. Методика изготовления Y-разветвителей

Y-разветвители могут быть изготовлены из оптического волокна, а также из полосковых волноводов. При серийном производстве волоконные разветвители изготавливают путем сваривания кварцевых волокон сфокусированным лучом CO₂-лазера либо электрической дугой. Полосковые разветвители изготавливают методами фотолитографии из неорганических или полимерных пленок, нанесенных на диэлектрическую подложку.

В данной лабораторной работе Y-разветвители изготавливаются по упрощенной методике. Волоконный Y-разветвитель изготавливается на основе волокна из силикатного стекла с температурой плавления 600...700 °С. Торцы трех волокон совмещают на микронагревателе (рис. 4.2, а) и нагревают до температуры плавления стекла. При этом происходит сваривание торцов. Область соединения торцов имеет некоторое утолщение (рис. 4.2, б), приводящее к потерям оптического сигнала. Для уменьшения потерь величина утолщения должна быть минимизирована.

Полосковый Y-разветвитель изготавливают из пленки лавсана толщиной 150 мкм. Для этого к пленке прикладывают шаблон и обводят шаблон острым лезвием.

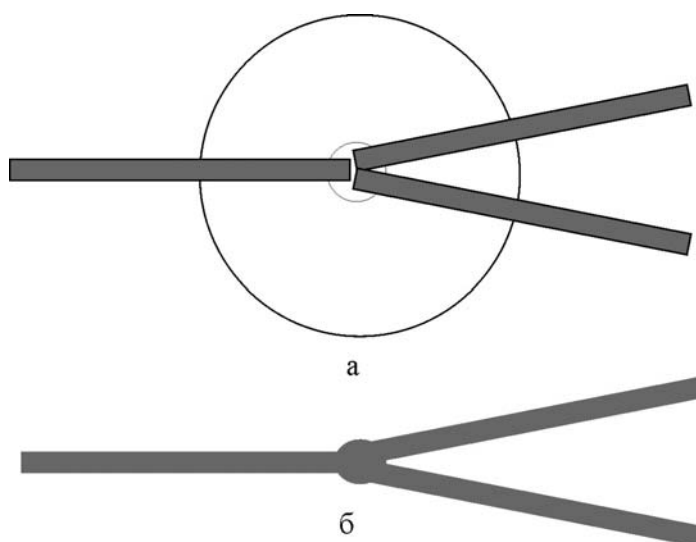


Рис. 4.2. Методика изготовления волоконного Y-разветвителя

4.3. Измерительная установка

Схема измерительной установки показана на рис. 4.3. Источником излучения (1) является полупроводниковый лазерный модуль KLM-D650-5, имеющий длину волны излучения 650 нм и среднюю мощность излучения 5 мВт. Питание лазерного модуля осуществляется от источника постоянного напряжения (2). С помощью линзы (3) излучение лазера фокусируется на входной торец Y-разветвителя (5). Фокусное расстояние линзы – 10 мм. При необходимости, мощность лазерного излучения ослабляется с помощью калиброванного ослабителя (4), изготовленного из цветного оптического стекла СС-1. Коэффициент пропускания ослабителя на длине волны 650 нм равен 37 %. Излучение с выходных торцов Y-разветвителя подается на кремниевый фотодиод (6) ФД-10К. Электрический сигнал с выхода фотодиода регистрируется милливольтметром (7).

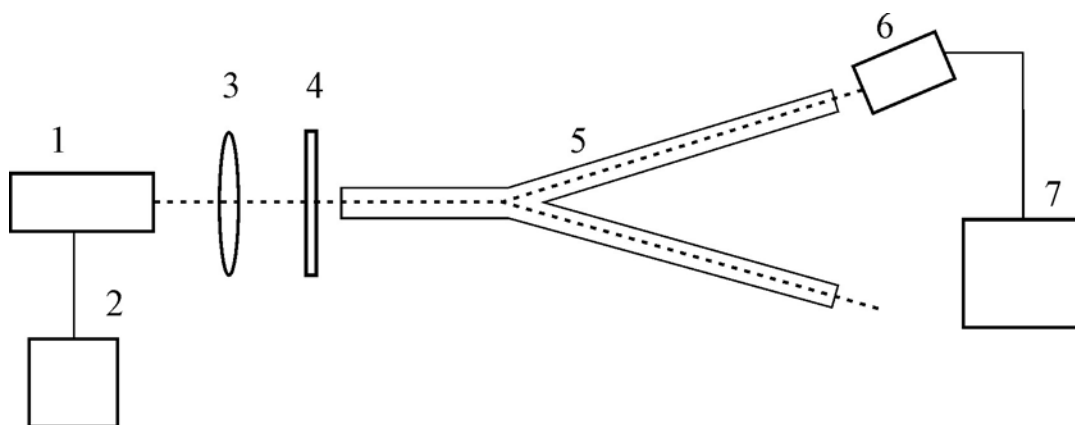


Рис. 4.3. Оптическая схема измерительной установки

4.3. Задание и указания к его выполнению

1. Изготовить волоконный либо полосковый Y-разветвитель;
2. С помощью лазерного модуля возбудить волноводные моды в Y-разветвителе.
3. Измерить равномерность распределения оптического сигнала на выходе Y-разветвителя.

4.4. Указание мер безопасности

При работе с лазерным модулем необходимо принимать меры, исключающие попадание прямого или отраженного лазерного излучения в глаза.

4.5. Порядок выполнения работы

1. Изготовьте Y-разветвитель;
2. Установите Y-разветвитель на юстировочный стол;
3. Подключите лазерный модуль KLM-D650-5 к источнику питания, соблюдая полярность;
4. Включите источник питания и установите напряжение 4.5...5 В;
5. Установите входной торец Y-разветвителя в луч лазерного модуля;
6. Вращая юстировочные винты столика с лазерным модулем добейтесь максимально яркого свечения выходных торцов Y-разветвителя;
7. Поместите фотодиод вплотную к первому выходу Y-разветвителя и измерьте сигнал фотодиода;
8. Поместите фотодиод вплотную ко второму выходу Y-разветвителя и измерьте сигнал фотодиода;
9. Выключите источник питания лазерного модуля.

4.6. Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание принципа работы в Y-разветвителя;
3. Схему и описание лабораторной установки;
4. Описание методики изготовления Y-разветвителя;
5. Результаты измерения распределения сигнала по выходам Y-разветвителя;
6. Выводы.

4.7. Контрольные вопросы

1. Для чего используются Y-разветвители?
2. Какие требования предъявляются к Y-разветвителям?
3. Чем вызваны потери оптического сигнала в Y-разветвителях?

4.8. Список рекомендуемой литературы

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2004.
2. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990.
3. Интегральная оптика. Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБМЕНА $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ ИЗ РАСПЛАВА СОЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с физико-химическими и технологическими процессами формирования оптических волноводов в стекле методом термического ионного обмена.

Предметом исследования в работе является изучение влияния технологических режимов термического ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ из расплава соли KNO_3 на геометрические характеристики оптического волновода.

5.1. Общие сведения

Ионный обмен является частным случаем процесса термической диффузии. Суть метода ионного обмена заключается в том, что ионы некоторых примесей при диффузии в объем материала способны замещать ионы этого материала. При этом замещенные ионы материала также благодаря диффузии выходят из него в окружающее пространство. Таким образом, ионный обмен позволяет изменить химический состав материала в тонком слое и, тем самым, изменить его оптические характеристики, например, показатель преломления.

В качестве ионов диффузантов обычно используются ионы щелочных металлов: Li^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , а также другие одновалентные катионы: Ag^+ , Cu^+ , Tl^+ . Ионный обмен, как правило, проводится в стеклах. Однако, волноводные структуры могут создаваться методом ионного обмена в ситаллах и диэлектрических монокристаллах со сложным химическим составом, например LiTaO_3 . Стекланные подложки в технологии ионного обмена обрабатываются в расплавах нитратов или сульфатов металлов, которые должны быть введены в стекло. Нитраты имеют относительно низкие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 200 \dots 400$ °С. Это позволяет производить ионный обмен в стеклах имеющих низкую температуру стеклования, например, в фосфатных стеклах. Сульфаты металлов имеют более высокие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 500 \dots 600$ °С. Это ограничивает номенклатуру стекол, в которых ионный обмен может быть произведен по сульфатной технологии.

В процессе ионного обмена одновалентные катионы стекла диффундируют из стекла в расплав, а одновалентные катионы расплава движутся в стекло. Главной движущей силой в этом случае является разность химических потенциалов. Схематично процесс ионного обмена показан на рис. 5.1 на примере обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$.

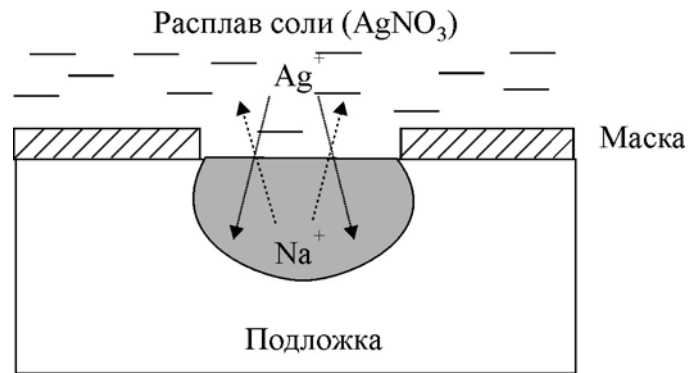


Рис. 5.1. Схема процесса ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$

При обмене катионов в стекле происходит изменение показателя преломления стекла. В зависимости от разницы поляризуемостей и радиусов катионов, а также от температуры обработки может происходить как увеличение, так и уменьшение показателя преломления. Изменение показателя преломления можно описать приближенной формулой:

$$\Delta n \approx C/V_0(\Delta\zeta/\zeta_0 - \Delta V/V_0).$$

Здесь C – концентрация введенных ионов; V_0 – объем стекла, нормированный на грамм атомов кислорода; $\Delta\zeta/\zeta_0$ – относительное изменение поляризуемости ионов при их замене; $\Delta V/V_0$ – относительное изменение объема стекла.

Например, при обмене ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава происходит увеличение показателя преломления за счет различия поляризуемостей ионов натрия и серебра. При этом вблизи поверхности стекла формируется тонкий слой, обладающий волноводными свойствами.

Существует ряд модификаций ионообменной технологии, позволяющих расширить диапазон реализуемых волноводных характеристик и эффективно ими управлять. Например, в процессе ионного обмена можно производить замену одного типа ионов стекла на два типа других ионов. Для этого расплав должен содержать две разные соли. Например, таким образом можно заменять ион натрия в стекле на ионы лития и калия из расплава. Аналогичным образом, если стекло исходно содержит два типа катионов щелочных металлов, их можно заменить на один иной катион щелочного металла из расплава. Примером является замена ионов натрия и калия в стекле на ион цезия из расплава. Для ускорения процесса ионного обмена, а также для заглубления волноводов в стекло используется внешнее электрическое поле. Для модификации профиля распределения показателя преломления волновода применяется термическая диффузия.

Эффективность ионного обмена и параметры формируемых волноводов в значительной степени зависят от состава и других характеристик ионообменного стекла. Для технологии ионного обмена подходят некоторые коммерческие оптические силикатные стекла. Метод

ионного обмена в сочетании с фотолитографией позволяет создавать не только планарные, но и внедренные полосковые волноводы. Для этого на поверхность стекла наносят слой (маску) материала, препятствующий ионному обмену и процесс происходит только в области, где маска отсутствует. После окончания ионного обмена маску удаляют химическим травлением.

Метод ионного обмена позволяет изготавливать волноводы с градиентным профилем показателя преломления.

Условиями протекания ионного обмена являются наличие градиента концентрации ионов и электрическая нейтральность стекла. Для проведения ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ используют расплав соли KNO_3 , находящийся в контакте со стеклом. Если контакт имеет место по всей поверхности стекла, то формируется планарный волновод. Для формирования полоскового волновода поверхность стекла закрывается маской (рис. 5.2).

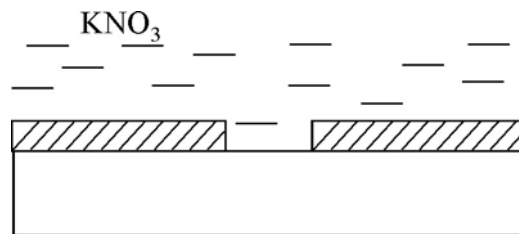


Рис. 5.2. Термический ионный обмен из расплава соли калия

Поток ионов j при ионном обмене описывается дифференциальным уравнением:

$$j = -D \nabla C,$$

где D – коэффициент диффузии ионов; C – концентрация ионов. Коэффициент диффузии ионов экспоненциально растет с ростом температуры:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right).$$

Здесь D_0 – константа, зависящая от типа примеси и материала, в котором происходит диффузия; E_a – энергия активации для скачка атома; k – постоянная Больцмана; T – температура диффузии.

При решении уравнения ионного обмена $\text{A}^+ \leftrightarrow \text{B}^+$ используют условие электронейтральности стекла в виде:

$$C_A + C_B = C_0,$$

$$\nabla(C_A + C_B) = 0.$$

Здесь $C_{A,B}$ – текущие концентрации ионов двух типов; C_0 – начальная концентрация ионов в стекле: $C_0 = C_A(t = 0)$.

Процесс ионного обмена проводят при температуре 300...500 °С в течение 0.5...5 час. При введении ионов калия в стекло изменение показателя преломления стекла может достигать $\Delta n = 0.01 \dots 0.02$.

5.2. Методика численного моделирования

Целью численного моделирования является построение профиля распределения концентрации ионов серебра в стекле при ионном обмене $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ из расплава соли KNO_3 . Моделирование проводится с помощью программы IONEX путем решения двумерного уравнения ионного обмена для заданных параметров ионов, температуры и длительности процесса. Описание программы IONEX и алгоритма работы с ней приведено в Приложении 4. Для данной лабораторной работы в меню «Process steps» – «Этапы процесса» (рис. П3) следует выбрать вид процесса ионного обмена, который будет использован при численном моделировании: «Thermal ion exchange from salt melt» - термический ионный обмен из расплава соли.

5.3. Задание и указания к его выполнению

Провести численное моделирование формирования волновода в стекле методом ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ из расплава соли для заданных концентрации ионов, температуры и длительности процесса.

5.4. Порядок выполнения работы

1. Активировать программу IONEX
2. Задать типы ионов, участвующих в обмене
3. Задать температурный режим, длительность процесса и параметры подложки
4. Задать вид технологического процесса
5. Запустить программу расчета
6. Получить контурные профили распределения концентрации ионов калия в стекле
7. Выключить программу.

5.5. Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание процессов при ионном обмене;

5. Контурный профиль пространственного распределения внедренных ионов в стекле.

5.6. Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в стекле при ионном обмене?
2. Как влияет температура на процесс ионного обмена?
3. Чем определяется пространственный профиль концентрации внедренных ионов при ионном обмене?
4. Какие типы оптических волноводов могут быть изготовлены методом ионного обмена?

5.7. Литература

1. Н.В. Никоноров, Г.Т. Петровский Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // Физ. и хим. стекла, Т. 25, № 1, С. 21, 1999.
2. Химическая технология стекла и ситаллов. Под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1983, 432 с.
3. К.К. Евстропьев Диффузионные процессы в стекле. Л.: Стройиздат, 1970, 168 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБМЕНА $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ ИЗ РАСПЛАВА СОЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с физико-химическими и технологическими процессами формирования оптических волноводов в стекле методом термического ионного обмена в присутствии электрического поля.

Предметом исследования в работе является изучение влияния технологических режимов термического ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ из расплава соли AgNO_3 в присутствии электрического поля на геометрические характеристики оптического волновода.

6.1. Общие сведения

Ионный обмен является частным случаем процесса термической диффузии. Суть метода ионного обмена заключается в том, что ионы некоторых примесей при диффузии в объем материала способны замещать ионы этого материала. При этом замещенные ионы материала также благодаря диффузии выходят из него в окружающее пространство. Таким образом, ионный обмен позволяет изменить химический состав материала в тонком слое и, тем самым, изменить его оптические характеристики, например, показатель преломления.

В качестве ионов-диффузантов обычно используются ионы щелочных металлов: Li^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , а также другие одновалентные катионы: Ag^+ , Cu^+ , Tl^+ . Ионный обмен, как правило, проводится в стеклах. Однако, волноводные структуры могут создаваться методом ионного обмена в ситаллах и диэлектрических монокристаллах со сложным химическим составом, например LiTaO_3 . Стекланные подложки в технологии ионного обмена обрабатываются в расплавах нитратов или сульфатов металлов, которые должны быть введены в стекло. Нитраты имеют относительно низкие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 200 \dots 400$ °С. Это позволяет производить ионный обмен в стеклах имеющих низкую температуру стеклования, например, в фосфатных стеклах. Сульфаты металлов имеют более высокие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 500 \dots 600$ °С. Это ограничивает номенклатуру стекол, в которых ионным обмен может быть произведен по сульфатной технологии.

В процессе ионного обмена одновалентные катионы стекла диффундируют из стекла в расплав, а одновалентные катионы расплава

движутся в стекло. Главной движущей силой в этом случае является разность химических потенциалов. Схематично процесс ионного обмена показан на рис. 6.1 на примере обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$.

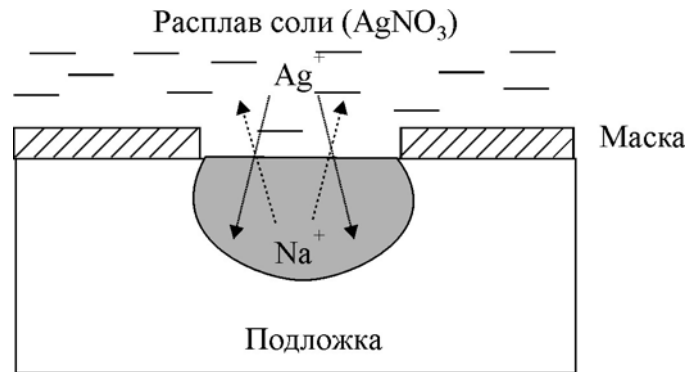


Рис. 6.1. Схема процесса ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$

При обмене катионов в стекле происходит изменение показателя преломления стекла. В зависимости от разницы поляризуемостей и радиусов катионов, а также от температуры обработки может происходить как увеличение, так и уменьшение показателя преломления. Изменение показателя преломления можно описать приближенной формулой:

$$\Delta n \approx C/V_0(\Delta\zeta/\zeta_0 - \Delta V/V_0).$$

Здесь C – концентрация введенных ионов; V_0 – объем стекла, нормированный на грамм атомов кислорода; $\Delta\zeta/\zeta_0$ – относительное изменение поляризуемости ионов при их замене; $\Delta V/V_0$ – относительное изменение объема стекла.

Например, при обмене ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава происходит увеличение показателя преломления за счет различия поляризуемостей ионов натрия и серебра. При этом вблизи поверхности стекла формируется тонкий слой, обладающий волноводными свойствами.

Существует ряд модификаций ионообменной технологии, позволяющих расширить диапазон реализуемых волноводных характеристик и эффективно ими управлять. Например, в процессе ионного обмена можно производить замену одного типа ионов стекла на два типа других ионов. Для этого расплав должен содержать две разные соли. Например, таким образом можно заменять ион натрия в стекле на ионы лития и калия из расплава. Аналогичным образом, если стекло исходно содержит два типа катионов щелочных металлов, их можно заменить на один иной катион щелочного металла из расплава. Примером является замена ионов натрия и калия в стекле на ион цезия из расплава. Для ускорения процесса ионного обмена, а также для заглубления волноводов в стекло используется внешнее электрическое поле. Для модификации профиля распределения показателя преломления волновода применяется термическая диффузия.

Эффективность ионного обмена и параметры формируемых волноводов в значительной степени зависят от состава и других характеристик ионообменного стекла. Для технологии ионного обмена подходят некоторые коммерческие оптические силикатные стекла. Метод ионного обмена в сочетании с фотолитографией позволяет создавать не только планарные, но и внедренные полосковые волноводы. Для этого на поверхность стекла наносят слой (маску) материала, препятствующий ионному обмену и процесс происходит только в области, где маска отсутствует. После окончания ионного обмена маску удаляют химическим травлением.

Метод ионного обмена позволяет изготавливать волноводы с градиентным профилем показателя преломления.

Условиями протекания ионного обмена являются наличие градиента концентрации ионов и электрическая нейтральность стекла. Для увеличения скорости процесса используют ионный обмен в электрическом поле. Для проведения ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ используют расплав соли AgNO_3 , находящийся в контакте со стеклом. Если контакт имеет место по всей поверхности стекла, то формируется планарный волновод. Для формирования полоскового волновода поверхность стекла закрывается маской (рис. 6.2).

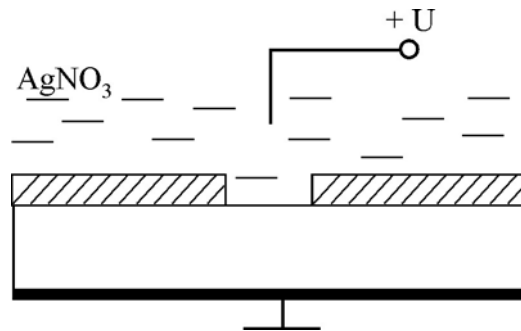


Рис. 6.2. Термический ионный обмен из расплава соли серебра в электрическом поле

Поток ионов j при ионном обмене описывается дифференциальным уравнением:

$$j = -D \nabla C,$$

где D – коэффициент диффузии ионов; C – концентрация ионов. Коэффициент диффузии ионов экспоненциально растет с ростом температуры:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right).$$

Здесь D_0 – константа, зависящая от типа примеси и материала в котором происходит диффузия; E_a – энергия активации для скачка атома; k – постоянная Больцмана; T – температура диффузии.

При приложении электрического поля с напряженностью E уравнения ионного обмена $A^+ \leftrightarrow B^+$ принимают вид:

$$j_A = -D_A \nabla C_A + \frac{C_A D_A e E}{k T F},$$

$$j_B = -D_B \nabla C_B + \frac{C_B D_B e E}{k T F}.$$

Здесь e – заряд электрона.

При решении уравнений ионного обмена $A^+ \leftrightarrow B^+$ используют условие электронеutrальности стекла в виде:

$$C_A + C_B = C_0,$$

$$\nabla(C_A + C_B) = 0.$$

Здесь $C_{A,B}$ – текущие концентрации ионов двух типов; C_0 – начальная концентрация ионов в стекле: $C_0 = C_A(t=0)$.

Решая уравнение ионного обмена можно получить профиль концентрации внедренных ионов B^+ в стекле:

$$C_B(z) = C_0 \left[1 + \exp \frac{j_0(1-M)}{D_B C_0} (z-d) \right]^{-1},$$

где $j_0 = i_0/F$; F – константа Фарадея; $M = D_B/D_A$; z – расстояние от поверхности стекла; $d = j_0 t / F C_0$; t – продолжительность процесса.

Скорость перемещения фронта внедряемых ионов растет при увеличении напряженности приложенного электрического поля и температуры процесса:

$$V = \sigma E / F C_0.$$

Здесь σ – ионная проводимость стекла:

$$\sigma = D C_0 e^2 / k T.$$

Процесс ионного обмена проводят при температуре 300...500 °C в течение 0.5...1 час. При введении ионов серебра в стекло изменение показателя преломления стекла может достигать $\Delta n = 0.04...0.08$.

6.2. Методика численного моделирования

Целью численного моделирования является построение профиля распределения концентрации ионов серебра в стекле при ионном обмене $Na^+ \leftrightarrow Ag^+$ из расплава соли $AgNO_3$ в присутствии электрического поля.

Моделирование проводится с помощью программы IONEX путем решения двумерного уравнения ионного обмена для заданных параметров ионов, температуры, длительности процесса и приложенного электрического напряжения. Описание программы IONEX и алгоритма работы с ней приведено в Приложении 4. Для данной лабораторной работы в меню «Process steps» – «Этапы процесса» (рис. П3) следует выбрать вид процесса ионного обмена, который будет использован при численном моделировании: «Field-assisted migration with salt melt» - ионный обмен из расплава соли в присутствии электрического поля.

6.3. Задание и указания к его выполнению

Провести численное моделирование формирования волновода в стекле методом ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ из расплава соли для заданных концентрации ионов, температуры, длительности процесса и значения электрического напряжения.

6.4. Порядок выполнения работы

1. Активировать программу IONEX
2. Задать типы ионов, участвующих в обмене
3. Задать температурный режим, длительность процесса и параметры подложки
4. Задать значение электрического напряжения
5. Задать вид технологического процесса
6. Запустить программу расчета
7. Получить контурные профили распределения концентрации ионов серебра в стекле
8. Выключить программу.

6.5. Содержание отчета

В отчете следует представить:

1. Цель работы;
2. Краткое описание процессов при ионном обмене;
3. Описание методики численного моделирования;
4. Исходные параметры и режимы технологического процесса;
5. Контурный профиль пространственного распределения внедренных ионов в стекле.

6.6. Контрольные вопросы

4. Какие процессы происходят в стекле при ионном обмене?
5. Как влияет температура на процесс ионного обмена?

1. Как влияет электрическое поле на процесс ионного обмена?
2. Чем определяется пространственный профиль концентрации внедренных ионов при ионном обмене?
3. Какие типы оптических волноводов могут быть изготовлены методом ионного обмена?

6.7. Литература

1. Н.В. Никоноров, Г.Т. Петровский Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // Физ. и хим. стекла, Т. 25, № 1, С. 21, 1999.
2. Химическая технология стекла и ситаллов. Под ред. Н.М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1983, 432 с.
3. К.К. Евстропьев Диффузионные процессы в стекле. Л.: Стройиздат, 1970, 168 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Создание планарного градиентного волновода методом термического ионного обмена.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Подложки для изготовления ионообменных волноводов - полированные пластинки стекла, содержащего в составе ионы щелочных металлов.

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ:

1. Ознакомление с основными методами создания планарных волноводов.
2. Ознакомление с основными принципами ионного обмена в стеклах.
3. Изготовление планарного градиентного волновода методом термического ионного обмена.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ:

1. Основные характеристики планарных волноводов

Ограничимся кратким рассмотрением физических явлений в планарных волноводах с целью определения их основных характеристик, необходимых для интерпретации экспериментальных результатов.

2. Методы создания планарных волноводов.

Развитие оптической связи и создание оптического компьютера во многом определяются качеством волноводных структур, применяемых в оптоэлектронике, их характеристиками, стоимостью технологии изготовления и т.д. В связи с этим большое значение приобретает метод создания волноводных структур, т.к. он определяет качество волноводов, области применения, стоимость и т.д. Для создания волноводов применяются различные технологии.

В интегральной оптике существуют два принципа при формировании профиля показателя преломления (ПП) планарных волноводов:

- 1) нанесение оптических пленок на поверхность подложки другого материала;
- 2) увеличение ПП в приповерхностных слоях подложки в результате химических или физических воздействий.

В первом случае изменение ПП скачкообразное (прямоугольный профиль), во втором - ПП пленки меняется плавно (градиентный профиль).

В соответствии с этим можно выделить два направления в методах изготовления волноводных слоев:

I. Пленочная технология (нанесение пленок на подложку). Основными методами нанесения пленок являются:

- осаждение материала из газовой среды

По способу активации и предварительного перевода материалов в газовую фазу физические методы подразделяются в свою очередь следующие:

а) Напыление нейтральными частицами (выбиваемыми из распыляемой мишени ускоренным потоком заряженных ионов, например, Ar^+ с энергией 0,1-10 кэВ):

- диодные и триодные (с дополнительным ускоряющим и управляющим электродом) системы;

- магнетроны (устройства, где на скрещенные электрическое и магнитное поле накладываются сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания, что приводит к образованию сложных спиралевидных траекторий заряженных частиц, которые имеют возможность разогнаться до высоких энергий);

- ионно-лучевое распыление.

б) Напыление заряженными частицами, которые разряжаются на подложках в процессе нанесения:

- тлеющий разряд;
- магнетронный разряд;
- дуговой разряд.

в) Термическое напыление:

- собственно термическое распыление материалов;
- пламенное;
- взрывное;
- световая дуга;
- плазменное.

При термическом напылении энергия осаждающихся частиц в 10-100 раз ниже, чем, например при конденсации заряженных частиц, соответственно значительно меньше и адгезия получаемых покрытий.

- нанесение пленок из жидкой фазы (метод полива с центрифугированием полимерного материала или применение технологии золь-гель).

II. Градиентная технология (изменение состава в поверхностном слое материала в результате введения модификатора или улета исходных компонентов материала, отвечающих за показатель преломления).

Выбор того или иного направления определяется конкретными задачами, которые выдвигаются при построении отдельных элементов или гибридных схем в целом, а также технологическими возможностями с

учетом требований, предъявляемых к волноводам и материалам, из которых они изготавливаются.

На сегодняшний день особый интерес представляют градиентные планарные волноводы. Градиентные волноводы обладают такими преимуществами перед пленочными, как низкие потери, возможность эффективного согласования профиля ПП планарного волновода с профилем ПП волокна. Градиентные волноводы на основе стекол характеризуются стабильностью параметров, высоким качеством поверхности, широким диапазоном изменения свойств в результате варьирования химического состава подложек или внедряемого модификатора, устойчивостью к разнообразным внешним воздействиям. Волноводы, полученные методами градиентной технологии, как правило, сохраняют акусто-, электро-, магнито- и нелинейно-оптические свойства исходных материалов.

Изготовление градиентных планарных волноводов может быть осуществлено методами ионной имплантации, эффузией, твердотельной диффузией, электростимулированной диффузией и ионным обменом.

1) Метод ионной имплантации.

Метод имплантации основан на изменении показателя преломления материала, подвергнутого облучению высокоэнергетическими протонами (1,5 МэВ) или тяжелыми ионами (20-200 кэВ). В результате взаимодействия этих частиц со структурой вещества происходит их торможение, а также смещение атомов вещества. Вследствие этого в поверхностном слое образуется плотная область смешанных атомов. Эти радиационные нарушения представляют большой интерес для создания волноводных слоев, так как именно они вызывают изменение ПП оптических материалов. Основное преимущество метода ионной (протонной) имплантации состоит в получении волноводных слоев с различными профилями ПП, а также в возможности использования для этих целей широкого класса оптических материалов. Однако данный метод требует дополнительной операции в технологической цепи - отжиг волноводных структур, а также сложной и дорогостоящей технологической аппаратуры, что затрудняет его широкое использование.

2) Метод эффузии.

В основу этого метода положена идея улетучивания различных компонентов материала, в состав которого эти компоненты вводились с целью уменьшения ПП. В результате этого улета в поверхностных слоях материала образуется область с повышенным ПП. Так, например, термообработка оптических стекол типа ЛК-1, КФ-10 ЛФ-9, содержащих легколетучие соединения фтора, повышает поверхностный показатель преломления и приводит к образованию волнонесущих слоев. Метод эффузии, связанный с нагревом ($T=60-200^{\circ}\text{C}$) образца на воздухе, является наиболее простым среди всех существующих способов изготовления

3. Описание методики численного моделирования;

4. Исходные параметры и режимы технологического процесса;

волноводов. При этом можно получать одномодовые и многомодовые волноводы с затуханием < 1 дБ/см. К недостаткам этого метода можно отнести узкий выбор материалов, содержащих легколетучие фтористые соединения, а также нестабильность поверхностных слоев этих материалов при комнатной температуре. В связи с этим возможности применения метода эффузии для задач интегральной оптики ограничены.

3) Электролиз.

Суть этого метода заключается в следующем. Под воздействием постоянного электрического поля, приложенного к расположенным на стеклянной пластине электродам, щелочные ионы смещаются к катоду, образуя слой с повышенной концентрацией. Одновременно под анодом образуется слой, обедненный щелочным металлом, если только его соединения не входили в состав материала анода. В зависимости от соотношения ПП стекла и окисла, ответственного за проводимость, волноводными свойствами будут обладать или прикатодный или прианодный слои обработанного стекла. Этот процесс проходит при напряженности электрического поля 300 В/мм и температурах ниже температуры стеклования стекла (T_g). Метод электролиза позволяет получать волноводные слои на широком наборе оптических стекол - щелочносиликатных, боросиликатных, свинцовосиликатных, фосфатных. При этом волноводные потери составляют 1-2 дБ/см. К настоящему времени методом электролиза получены волноводы с перепадом ПП $1,5 \cdot 10^{-3}$. Однако потенциальные возможности этого метода на сегодняшний день изучены недостаточно.

4) Метод твердотельной диффузии.

Этот метод основан на диффузии высокопреломляющего модификатора из пленки, предварительно нанесенной на поверхность стеклянной подложки. Модификатор, внедренный таким способом, увеличивает ПП в поверхностном слое стекла, что приводит к созданию волновода. Обычно этот процесс происходит при температурах выше T_g данного стекла.

Метод твердотельной диффузии позволяет использовать различные высокопреломляющие модификаторы и тем самым получать волноводы с различным перепадом ПП. Потери в таких волноводах составляют 1-3 дБ/см на длине волны 0,63 мкм. К недостаткам этого метода можно отнести то, что диффузия модификатора (как правило, ионов металлов - Ag^+ , Cu^+ , Tl^+ , Pb^+ , Sn^+) в стекло обычно вызывает окрашивание поверхностного слоя, что приводит к дополнительному поглощению волноводного излучения в различных участках спектра. Кроме того, высокая температура, при которой происходит твердотельная диффузия, может изменить различные свойства исходного стекла (например, качество поверхности, фоточувствительность фотохромных стекол и т.д.).

5) Ионный обмен.

Большой интерес при создании градиентных волноводных слоев представляет метод ионообменной диффузии. Суть метода заключается в обмене ионов щелочных металлов, содержащихся в стекле, на ионы других металлов из расплавов солей вследствие различия их химических потенциалов. Как правило, диффундирующие из расплава в стекло ионы имеют большую удельную рефракцию, чем ионы, диффундирующие из стекла в расплав, например Ag^+ , Li^+ , K^+ , Tl^+ , Rb^+ , $\text{Cs}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$. В результате такой замены происходит увеличение ПП в поверхностном слое стекла, что приводит к образованию волновода (Рис.5.1). Обычно ионный обмен проводят при температурах ниже T_g стекла.

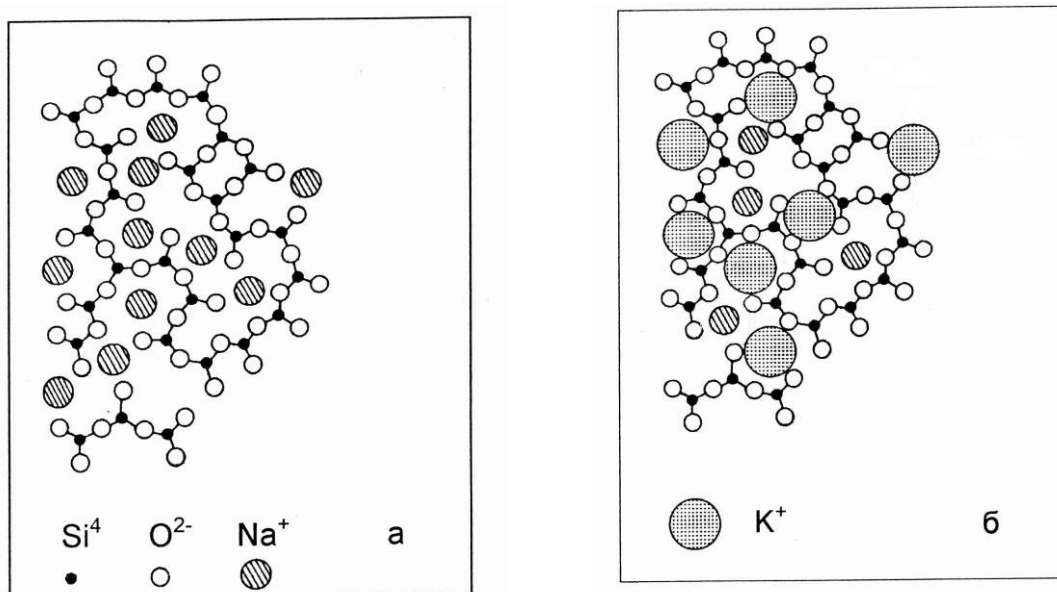


Рис. 5.1. Принцип ионного обмена на примере $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ обмена (а – схема сетки стекла до обмена; б - схема сетки стекла после обмена)

Полученные таким методом волноводы обладают минимальными потерями (0,2 - 0,5 дБ/см) по сравнению с волноводами изготовленными другими методами. Однако возможности свободной ионообменной диффузии ограничены существованием определенных наборов ионов - диффузантов для конкретных типов стекол.

Дальнейшее расширение ионов-диффузантов может быть достигнуто, например, путем электростимулированной диффузии. В методе электродиффузии получены волноводные слои с использованием одновалентных ионов - диффузантов Cs^+ , Rb^+ , Cu^+ , а также двухвалентных Zn^{2+} . Метод электродиффузии позволяет получать заглубленные волноводы с разнообразными профилями ПП (в том числе ступенчатые), а также позволяет изменять глубину волноводного слоя и ПП в значительных пределах ($h = 15 - 300$ мкм, $\Delta N = 0,01 - 0,07$). Несмотря на другие положительные качества электродиффузии - ускорение процесса и снижение температуры обработки, этот метод требует дополнительных и

трудоемких операций в технологической цепи, что усложняет его широкое использование.

Среди перечисленного ассортимента ионов - диффузантов можно выделить K^+ . Ион K^+ представляет собой не поглощающий в видимой и ближней ИК области спектра модификатор. Использование K^+ позволяет получать волноводы хорошего оптического качества с рекордно малыми потерями ($\sim 0,2$ дБ/см). Кроме того, образцы стекла, обработанные в расплавах нитратов калия, обладают повышенной механической прочностью, что в настоящее время широко используется в практике упрочнения стекла. Следует также отметить, что низкотемпературный ионный обмен в расплаве KNO_3 приводит к увеличению термостойкости, абразивоустойчивости, химической устойчивости, микротвердости и оптической прочности поверхности стеклянных образцов.

Известны две технологические схемы ионно-обменной диффузии - *термодиффузия* и *электродиффузия*.

В оптоэлектронике и интегральной оптике термодиффузию (ТД) можно определить как диффузию ионов (или атомов) из расплава в подложку под действием градиента концентрации при относительно высокой температуре. Ионно-обменная диффузия, как правило, применяется для создания волноводов в стеклах.

В качестве диффундируемых ионов используются, как правило, катионы нитратов, нитритов или сульфатов одновалентных элементов или их смеси в различных пропорциях. Расплавляя эти вещества (температуры их плавления лежат в пределах $200 - 650^\circ\text{C}$) мы тем самым увеличиваем коэффициент диффузии D как диффундируемых ионов, так и ионов, находящихся в стекле. Вследствие этого возрастает коэффициент интердиффузии и, следовательно, протекает эффективный обмен ионами, приводящий к формированию волноводного слоя в стекле. Повышение рабочей температуры процесса ТД до температур размягчения специальных видов стекол ($\sim 650^\circ\text{C}$) действительно увеличивает коэффициент диффузии, что позволяет в короткое время формировать волноводы и при достаточно больших подвижностях ионов в соответствующих стеклянных матрицах удается получать многомодовые волноводы.

Несколько слов о механизме образования волновода. Возрастание или убывание показателя преломления при замене одного иона другим является результатом комбинации двух главных эффектов: эффекта, обусловленного разными размерами ионов (или атомов) обменивающихся элементов (при замене иона с большим радиусом на меньший, решетка (или вещество) коллапсирует, образуя более плотную структуру и, следовательно, показатель преломления возрастает), и эффекта, обусловленного разной электронной поляризуемостью ионов (при замене иона с меньшей поляризуемостью на ион с большей поляризуемостью показатель преломления возрастает).

Как уже отмечалось выше, технология ионно-обменной диффузии относительно проста и дешева. Специальных требований к печи нет - атмосфера воздушная, рабочие температуры в пределах 200 – 650°C, стабилизация рабочей температуры $\pm 1^\circ\text{C}$. Однако для получения однородных по всей поверхности подложки волноводов желателен однородный нагрев всего объема, в котором протекает диффузия и хорошая стабилизация температуры ($\sim 0,1^\circ\text{C}$). ТД - технологическая схема представляет собой, как правило, вертикальную шахтную печь с продольным обогревом. Сосуд с расплавляемым веществом помещается в печь в середину нагреваемого участка, что обеспечивает равномерный нагрев. Вертикальное расположение печи позволяет термостатировать ее только снизу и с боковой поверхности. Образующийся градиент температуры за нагреваемой областью направленный вверх позволяет плавно прогревать образец перед погружением в расплав путем постепенного опускания образца вниз к расплаву (Рис.5.2).

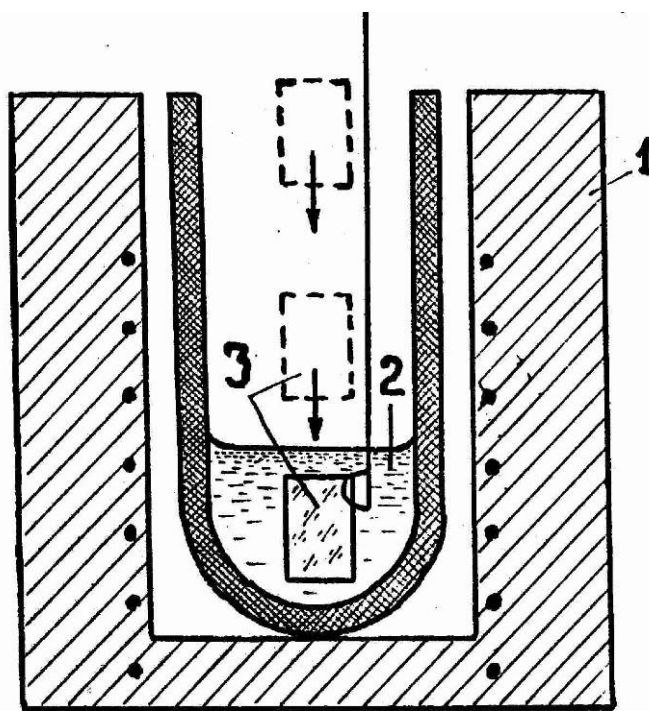


Рис.5.2. Схема термодиффузионной установки: 1 – печь, 2 - расплав соли, 3 - стеклянная подложка, постепенно опускаемая к расплаву.

Большое прикладное значение имеет профиль показателя преломления (ПП) получаемых ТД-волноводов. Процесс ТД однозначно формирует градиентный ПП, хотя во многих прикладных задачах (например, согласование волноводов с волоконно-оптическими световодами) требуется более резкий ПП.

Таким образом, создание многомодовых волноводов и получение волноводов с более резким ПП во многих случаях в рамках ТД-технологии

практически невозможно. Задача получения многомодовых волноводов с резким ПП разрешима, если использовать метод электродиффузии.

Основные отличия метода электродиффузии от метода ТД заключаются в следующем. Во-первых, процесс ТД есть двунаправленный процесс: ионы из расплава внедряются в стекло, соответственно ионы из стекла диффундируют в расплав. Процесс электродиффузии в основном однонаправленный процесс - ионы и в расплаве, и в стекле двигаются по полю. Конечно же, протекает и свободный ионный обмен под действием градиента концентрации, т.е. двунаправленный процесс ТД, но доля его в общем однонаправленном поступательном движении ионов по полю крайне мала, особенно для малоподвижных ионов, т.е. когда коэффициенты диффузии такого ТД-процесса малы. Именно благодаря этому моменту удастся получать значительно более резкий ПП и именно в такой ситуации наиболее отчетливо проявляются преимущества электродиффузии перед ТД. Следует отметить, что методом электродиффузии возможно обменивать не только ионы щелочных металлов с близкими ионными радиусами, но и вводить такие крупные ионы, как Cs^+ и Tl^+ , термическая диффузия которых сильно заторможена.

Во-вторых, процесс электродиффузии - объемный процесс, во всем расплаве, на поверхности раздела расплав-подложка и во всей подложке, в то время как ТД - чисто поверхностный процесс в тонком слое расплав-подложка.

В-третьих, в зависимости от величины поля меняется не только скорость ионного обмена, но и при достаточной величине электрического внешнего поля возможно движение каких-либо анионов из подложки на поверхность расплав-подложка, где и формируется волновод. Внутреннее перераспределение заряда, протекающее под действием внешнего поля и, следовательно, создающее внутреннее, собственное поле, возникающее вследствие того, что система подложка - формируемый волновод не успевает прийти в термодинамическое равновесие, приводит к значительным изменениям как процесса формирования волновода, так и самого волновода.

Существует два способа электродиффузии – 1) когда к системе расплав-подложка прикладывается постоянное электрическое поле и, следовательно, через подложку протекает постоянный ионный ток - электродиффузия постоянного тока (ЭПТ) и 2) импульсная электродиффузией (ИЭД) - когда к системе расплав-подложка прикладывается сильное кратковременное электрическое поле.

Технология ЭПТ несколько сложнее. Сложности возникают при решении проблемы изоляции 2-х электродов (рис.5.3 и рис 5.4). Вследствие капиллярных явлений возможно короткое замыкание электродов, т.к., как правило, при диффузии из расплава, оба электрода являются расплавленными солями диффузантов. Возможна, конечно, твердотельная диффузия. В этом случае короткое замыкание исключено,

однако сложности с воспроизводимостью слоев, особые требования к качеству поверхности, низкое приращение показателя преломления, большие потери и т.д. все еще не преодолены. Более перспективным направлением развития ионно-обменной диффузии без жидкой фазы является применение специальных паст.

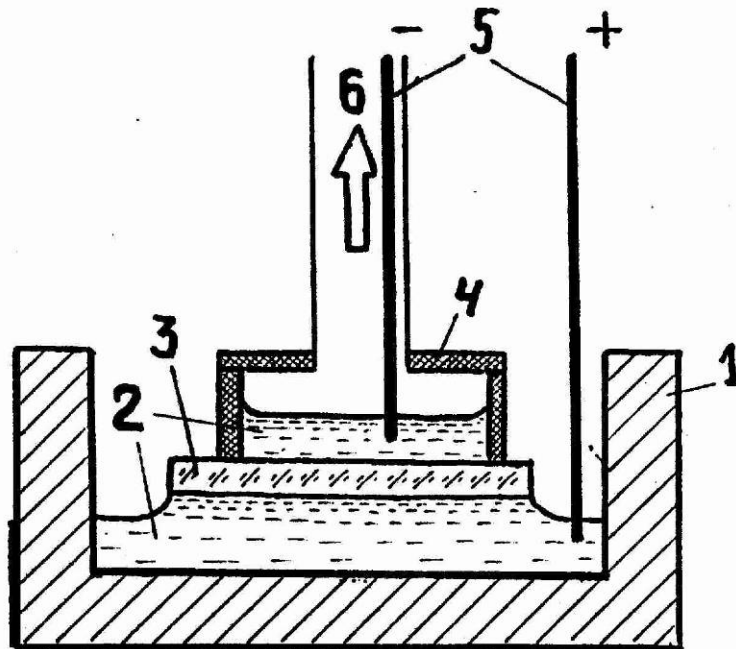


Рис. 5.3. Схема установки электродиффузии постоянного тока с использованием вакуумного прижима для электроизоляции катода и анода: 1 - тигель, 2 - расплав-анод и расплав-катод (как правило, одинаковые соли), 3 - стеклянная подложка, 4 - вакуумный прижим, 5 - металлические подводящие провода, 6 - к вакуумному насосу.

Следует также отметить, что ЭПТ-технология используется также и для заглабления волновода. ЭПТ-заглабления, как и ЭПТ-изготовление волноводов применяется для получения более резких, чем у ТД-волноводов профилей ПП.

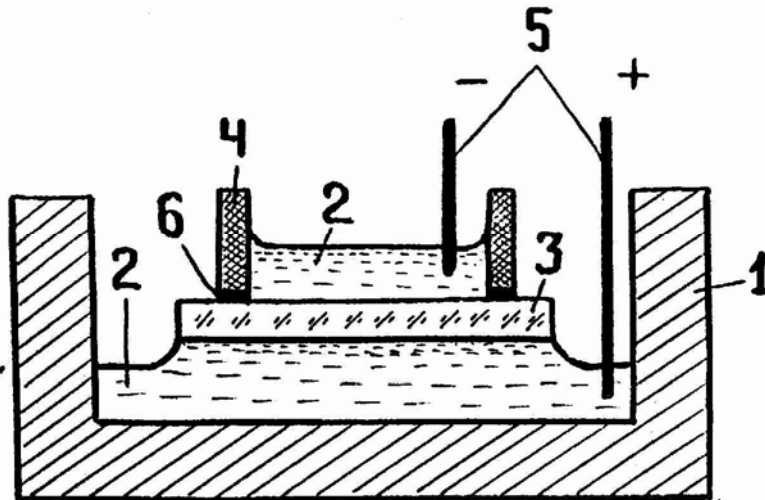


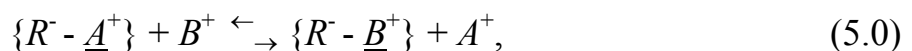
Рис.5.4. Схема установки электродиффузии постоянного тока с использованием охранного кольца для электроизоляции катода и анода: 1 - тигель; 2 - расплав-анод и расплав-катод; 3 - стеклянная подложка; 4 - охранное кольцо; 5 - металлические подводящие провода; 6 - слой специального клея.

Однако, имеется ряд недостатков. ЭПТ-технология сложнее ТД-технологии, качество ЭПТ-волноводов низкое. Кроме того, однородность ЭПТ-волноводов по длине образца заметно хуже ТД-волноводов. В основном по этим причинам метод ЭПТ относительно плохо изучен и значительно менее распространен, чем ТД.

Таким образом, среди рассмотренных методов создания градиентных волноводов особое место занимает метод ионообменной диффузии. Этот метод обладает рядом преимуществ - простота, технологичность, воспроизводимость. Диффузионные волноводы могут быть получены - с разнообразными параметрами, на широком наборе силикатных стекол при использовании различных ионов - диффузантов, с хорошим качеством поверхности и однородностью, с низким затуханием и повышенной механической прочностью (для K^+ - диффузионных волноводов).

3. Некоторые сведения из теории диффузии.

Ионообменная реакция представляет собой обратимую химическую реакцию. В общем виде ее можно записать следующим образом:



где R^- - матрица ионообменного материала с фиксированным ионом; \underline{A}^+ и \underline{B}^+ - подвижные противоионы.

Если рассматривать реакцию (1) применительно к случаю обработки силикатного стекла с подвижными ионами A^+ в расплаве соли, содержащей ионы B^+ , то ее кинетика определяется скоростями следующих разделенных во времени и пространстве последовательных стадий: 1) доставки иона B^+

из объема расплава к поверхности стекла; 2) доставки иона B^+ от поверхности стекла к активным группам R^-A^+ ; 3) химической реакции обмена ионов $A^+ \leftrightarrow B^+$; 4) отвода иона A^+ от места обмена к поверхности стекла; 5) отвода иона A^+ от поверхности стекла в объем расплава. Совокупное рассмотрение всех стадий ионного обмена трудно осуществимо, поэтому прибегают к упрощению, основанному на известном кинетическом принципе лимитирующей стадии - скорость многостадийного процесса определяется скоростью наиболее медленной стадии. Нетрудно убедиться, что наиболее медленными являются стадии 2 и 4. Поэтому в основу количественных теорий ионного обмена необходимо положить диффузию ионов в стекле.

Диффузия – процесс переноса материи или энергии из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Представления о сути явления и его количественное описание базируются на трех основных подходах: статистическом, термодинамическом и феноменологическом.

Статистический подход рассматривает перемещение частицы в среде по механизму случайных блужданий. Вероятность осуществления диффундирующей частицей элементарного акта перемещения в конденсированной фазе на расстояние x определяется подвижностью β , которая характеризует как свойства самой частицы, так и свойства среды, и времени t прохождения частицы от одной потенциальной ямы до другой

$$\langle x^2 \rangle = 2k_B\beta Tt = 2Dt, \quad (5.1)$$

где k_B - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, D - коэффициент диффузии. Из (5.1) следует известное уравнение Нернста-Эйнштейна:

$$D = k_B\beta T. \quad (5.2)$$

Согласно термодинамике необратимых процессов движущей силой переноса вещества i в изотермических условиях является градиент химического потенциала

$$J_i = L_i \text{grad } \underline{\mu}_i, \quad (5.3)$$

По определению $\underline{\mu}_i = \underline{\mu}_0 + RT \ln a_i$. Тогда:

$$J_i = [L_i RT / a_i] \text{grad } a_i = -D_i \text{grad } a_i, \quad (5.4)$$

где a_i - термодинамическая активность; L_i - коэффициент переноса; J_i - диффузионный поток; $D_i = -L_i RT / a_i$ - коэффициент диффузии.

Скорость диффузии пропорциональна площади поперечного сечения образца, а также разности концентраций.

По феноменологической теории скорость переноса диффундирующего вещества через сечение единичной площади прямо

пропорциональна градиенту концентрации c_i в направлении нормальном к плоскости сечения:

$$J_i = -D_i \text{grad} c_i, \quad (5.5)$$

$$dc_i/dt = \text{div}(D_i \text{grad} c_i). \quad (5.6)$$

Эти уравнения известны под названием первого и второго законов Фика. В случае одномерной диффузии они упрощаются:

$$J_i = -D_i (dc_i/dx), \quad (5.7)$$

$$\partial c_i / \partial t = \partial / \partial x [D_i (\partial c_i / \partial x)]. \quad (5.8)$$

Независимые расчеты приводят к одному и тому же значению коэффициента диффузии только в случае самодиффузии и диффузии в идеальных газах и растворах. В общем случае понятие коэффициента диффузии необходимо уточнять в соответствии с особенностями конкретного механизма процесса участвующих в нем частиц и структуры среды.

С точки зрения термодинамики движущим потенциалом любого выравнивающего процесса является рост энтропии. При постоянных давлении и температуре в роли такого потенциала выступает химический потенциал μ , обуславливающий поддержание потоков вещества.

Химический потенциал μ – один из термодинамических параметров системы, а именно энергия добавления одной частицы в систему без совершения работы. Определение химического потенциала можно записать в виде:

$$dE = TdS - PdV + \mu dN \quad (5.9)$$

где E — энергия системы, S — её энтропия, N — количество частиц в системе.

Эта формула определяет, кроме химического потенциала μ , также давление P и температуру T .

Можно доказать, что химический потенциал задаётся формулой

$$\mu = \frac{E - TS + PV}{N} = \frac{G}{N}, \quad (5.10)$$

где G — потенциал Гиббса.

Если энергия системы зависит не от объёма, а от других термодинамических параметров A_1, A_2, \dots , исходная формула принимает вид

$$dE = TdS - \sum a_i dA_i + \mu dN \quad (5.11)$$

Если в системе имеется несколько разных типов частиц, то есть столько же разных химических потенциалов.

Поток частиц вещества пропорционален при этом градиенту потенциала

$$J \sim - (d\mu/dx)_{p,T} \quad (5.12)$$

В большинстве практических случаев вместо химического потенциала применяется концентрация C . Прямая замена μ на C становится некорректной в случае малых концентраций, так как химический потенциал связан с концентрацией по логарифмическому закону. Если не рассматривать такие случаи, то выше приведённую формулу можно заменить на следующую:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (5.13)$$

которая показывает, что плотность потока вещества J [см⁻²с⁻¹] пропорциональна коэффициенту диффузии D [см²с⁻¹] и градиенту концентрации. Это уравнение выражает первый закон Фика. Второй закон Фика связывает пространственное и временное изменения концентрации (уравнение диффузии):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5.14)$$

Коэффициент диффузии D зависит от температуры. Температурная зависимость коэффициента диффузии подчиняется уравнению Аррениуса

$$D = A_D \exp(-U_D/RT), \quad (5.15)$$

где A_D - предэкспоненциальный множитель; U_D - кажущаяся энергия (энтальпия) активации; T - абсолютная температура; R - газовая постоянная. Энергию активации диффузии определяют как

$$U_D = -R [d \ln D / d (1/T)]. \quad (5.16)$$

В результате анализа методов градиентной технологии в качестве метода изготовления планарных волноводов в данной работе выбрана низкотемпературная ионообменная диффузия из расплава солей $AgNO_3$ (5 мол.%) - $NaNO_3$ (95 мол.%). В качестве объекта исследования будем использовать промышленные силикатные стекла - оптическое бесцветное К-8 и техническое стекло Na28 (предметное стекло для микроскопии). Оба этих стекла имеют в составе катионы Na^+ .

В процессе формирования поверхностного слоя с повышенным показателем преломления стеклянный образец приводится в контакт с расплавом соли, содержащим ионы, способные обмениваться с ионами стекла. Параметрами ионообменной диффузии, определяющими свойства модифицированного слоя, являются: время контакта стекла с солевым расплавом, температура процесса и состав солевого расплава.

ПОРЯДОК РАБОТЫ:

1. Вычистить стеклянную подложку.
2. Поместить подложку в муфельную печь на 10-15 минут для предварительного прогрева.
3. Поместить подложку в чашку с расплавом и засечь время.
4. По истечении заданного времени ионного обмена (15 мин. – 1 час) вынуть стеклянную пластинку из расплава и поместить ее в прогретый тигель для охлаждения.
5. Отмыть стеклянную пластинку с волноводом водой от остатков соли.

ВНИМАНИЕ!

Горячих предметов руками не касаться. Использовать специальные щипцы и пинцет. Работать в теплозащитных перчатках и защитных очках.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Каким образом можно сформировать профиль показателя преломления планарного волновода?
2. Перечислите основные методы получения волноводов и их особенности.
3. В чем заключается принцип ионного обмена?
4. В чем состоит принципиальное отличие иона – диффузанта K^+ от остальных?
5. Какие технологические схемы ионно-обменной диффузии Вы знаете?
6. Перечислите основные преимущества метода ионного обмена.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тамир Т. Интегральная оптика. – Москва: "Мир", 1978.
2. Барноски М. Введение в интегральную оптику. – Москва: "Мир", 1977.

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ВОЛНОВОДОВ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Создание планарного пленочного волновода золь-гель методом.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Подложки для изготовления волноводов - полированные пластинки стекла.

Прекурсоры содержащие TiO_2 , ZrO_2 , SiO_2

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ:

1. Ознакомление с основными методами создания планарных волноводов.
2. Ознакомление с основными принципами золь-гель технологии.
3. Ознакомление с основными методами нанесения пленок из жидкой фазы.
3. Изготовление планарного пленочного волновода золь-гель методом.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ:

В интегральной оптике существуют два принципа при формировании профиля показателя преломления (ПП) планарных волноводов:

- 1) нанесение оптических пленок на поверхность подложки другого материала;
- 2) увеличение ПП в приповерхностных слоях подложки в результате химических или физических воздействий.

В первом случае изменение ПП скачкообразное (прямоугольный профиль), во втором - ПП пленки меняется плавно (градиентный профиль).

I. Пленочная технология (нанесение пленок на подложку). Основными методами нанесения пленок являются:

1. - осаждение материала из газовой среды

По способу активации и предварительного перевода материалов в газовую фазу физические методы подразделяются в свою очередь следующие:

а) Напыление нейтральными частицами (выбиваемыми из распыляемой мишени ускоренным потоком заряженных ионов, например, Ar^+ с энергией 0,1-10 кэВ):

- диодные и триодные (с дополнительным ускоряющим и управляющим электродом) системы;

- магнетроны (устройства, где на скрещенные электрическое и магнитное поле накладываются сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания, что приводит к образованию сложных спиралевидных траекторий заряженных частиц, которые имеют возможность разогнаться до высоких энергий);

- ионно-лучевое распыление.

б) Напыление заряженными частицами, которые разряжаются на подложках в процессе нанесения:

- тлеющий разряд;
- магнетронный разряд;
- дуговой разряд.

в) Термическое напыление:

- собственно термическое распыление материалов;
- пламенное;
- взрывное;
- световая дуга;
- плазменное.

При термическом напылении энергия осаждающихся частиц в 10-100 раз ниже, чем, например при конденсации заряженных частиц, соответственно значительно меньше и адгезия получаемых покрытий.

2. - нанесение пленок из жидкой фазы (метод нанесения полимерного материала или применение технологии золь-гель)

Самым известным применением золь-гель технологии является формирование тонкой пленки на поверхности. Первый патент на изготовление силикатного покрытия с помощью этой технологии был выдан в 1939 году. Сегодня с использованием золь-гель технологии производят защитные и оптические покрытия, разнообразные сенсоры, неорганические мембраны и т.д.

Нанесение покрытия на стекло может осуществляться несколькими способами. В зависимости от необходимого эффекта выбирается определенный материал покрытия (прекурсор) и технология нанесения пленки. Материалы покрытия более или менее стандартизированы, в отличие от используемого оборудования, которое зачастую изобретается производителем. Синтез химических препаратов позволяет получить высокофункциональные материалы (прозрачные и непрозрачные) с уникальными свойствами. Существует два основных пути: первый включает в себе высокотемпературную обработку после нанесения покрытия для того, чтобы получить стеклоподобный или керамикоподобный материал на поверхности стекла, а другой - низкотемпературную ультрафиолетовую или инфракрасную обработку.

Необходимыми условиями для получения покрытий являются:

- проведение эксперимента в обеспыленных условиях;

- использование отфильтрованной жидкости для покрытия;
- должным образом очищенное стекло.

Способы нанесения прекурсора на поверхность подложки.

1. Метод погружения.

Суть этого способа заключается в следующем. Образец погружается в жидкость, а затем вытаскивается с определенной скоростью при строгом контроле температуры и атмосферных условий. Толщина покрытия определяется главным образом скоростью вытаскивания и вязкостью жидкости и может колебаться от 20nm до 50µm.

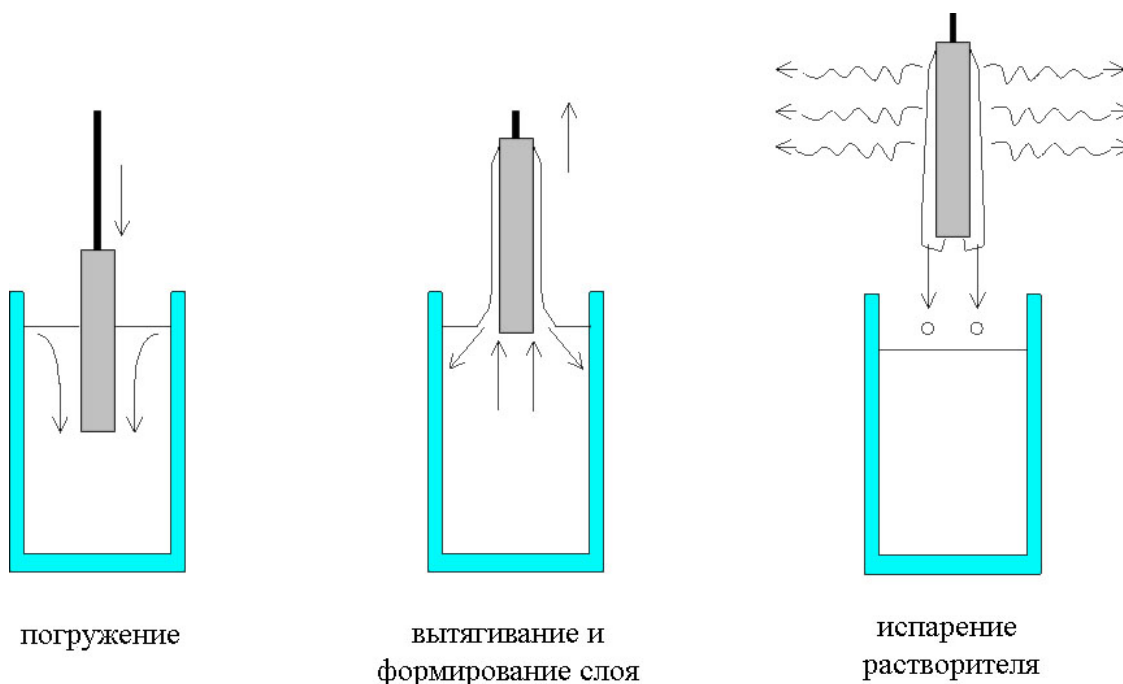


Рис.1. Схема нанесения покрытия методом погружения.

Толщина покрытия может быть вычислена исходя из формулы Ландау – Леви:

$$h = 0.94 \frac{(\eta * v)^{2/3}}{\gamma_{lv}^{1/6} * (\rho * g)^{1/2}},$$

где h – толщина покрытия, η – вязкость, γ_{lv} – сила поверхностного натяжения жидкости, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости, v – скорость вытягивания образца.

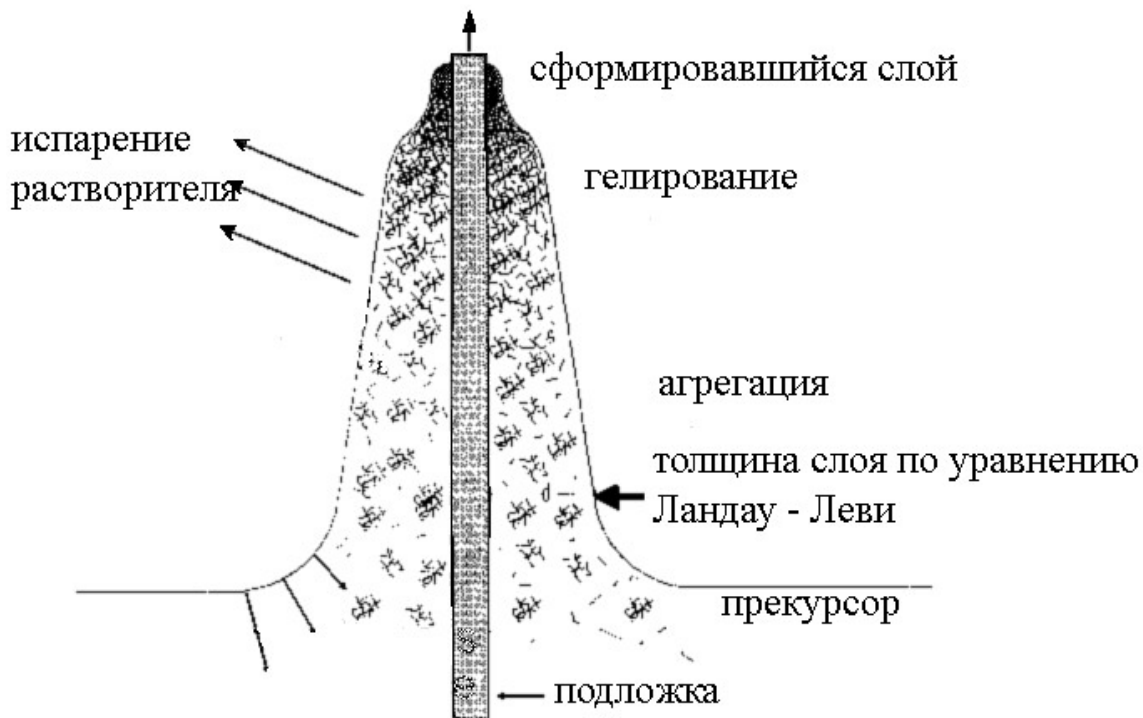


Рис. 2. Процесс формирования пленки на поверхности подложки при вытягивании из прекурсора.

Наилучшие результаты покрытия для одной поверхности можно получить, если применить метод вытягивания образца под углом, в этом случае соотношение Ландау – Леви соблюдается наиболее точно.

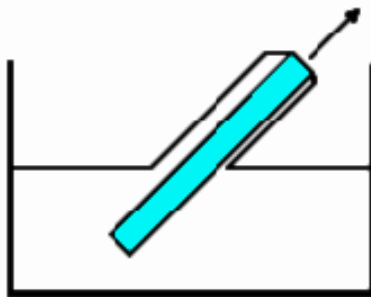


Рис. 3. Метод погружения с вытягиванием образца под углом

Процесс погружения используется для получения оптических покрытий, например на лампах, оптических фильтров или диэлектрических зеркал, многослойных систем (30-40 слоев с высокой точностью), защитного покрытия оптоволокон, оптических волноводов и т.д.. Метод наиболее прост в реализации.

2. Спрей-технология.

Эта технология, так же как и погружения, может быть применима для поверхностей неправильной формы. Получение оптического покрытия

таким способом имеет некоторые преимущества перед технологией погружения - скорость данного процесса в 10 раз больше, затраты прекурсора намного меньше. Образованная пульверизатором капелька в форме маленьких сухих частиц радиусом порядка μm ударяется о поверхность. Благодаря взаимодействию этих частиц, достигающих горячей поверхности, формируется сплошная пленка.

3.Метод полива.

Прекурсор поливается на поверхность как показано на рис.4.

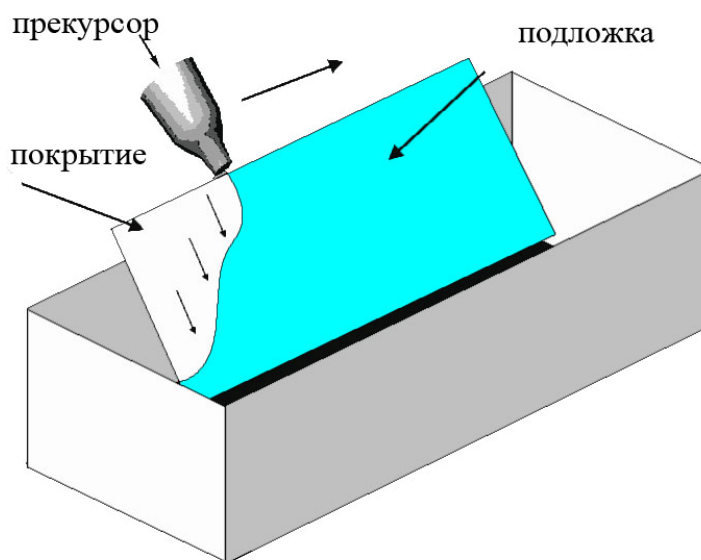


Рис. 4. Схема нанесения покрытия методом полива.

Толщина покрытия зависит от угла наклона, вязкости жидкости и скорости испарения.

Преимуществом этого метода является возможность нанесения на большие поверхности. Для получения более однородного слоя следует использовать «прокатывание», иначе толщина слоя будет увеличиваться от верха к низу.

4. Метод вращения (центрифугирование).

Предмет вращается вокруг оси, перпендикулярной покрываемой поверхности.

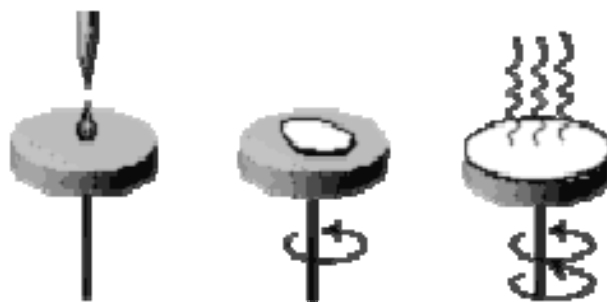


Рис. 5. Схема нанесения покрытия методом вращения.

Такой способ подходит для тел, обладающих симметрией вращения, например оптические линзы и глазные стеклянные линзы. Полностью автоматизированный процесс применяется в офтальмологии. Толщина покрытия колеблется от единиц нм до 10 мкм. Даже на неплоских поверхностях возможно получить прозрачный слой. Толщина зависит от угловой скорости, вязкости и скорости испарения. Этот метод дает наиболее равномерные покрытия.

5. Метод капиллярного смачивания.

При применении методов погружения и полива для образования покрытия расходуется только 10-20 % приготовленного прекурсора, причем его время жизни ограничено. Для решения такой проблемы был создан Метод капиллярного смачивания процесс.

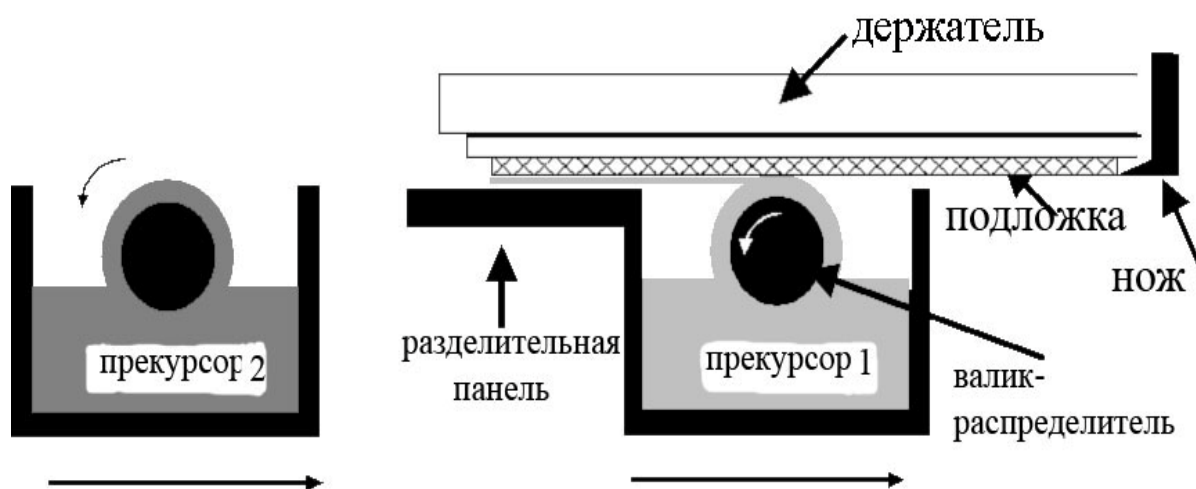


Рис. 6. Схема нанесения покрытия методом капиллярного смачивания.

Суть этого метода заключается в следующем. Трубчатый валик-распределитель движется над поверхностью подложки без физического контакта. На поверхности получается пленка высокой однородности. Используя две линии распределения прекурсора 1 и 2 можно получать планарные пленочные волноводы, защитные покрытия, многослойные покрытия для диэлектрических зеркал.

Основы золь-гель технологии

Основные понятия.

Золи, коллоидные растворы (нем. sole от лат. solutio — раствор) — это ультрамикрорегетерогенные дисперсные системы, размер частиц которых лежит в пределе от 1 до 100 нм (10^{-7} — 10^{-9} м).

В зависимости от дисперсионной среды золи бывают твердыми, аэрозолями (газообразная дисперсионная среда) и лиозолями (жидкая дисперсионная среда). В зависимости от природы среды лиозоли называют гидрозолями (вода), органозолями (органическая среда) или, более конкретно, алкозолями (спирты), этерозолями (эфир) и др. Золи

занимают промежуточное положение между истинными растворами и грубодисперсными системами (суспензиями (твердое в жидкости), эмульсиями (жидкое в жидкости)). Частицы дисперсной фазы в золях не связываются в пространственные структуры и свободно участвуют в интенсивном броуновском движении.

Гели (от лат. *gelo* — «застываю») — в коллоидной химии гели - дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, в которых частицы дисперсной фазы образуют пространственную структурную сетку. Представляют собой твердообразные ("студенистые") тела, способные сохранять форму, обладающие упругостью (эластичностью) и пластичностью. Типичные гели имеют коагуляционную структуру, т.е. частицы дисперсной фазы соединены в местах контакта силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через тонкую прослойку дисперсионной среды. Для них характерна тиксотропия, т.е. способность в изотермических условиях самопроизвольно восстанавливать свою структуру после механического разрушения. Гели образуются при коалесценции зольей. При высушивании гели необратимо разрушаются.

Гели с водной дисперсионной средой называются гидрогелями, с углеводородной - органогелями.

Прекурсор — химическое вещество, исходный компонент или участник промежуточных реакций при синтезе какого-либо вещества.

Так в золь-гель процессе прекурсором является стабильный сольватированный золь оксида металла.

Золь-гель процесс (гелевая технология), технология получения материалов с определенными химическими и физико-механическими свойствами, включающая получение золя и последующий перевод его в гель. Золь-гель процесс используют при производстве неорганических сорбентов, катализаторов и носителей катализаторов, синтетических цеолитов, вяжущих неорганических веществ, керамики со специальными теплофизическими, оптическими, магнитными и электрическими свойствами, стекла, стеклокерамики, волокон, керамического ядерного топлива и др.

На первой стадии золь-гель процесса формируется химический состав продукта (химическая форма вещества и соотношение компонентов), который получают в виде высокодисперсного коллоидного раствора - золя. Размер частиц дисперсной фазы в стабильном золе 10^{-9} – 10^{-6} м. Увеличение концентрации дисперсной фазы приводит к появлению коагуляционных контактов между частицами и началу структурирования - гелеобразования (вторая стадия золь-гель процесса.). Коагуляционные структуры характеризуются низкой прочностью, определяемой ван-дер-ваальсовыми силами, при этом взаимодействие частиц осуществляется через равновесную по толщине прослойку дисперсионной среды. Такие структуры характеризуются полным самопроизвольным восстановлением после механического разрушения (*тиксотропия*). Дальнейшее повышение

объемной концентрации и поверхности дисперсной фазы приводит к постепенному исчезновению способности к тиксотропному восстановлению, а по мере снижения содержания дисперсионной среды теряются также эластичные и пластичные свойства. При удалении дисперсионной среды (третья стадия процесса) появляются прочные фазовые контакты, при этом тиксотропные свойства теряются и механические разрушения структуры становятся необратимыми. При высушивании гель превращается в твердое тонкопористое тело (*ксерогель*) с конденсационно-кристаллизационной структурой. В процессе сушки может происходить заметное уплотнение геля и изменение его структуры. Разработаны способы сушки, уменьшающие этот эффект и обеспечивающие получение материалов с высокой открытой пористостью. Благодаря высокой дисперсности *ксерогелей* (размер частиц 10^{-8} – 10^{-6} м) путем формования и спекания производят прочные, плотные изделия с определенной геометрической формой из тугоплавких материалов, например, из оксидов, карбидов и нитридов, причем температуры спекания на 100-300 °С ниже, чем при использовании методов порошковой технологии.

Области применения золь-гель технологии

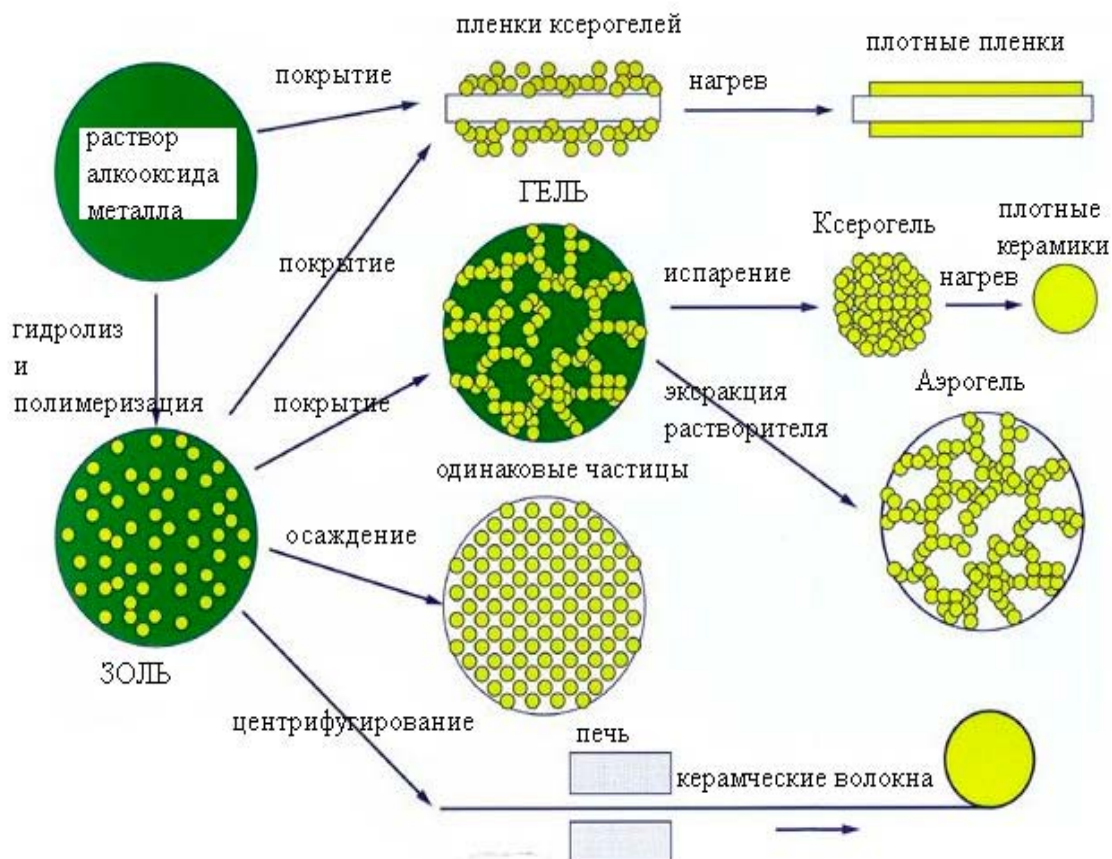


Рис.7. Области применения золь-гель технологии.

В наше время развитие физикохимии синтеза комплексных металлоорганических соединений позволило получать гели самых разных, в том числе и широко используемых в фотонике и микроэлектронике, материалов, например таких, как оксиды переходных металлов. После нанесения таких гелей на подложку (методом пульверизации, центрифугированием или просто прямым контактным способом) и проведения некоторых дополнительных технологических операций, можно получить на поверхности подложки тонкие пленки соответствующих составов.

Основные химические процессы, происходящие при золь-гель синтезе

Получение синтетических продуктов золь-гель методом основано на свойстве алкоксидов некоторых металлов (кремний, титан, германий и др.) подвергаться частичному гидролизу с последующей конденсацией и образованием циклолинейных пространственных структур.

Золь-гель процесс включает в себя несколько основных стадий (этапов):

1. частичный гидролиз алкоксида металла с образованием реакционных химически активных мономеров
2. поликонденсация этих мономеров с образованием коллоидных олигомеров (образование золя)
3. Дополнительный гидролиз, способствующий полимеризации и 3D сшивке с образованием трехмерной матрицы (геля). В течение этой стадии постепенно нарастает вязкость системы вплоть до точки перехода из золя в гель, при этом вязкость резко скачкообразно возрастает и система превращается в гель.
4. Последующая сушка и пиролиз геля приводит к образованию аморфных оксидов (ксерогелей).

Этап 1: Частичный гидролиз алкоксида.

Химические реакции на первой стадии в общем виде:

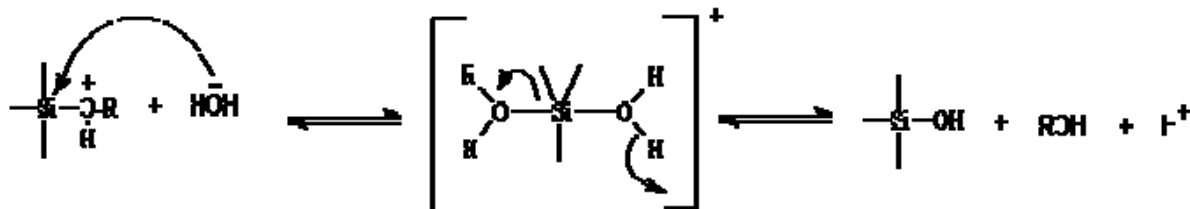
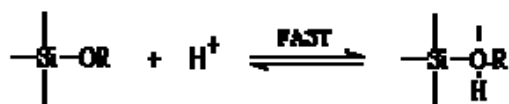


где M – Ti, Si, Zr и др. OR – алкоксид группа (C₂-C₄).

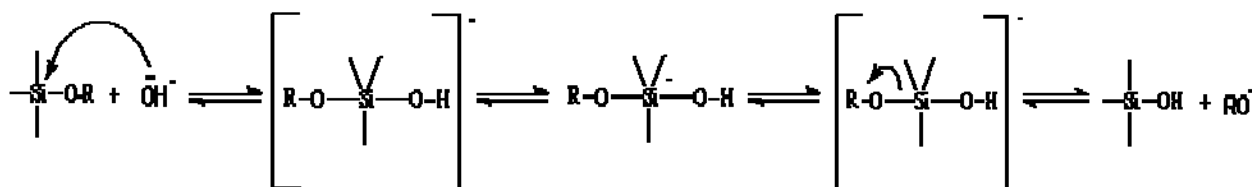
На примере M=Si



В кислой среде:



В нейтральной или щелочной среде:

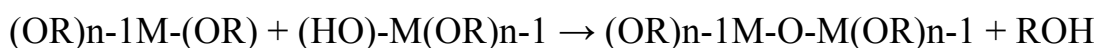


Этап 2: Конденсация

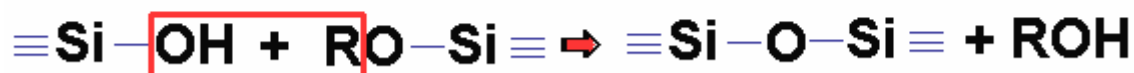
В общем виде:



или



На примере M=Si



Этап 3: Образование геля. (3D сшивка)

3D полимеризация между $(RO)_n-mM-O-M(OR)_n-m$ молекулами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Типовая схема получения покрытий TiO_2 на стекле состоит в следующем:

- приготовление пленкообразующего раствора (прекурсора) на основе тетрапропоксититана с проведением его гидролитической конденсации, образованием при этом линейных олигомеров за счет частичного гидролиза;

- нанесение прекурсора на подготовленную поверхность листового стекла (в данной работе методом окунания)

- дегидролиз в атмосфере паров воды; на этой стадии проходит структурирование пленки в результате превышения соотношения вода/алкоксид;

- низкотемпературная сушка призвана в мягком режиме удалить летучие компоненты интермицеллярной жидкости; при этом углубляются процессы образования объемной полититаноксальной сетки-каркаса с включением дополнительно введенных нелетучих компонентов;

- с увеличением температуры обработки в специальной печи происходит окончательное удаление легколетучих компонентов; имеет место пиролитические процессы отрыва оставшихся связанных функциональных групп (-OR), сопровождающиеся интенсификацией конденсационных процессов.

ПОРЯДОК РАБОТЫ:

1. Внимательно ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Взять образец подложки будущего волновода и очистить его изопропанолом.
3. Окунуть подложку в прекурсор и извлечь ее с постоянной скоростью (около 0,5 см/с). **Внимание! Алкоголятные прекурсоры содержащие TiO_2 и ZrO_2 гигроскопичны! Открывать сосуд с прекурсором только на время обработки!**
4. Оставить обработанную подложку на воздухе на несколько минут для завершения процесса гидратации (продолжительность уточняется у преподавателя).
5. Повторить операции 3 и 4 несколько раз в зависимости от желаемой толщины покрытия (уточняется у преподавателя).
6. затем пластину с покрытием поместить в воздушную конвекционную печь.
7. Температура и продолжительность термообработки уточняется у преподавателя
8. По истечении заданного времени вынуть готовый образец.

ВНИМАНИЕ!

Горячих предметов руками не касаться. Использовать специальные щипцы и пинцет. Работать в теплозащитных перчатках. Органические растворители зрючи и токсичны. Алкоголятные прекурсоры содержащие TiO_2 и ZrO_2 гигроскопичны! Открывать сосуд с прекурсором только на время обработки!

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какие основные методы создания планарных волноводов?
2. На каких принципах основана золь-гель технология?
3. Какие материалы можно получать по золь-гель технологии?
4. Какие основные методы нанесения пленок из жидкой фазы вы знаете?
5. Перечислите необходимые условия для получения покрытий на стекле.
6. От каких параметров зависит толщина пленки, полученной методом вращения? Каковы основные преимущества и недостатки этого метода?
7. От каких параметров зависит толщина пленки, полученной методом окунания? Каковы основные преимущества и недостатки этого метода?
8. Что такое золи и какими они бывают?
9. Что такое прекурсор?
10. Типовая схема получения покрытий TiO_2 на стекле.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Н. А. Шабанова, П. Д. Саркисов. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезёма. М. : Академкнига, 2004. – 207с.,*
2. *Е.Н.Подденежный, А.А.Бойко. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла. УО «ГГТУ им. П.О.Сухого», Гомель, 2002, 210с.*
3. *Холькин А.И., Патрушева Т.Н. Экстракционно-пиролитический метод. Получение функциональных оксидных материалов 2006. 292 с.*
4. *Химическая энциклопедия в 5 томах., М., Советская Энциклопедия, 1988.*

Приложение 1

Параметры полупроводниковых лазерных модулей и светодиодов, используемых в лабораторных работах 1 и 2

Обозначение лазерного модуля, светодиода	Длина волны, нм	Мощность излучения, мВт	Расходимость излучения, мрад	Напряж. питания, В	Потребл. ток, мА
KLM-D650-9-5	650	10	0.5	5	50
KLM-650-20-5	650	20	0.7	5	100
EP-2012-150 (красный)	650	24 Кд	-	3...4	100
EP-2012-150 (белый)	450–750	20 Кд	-	3...4	150

Внимание: Полупроводниковые лазерные модули весьма чувствительны к резким броскам напряжения и тока. Поэтому не допускается использование для их питания источников напряжения и тока с импульсными преобразователями напряжения. Это может вывести лазерные модули из строя. Подачу напряжения на лазерные модули рекомендуется производить путем плавного повышения напряжения до рабочей величины.

Приложение 2

Коэффициенты пропускания калиброванных ослабителей излучения, используемых в лабораторных работах 1 и 2

Марка оптического стекла	Длина волны, мкм	Коэффициент пропускания, %
СС-1	0.65...0.66	37
НС-9	0.532	12
НС-9	0.98	10

Калиброванные ослабители излучения изготовлены из цветного оптического стекла и предназначены для ослабления интенсивности лазерного излучения до величины, меньшей порогу насыщения фотоприемного устройства. Марка оптического стекла ослабителей расшифровывается следующим образом: СС – синее стекло, ОС – оранжевое стекло, НС – нейтральное стекло (стекла марки НС имеют серую или черную окраску). При необходимости, для ослабления излучения могут использоваться несколько ослабителей, установленных в лазерный луч последовательно. В этом случае полный коэффициент пропускания последовательности из n ослабителей определяется путем перемножения их коэффициентов пропускания:

$$T = \frac{1}{100^{n-1}} \prod_{i=1}^n T_i.$$

Приложение 3

Показатели преломления некоторых материалов, используемых в волоконной и интегральной оптике

Материал	Показатель преломл.	Спектральн. интервал, нм	Область применения
Силикатные и фосфатные стекла	1.4...1.8	0.4...2.0	Волокно для линий связи, волоконные лазеры и усилители, волоконные датчики
Плавленый кварц	1.46	0.35...2.0	Волокно для линий связи
Полимеры	1.4...1.65	0.4...1.5	То же
Полиэтилен	1.42...1.44	-	Оболочка волокна
Si	3.4...3.5	1...12	Волноводы для интегральной оптики
GaAs	3.3...3.4	0.95...12	Волноводы для интегральной оптики, полупроводниковые лазеры
ZnO	2.0	0.5...2	Волноводы для интегральной оптики
BaTiO ₃	2.4	0.4...2	То же
LiNbO ₃	2.3...2.4	0.4...2	То же

Приложение 4

Методика численного моделирования в программе IONEX, используемой в лабораторных работах 5 и 6

Программа IONEX предназначена для численного моделирования пространственного распределения концентрации примеси при ионном обмене в стеклах. Она дает возможность построить профиль концентрации примеси для различных вариантов технологического процесса: ионного обмена из расплава соли, ионного обмена из пленки металла, ионного обмена в присутствии электрического поля. Программа позволяет также проводить моделирование двухступенчатых процессов, включающих создание области с повышенным показателем преломления методом ионного обмена и последующей модификации этой области. Например, ее расширение с помощью термодиффузии, обратного ионного обмена, заглупление при термодиффузии в электрическом поле.

Программа активируется двойным щелчком по иконке **IONEX**. При этом появляется окно «Array dimensions» - «Размерность сетки» в котором необходимо задать количество ячеек сетки для моделирования вдоль поверхности подложки и по ее глубине (рис. П1). После введения размерности сетки следует нажать «ОК», после чего появится окно «Ion Exchange Parameters» - «Параметры ионного обмена» (рис. П2).

Array dimensions

Dimension in the surface direction

Dimension in the depth direction

Рис. П1. Окно размерности сетки для размерности 30×30

В ячейки окна параметров ионного обмена следует ввести типы ионов (Na и Ag или K), участвующих в обмене, концентрации ионов, толщину подложки, температуру и продолжительность процесса. После этого следует нажать кнопку «OK».

Ion Exchange Parameters

Na to **Ag** ion exchange 30 x 30 grid

Glass properties

Na concentration (moles/cubic m)	5000
Ag diffusion coefficient (m squared/s)	2E-15
Ratio of diffusion coefficients of Ag/ Na	.7
Correlation factor	.51
Substrate thickness (m)	.0005

Process parameters

Temperature (K)	616
Electrode voltage (V)	30
Step duration (s)	500
Ag surface concentration from melt	1
Ion source strip width (m)	.000005
Ag thin-film thickness (m)	.0000003

Calculation

Grid period (m)	3.333333E-07
Time interval (s)	.2

Рис. П2. Окно параметров ионного обмена для задания параметров моделирования

После этого, в основном окне программы **IONEX** следует нажать кнопку «Process». При этом откроется окно «Process steps» - «Этапы процесса» (рис. П3). В этом окне следует выбрать вид процесса ионного обмена, который будет использован при численном моделировании. В

меню программы содержатся следующие варианты процессов ионного обмена и последующей модификации волновода:

«Migration from silver strip» - ионный обмен из пленки (полоски) серебра в присутствии электрического поля;

«Silver strip with salt melt» - ионный обмен из пленки серебра в расплаве соли в присутствии электрического поля;

«Field-assisted migration with salt melt» - ионный обмен из расплава соли в присутствии электрического поля;

«Thermal ion exchange from salt melt» - термический ионный обмен из расплава соли;

«Thermal post-baking diffusion» - формирование профиля волновода методом термической диффузии после ионного обмена;

«Thermal burial» - заглубление волновода методом термической диффузии;

«Field-assisted burial» - заглубление волновода методом термической диффузии в присутствии электрического поля.

После этого следует нажать кнопку «ОК».

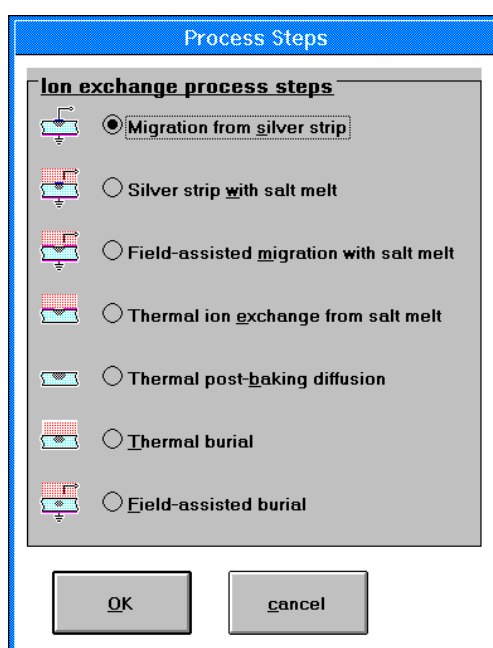


Рис. П3. Окно этапов процесса ионного обмена

Затем следует нажать «Picture» в меню основного окна и на дисплее появляется окно «Contours» - «Контурные» (рис. П4). В этом окне следует задать начальное и конечное значения концентрации и интервал между соседними значениями концентрации для построения контурного графика.

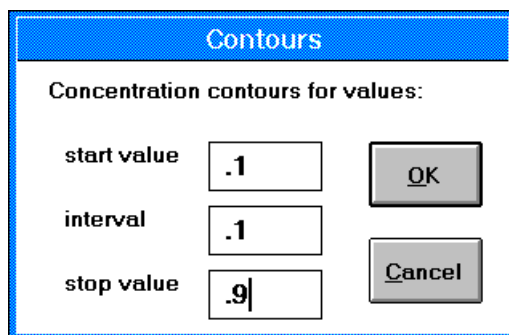


Рис. П.4. Окно для задания параметров контурного графика распределения концентрации при ионном обмене

После задания параметров контура следует нажать «ОК» и нажать «Refresh» в меню «Picture». Программа начинает процесс численного моделирования и после его завершения появляется контурный график распределения концентрации ионов для заданных параметров ионного обмена (рис. П5).

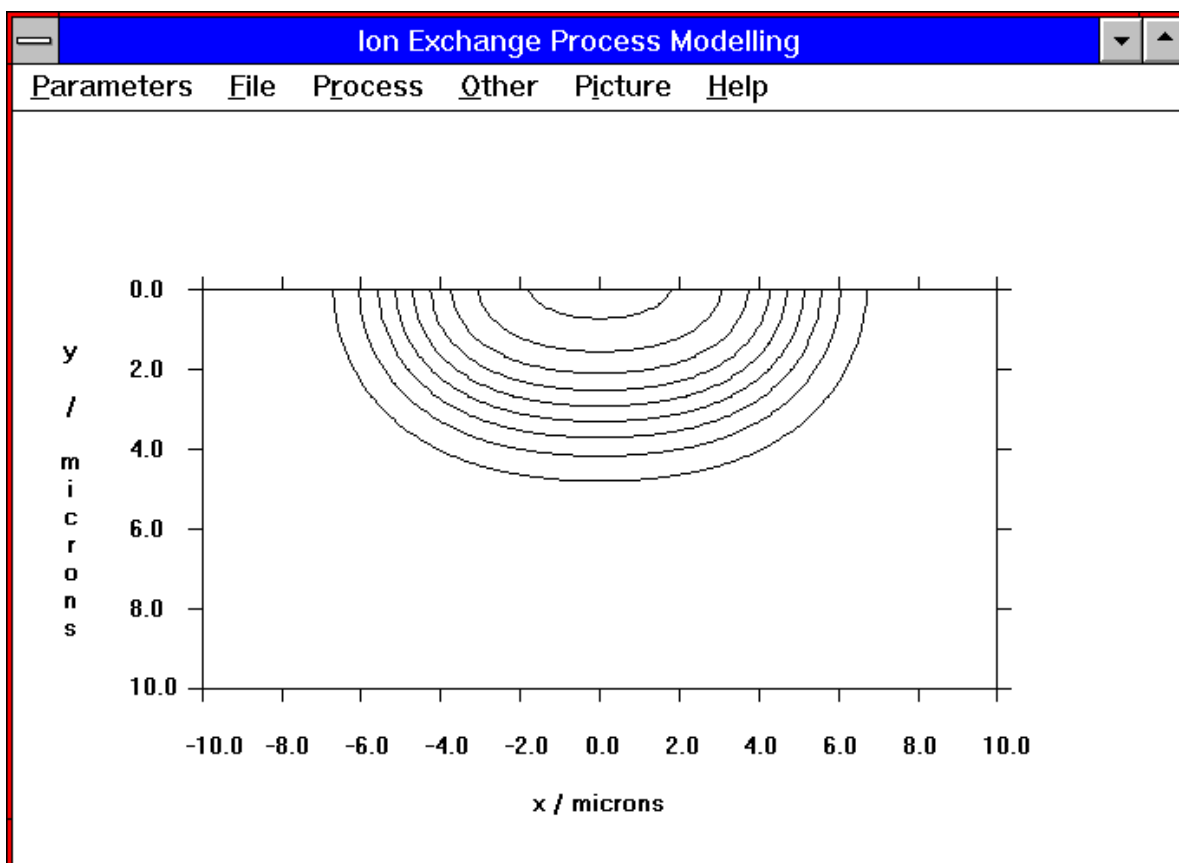


Рис. П5. Контурный график распределения концентрации ионов, полученный в результате численного моделирования.

Для сохранения файла с профилем волновода следует в меню «File» выбрать «File». При этом откроется окно «File operations» (рис. П6). После выбора директории для сохранения файла и ввода названия файла следует нажать кнопку «Save».

Для численного моделирования двухступенчатого процесса, после построения исходного профиля концентрации примеси и его сохранения, следует снова нажать кнопку «Process» и из меню «Process steps» выбрать необходимый процесс для второго этапа. Затем повторить операции, описанные выше для получения окончательного профиля концентрации примеси.

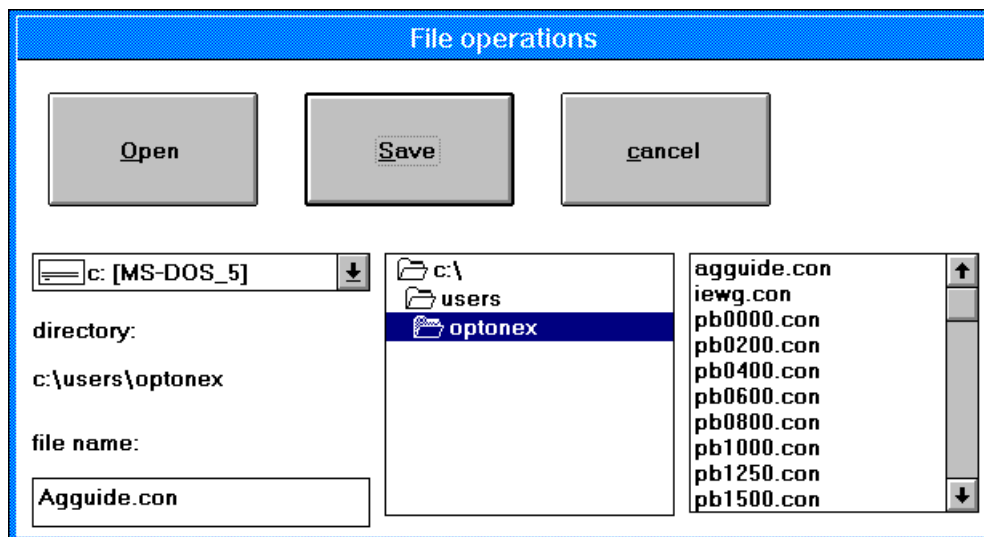


Рис. П6. Окно для сохранения файла с профилем волновода

После этого программа IONEX может быть закрыта. Для этого в меню следует выбрать «Other» и нажать кнопку «End».

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

- 1994 г.** Организована базовая кафедра СПбГУ ИТМО при Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова – кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для преподавания в ИТМО широко привлекались ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником, из которого ГОИ черпал новые молодые кадры. Кафедра начала подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника», специальность «Оптические технологии и материалы».
- 1999 г.** Реорганизация кафедры. На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информационная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики (ОМиО).
- 2002 г.** Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО - фотоники и оптоинформатики.
- 2003 г.** При кафедре создана учебно-исследовательская лаборатория материалов и технологий фотоники.
- 2004 г.** Кафедра явилась одним из инициаторов и организаторов создания нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров – «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра начала подготовку бакалавров и магистров по направлению - 200600 «Фотоника и оптоинформатика».

- 2005 г.** Кафедра ОМиО переименована в кафедру оптоинформационных технологий и материалов (ОТиМ).
- 2006 г.** Кафедра ОТиМ – лидер в России по подготовке специалистов по оптическому материаловедению в области фотоники и оптоинформатики. Кафедра ведет совместные научные исследования с зарубежными компаниями Corning, Samsung, PPG.
- 2007 г.** Первый выпуск бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра ОТиМ - участник выполнения инновационной образовательной программы в СПбГУ ИТМО «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», реализуемой в рамках Приоритетных Национальных Проектов «Образование».

Александр Иванович Игнатъев
Станислав Сергеевич Киселев
Николай Валентинович Никоноров
Александр Иванович Сидоров
Алексей Сергеевич Рохмин

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного
практикума

В авторской редакции
Компьютерная верстка
Заведующая РИО
А.С. Рохмин
Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел СПб ГУИТМО
Лицензия ИД №00408 от 05.11.99. Отпечатано на ризографе. Тираж 100 экз.
Заказ №.

Подписано в печать

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

