

## Лабораторная работа № 2

# СОЗДАНИЕ ПЛАНАРНОГО ГРАДИЕНТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ВОЛНОВОДА МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО 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:

Ознакомление с основными методами создания планарных волноводов.  
Ознакомление с основными принципами ионного обмена в стеклах.

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;

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 смещенных 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 улета 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 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  $Ag^+$ ,  $Li^+$ ,  $K^+$ ,  $Tl^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+ \leftrightarrow Na^+$ . В результате такой замены происходит увеличение ПП в поверхностном слое стекла, что

приводит к образованию волновода (Рис.1). Обычно ионный обмен проводят при температурах ниже  $T_g$  стекла.

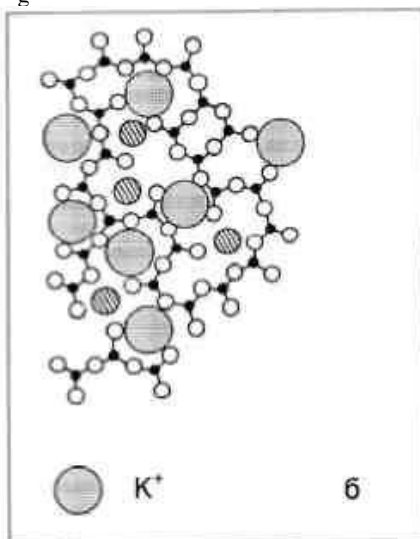


Рис. 1. Принцип ионного обмена на примере  $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$  обмена (а - схема сетки стекла до обмена; б - схема сетки стекла после обмена)

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  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cu}^+$ , а также двухвалентных  $\text{Zn}^{2+}$ . 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  $\text{K}^+$ . Ион  $\text{K}^+$  представляет собой не поглощающий в видимой и ближней ИК области спектра модификатор. Использование  $\text{K}^+$  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  $\text{KNO}_3$  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°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 (~ 650°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 (~ 0,1°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.2).

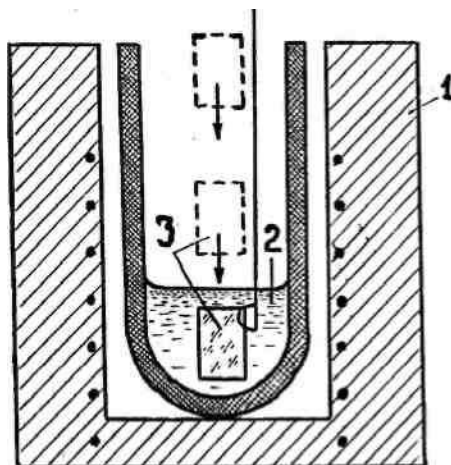


Рис.2. Схема термодиффузионной установки: 1 - печь, 2 - расплав соли, 3 - стеклянная подложка, постепенно опускаемая к расплаву.

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 придти 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.3 и рис 4). Вследствие капиллярных явлений возможно короткое замыкание электродов, т.к., как правило, при диффузии из расплава, оба электрода являются расплавленными солями диффузанта. 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.

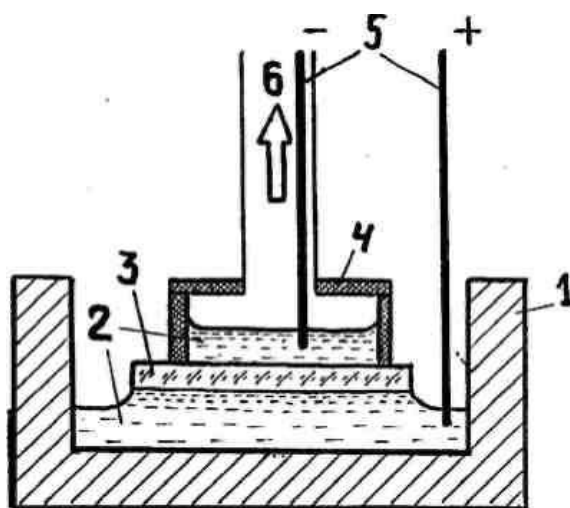


Рис. 3. Схема установки электродиффузии постоянного тока с использованием вакуумного прижима для электроизоляции катода и анода: 1 - тигель, 2 - расплав-анод и расплав-катод (как правило, одинаковые соли), 3 - стеклянная подложка, 4 - вакуумный прижим, 5 - металлические подводящие провода, 6 - к вакуумному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



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

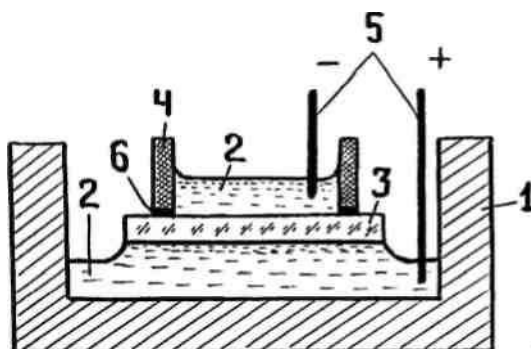


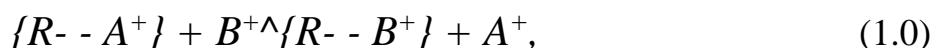
Рис.4. Схема установки электролиффузии постоянного тока с использованием охранного кольца для электроизоляции катода и анода: 1 - тигель; 2 - расплав-анод и расплав-катод; 3 -стеклянная подложка; 4 - охранное кольцо; 5 - металлические подводящие провода; 6 - слой специального клея.

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, одержащей 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  $R^{-}\underline{A}^{+}$ ; 3) химической реакции обмена ионов  $\underline{A}^{+}$  %  $B^{+}$ ; 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  $D$  которая характеризует как свойства самой частицы, так и свойства среды, и времени  $t$  прохождения частицы от одной потенциальной ямы до другой

$$\langle x^2 \rangle = 2k_B/m = 2Dt, \quad (1.1)$$

где  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $D$  - коэффициент диффузии. Из (1.1) следует известное уравнение Нернста-Эйнштейна:

$$D = k_B p T. \quad (1.2)$$

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

$$J_i = L_i \text{grad} \mu_i, \quad (1.3)$$

По определению  $\mu_i = \mu_{i,0} + RT \ln a_i$ . Тогда:

$$J_i = [L_i RT / a_i] \text{grad} a_i = -D_i \text{grad} a_i, \quad (1.4)$$

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:

$$J_i = -D_i \text{grad} c_i, \quad (1.5)$$

$$dc_i / dt = \text{div}(D_i \text{grad} c_i). \quad (1.6)$$

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

$$J_i = -D_i (dc_i / dx), \quad (1.7)$$

$$dc_i/dt = d/dx [D_i (dc_i/dx)]. \quad (1.8)$$

Независимые расчеты по уравнениям (3.3), (3.6) и (3.9) 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  $\mu$ , обуславливающий поддержание потоков вещества.

**Химический потенциал  $\mu$**  - один из термодинамических параметров системы, а именно энергия добавления одной частицы в систему без совершения работы. Определение химического потенциала можно записать в виде:

$$dE = TdS - PdV + \mu dN \quad (1.9)$$

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

Эта формула определяет, кроме химического потенциала  $\mu$ , также давление  $P$  и температуру  $T$ .

Можно доказать, что химический потенциал задаётся формулой

$$G = \mu N \quad (1.10)$$

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

$$dE = TdS - \sum a_i dA_i + \mu dN \quad (1.11)$$

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

Поток частиц вещества пропорционален при этом градиенту потенциала

$$J \sim - (d\mu/dx)_{pT} \quad (1.12)$$

В большинстве практических случаев вместо химического потенциала применяется концентрация  $C$ . Прямая замена  $\mu$  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:

$$J = -D \partial C \quad (1.13)$$

которая показывает, что плотность потока вещества  $J$  [ $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ] пропорциональна коэффициенту диффузии  $D$  [ $\text{см}^2 \text{с}^{-1}$ ] и градиенту концентрации. Это уравнение выражает первый закон Фика. Второй закон Фика связывает пространственное и временное изменения концентрации

(уравнение диффузии):

$$\partial C = D \partial^2 C \quad (1.14)$$

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

$$D = A_D \exp(-U_D/RT), \quad (1.15)$$

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

$$U_D = -R [d \ln D / d (1/T)]. \quad (1.16)$$

В результате анализа методов градиентной технологии в качестве метода изготовления планарных волноводов в данной работе выбрана низкотемпературная ионообменная диффузия из расплава солей  $\text{AgNO}_3$  (5 мол.%) -  $\text{NaNO}_3$  (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  $\text{Na}^+$ .

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.
3. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика, для систем передачи и обработки информации. - Москва: "Радио и связь", 1990.
4. Никоноров Н.В. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор). - Физика и Химия стекла, 1999, т.25, N1, с. 21-69