

**Журихина Валентина Владимировна**

**ПЛАНАРНЫЕ МИКРООПТИЧЕСКИЕ ГРАДИЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ  
НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ**

Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2001

Работа выполнена на кафедре «Физика твердого тела» Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор А.А.Липовский

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор О.В.Косоков

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Д.В.Свистунов

Ведущая организация: Санкт-Петербургский технологический институт

Защита диссертации состоится \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.02 при Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2001г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

Б.Е.Саморуков

## Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Развитие оптоэлектроники и твердотельной электроники требует постоянной разработки новых и совершенствования существующих материалов, исследования этих материалов и оценки перспективности их применения для создания тех или иных устройств и элементов. Зачастую необходимость таких работ связана с новыми технологиями, разрабатываемыми по специфическим запросам и определяющими требования к материалам и структурам. Целый ряд устройств оптоэлектроники требует применения в них элементов интегральной, градиентной и дифракционной оптики. Такие элементы могут быть изготовлены на основе кристаллических материалов, стекол или пластмасс. К числу наиболее широко применяемых материалов относится стекло, в первую очередь, благодаря возможности варьирования свойств стекол в широких пределах, низкой стоимости и хорошим оптическим и механическим качествам стекол. На базе стекол могут быть изготовлены пассивные и активные оптические элементы оптоэлектроники и твердотельной электроники - волноводы, линзы и системы линз, дифракционные решетки, разветвители и усилители светового сигнала, модуляторы, а также многие другие структуры.

Один из способов создания градиентных и дифракционных оптических элементов в стекле – это метод ионного обмена. Принцип ионообменной методики состоит в замене иона стеклянной матрицы ионом из внешнего источника, изменяющим показатель преломления стекла. Проводя ионный обмен через маску, нанесенную на поверхность образца, можно получать такие структуры как дифракционные решетки, микролинзы и массивы микролинз. Преимущества метода ионного обмена определяются гибкостью данной технологии, которая позволяет создать различные заранее заданные распределения показателя преломления, если должным образом подобрать состав стекла и режимы диффузии. Благодаря своей гибкости, метод ионного обмена широко используется для изготовления различных оптических элементов. Развитие ионообменной технологии требует создания новых стекол, обеспечивающих большую величину изменения показателя преломления при ионном обмене и быстрое формирование градиентной области. Кроме того, необходимы новые стекла, ионообменный профиль показателя преломления в которых позволяет оптимизировать параметры формируемых оптических структур.

Внимание разработчиков оптоэлектронных устройств привлекают такие структуры как волноводы, поверхностные и заглубленные, дифракционные решетки, микролинзы, полученные с помощью ионообменной методики. Широко проводятся исследования термо- и электродиффузии в стекле, влияния режимов диффузии и последиффузионного отжига на концентрационные профили волноводов, эффективности дифракции решеток, фокусное

расстояние и абберацию микролинз. Однако до сих пор процесс диффузии в стекле изучен недостаточно, и моделирование, которое позволило бы оптимизировать режимы формирования оптических элементов в стекле и учитывающее все особенности ионного обмена процесса, а именно нелинейность диффузии, влияние внешнего электрического поля и скорость установления поверхностной концентрации, проведено не было. Также не рассматривалось влияние поверхностного рельефа, возникающего в процессе диффузии из-за отличия радиусов обмениваемых ионов, на оптические характеристики ионообменных дифракционных решеток.

В связи с вышесказанным весьма актуальной представляется разработка нового стекла, предназначенного для создания градиентных ионообменных структур, а также исследование процесса диффузии в этом стекле и определение параметров, необходимых для нахождения оптимальных режимов формирования оптических элементов методом ионного обмена. Для оптимизации режимов диффузии необходимо физическое моделирование процесса двумерного ионного обмена в стекле, проводимого через маску, нанесенную на поверхность образца. Моделирование должно основываться на экспериментально определенных параметрах диффузионного процесса и учитывать все особенности диффузии в данной стеклянной матрице: зависимость коэффициента диффузии от концентрации, влияние внешнего электрического поля и скорость установления постоянной концентрации на поверхности. Результатом таких исследований будет определение характеристик градиентных оптических структур - микролинз и дифракционных решеток в зависимости от режимов ионного обмена – времени, температуры и управляющего электрического поля.

Цель работы состоит в исследовании новой стеклянной матрицы для формирования градиентных ионообменных оптических элементов; определении параметров, необходимых для моделирования диффузионного процесса в новом стекле; нахождении оптимальных режимов формирования оптических структур в новом материале; а также разработке комплексного подхода, позволяющего моделировать процесс двумерного ионного обмена с учетом особенностей диффузии и рассчитывать диффузионные профили концентрации для различной геометрии маски, применяемой для изготовления оптических элементов, и характеристики этих элементов.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке нового стекла, специально предназначенного для формирования ионообменных градиентных оптических элементов с помощью низкотемпературной диффузии;

- исследовании процесса ионного обмена в новой стеклянной матрице и определении параметров разработанного материала, необходимых для моделирования диффузионных процессов;
- определении профиля концентрации диффундирующего иона при ионном обмене через маски с различной геометрией с помощью моделирования процесса диффузии с учетом нелинейности, влияния внешнего электрического поля и скорости установления постоянной концентрации на поверхности;
- нахождении траекторий световых лучей, распространяющихся в градиентной среде с показателем преломления, определенным в результате комплексного моделирования ионообменного процесса;
- теоретическом исследовании влияния внешнего электрического поля и нелинейности диффузии на характеристики ионообменных микролинз и фазовых дифракционных решеток и определении режимов диффузии и последиффузионного отжига, позволяющих сформировать дифракционные решетки с наибольшей эффективностью и микролинзы с наименьшей абберацией.

Практическая ценность работы. Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволяют дать практические рекомендации по изготовлению градиентных ионообменных фазовых дифракционных решеток и сферических микролинз. По результатам выполненного в работе моделирования была изготовлена дифракционная решетка, которая в дальнейшем использовалась в 1:3 разветвителе для волоконной оптики.

Положения, выносимые на защиту:

- замена лития на натрий в матрице стекла при высокотемпературном ионном обмене приводит к изменению формы диффузионного профиля концентрации ионов серебра: в случае стекла ЛК 1552 профиль вогнутый, а после замены лития на натрий профиль выпуклый;
- при прочих равных условиях выпуклый диффузионный профиль позволяет сформировать фазовые дифракционные решетки с наибольшей эффективностью и микролинзы с наименьшей абберацией;
- при изготовлении дифракционных решеток методом ионного обмена в стекле существует оптимальная скважность маски, применяющейся для ионного обмена; для маски данного периода и скважности существует оптимальное время диффузии, при котором эффективность дифракции в первом порядке максимальна;
- последиффузионный отжиг приводит к уменьшению абберации ионообменных микролинз.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные полученные результаты докладывались и обсуждались на первой международной конференции «Информационные и бизнес технологии XXI века» (С.-Петербург, 2000 г.) семинарах кафедры физики твердого тела СПбГТУ, кафедры стекла С.-Петербургского технологического института .

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Диссертационная работа содержит 152 страницы, 70 рисунков, 4 таблицы. В список литературы включены 69 наименований.

### **Содержание диссертации**

Во введении обосновывается актуальность проведенных исследований, указывается их цель и научная новизна, формулируется подход к решению поставленной задачи и кратко излагается содержание диссертации.

В Главе I приводится обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию градиентных ионообменных структур для оптоэлектроники. Рассматриваются способы получения различных оптических элементов с помощью ионообменной методики. Также в Главе I кратко описывается процесс ионного обмена в стекле и оптические градиентные элементы – волноводы, дифракционные решетки, линзы и граданы, которые могут быть изготовлены с его помощью.

В §§1.1-1.2 дано определение процесса ионного обмена в стекле и рассмотрены особенности этого процесса при температурах выше и ниже температуры стеклования. Приведены факторы, влияющие на показатель преломления стекла при замене иона матрицы ионом из внешнего источника. С хорошей степенью точности можно считать, что при низкотемпературном ионном обмене изменение показателя преломления пропорционально концентрации допирующих ионов в стеклянной матрице:  $n = n_s + \Delta n_{\max} \cdot C$ . Максимальное изменение показателя преломления характеризует процесс ионного обмена для каждого типа стекла и диффузанта и измеряется экспериментально.

Существует 2 способа реализации процесса ионного обмена в стекле: термический и электростимулированный, происходящий во внешнем электрическом поле, вынуждающем ионы диффузанта дрейфовать в направлении вглубь подложки. Приложение внешнего электрического поля существенным образом увеличивает скорость и глубину диффузии. В

обоих случаях максимум концентрации диффузанта формируется на поверхности образца. Если необходимо получить структуру, в которой максимум концентрации диффузанта смещен вглубь от подложки (например, заглубленный волновод), то проводят диффузию в 2 ступени: на первой ступени образец погружается в расплав соли входящего иона, например,  $\text{AgNO}_3$ , в результате чего формируется максимум концентрации ионов  $\text{Ag}^+$  на поверхности; на второй ступени образец погружается в расплав соли  $\text{Na}$  и происходит обратный обмен  $\text{Na}^+ - \text{Ag}^+$ , вследствие чего максимум концентрации  $\text{Ag}^+$  смещается вглубь подложки.

В §§1.3-1.5 приводится обзор литературы, посвященной экспериментальному исследованию ионообменных волноводов, дифракционных решеток, микролинз, массивов микролинз и градианов, полученных методом термической и электростимулированной диффузии.

В §1.6 приведен вывод уравнения двухкомпонентной диффузии и его аналитическое решение в одномерном случае. Для линейного процесса, когда коэффициенты диффузии обмениваемых ионов не зависят от концентрации, вывод одномерного уравнения диффузии был предложен М.Аbou-El-Leil и А.Р.Соорег [1] и затем обобщен J.Albert и J.W.Lit [2] для многомерного случая. Если ионы типа  $a$  заменяют в стекле ионы типа  $b$ , а  $C_a$ ,  $C_b$  – концентрации этих ионов, то уравнение диффузии запишется в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_a}{1-\alpha C} (\nabla^2 C + \frac{\alpha(\nabla C)^2}{1-\alpha C} - \frac{e\mathbf{E}_{\text{ext}}}{HkT} \nabla C), \quad (1)$$

где  $C = C_a/C_0$ ,  $C_0 = C_a + C_b$ ,  $\alpha = 1 - D_a/D_b$ ,  $D_a$ ,  $D_b$  – коэффициенты диффузии ионов типа  $a$  и  $b$ , соответственно,  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  – внешнее электрическое поле,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $H$  – число Хавена, которое в стекле обычно принимает значения от 0.1 до 1. В уравнении (1) первое слагаемое – концентрационный член, второе слагаемое описывает движение ионов в локальном электрическом поле, возникающем из-за отличия коэффициентов диффузии обмениваемых ионов, третье слагаемое – движение ионов во внешнем электрическом поле.

Для нелинейного процесса, когда коэффициенты диффузии зависят от концентрации, вывод уравнения ионного обмена был предложен в статье A.Lurascu et al.[3] Для случая нелинейной диффузии уравнение запишется в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_a}{1-\alpha C} (\nabla^2 C - \frac{e\mathbf{E}}{HkT} \nabla C) + \nabla D_a \frac{1-C}{1-\alpha C} (\nabla C - \frac{e\mathbf{E}}{HkT} C) + \nabla D_b \frac{C(1-\alpha)}{1-\alpha C} (\nabla C + \frac{e\mathbf{E}}{HkT} (1-C)), \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$  – локальное электрическое поле, связанное с внешним полем  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  соотношением

$$\frac{e\mathbf{E}}{HkT} = \frac{e\mathbf{E}_{\text{ext}}}{HkT} - \frac{\alpha\nabla C}{1-\alpha C}.$$

Очевидно, что в случае когда коэффициенты диффузии не зависят от концентрации и  $\nabla D_a = \nabla D_b = 0$ , уравнение (2) совпадает с уравнением (1).

В §1.7 описаны способы восстановления профиля показателя преломления  $n(x)$  по модовому спектру ионообменных волноводов.

§1.8 посвящен определению оптических характеристик фазовых дифракционных решеток, сформированных в процессе диффузии через периодическую маску с отверстиями. В приближении тонкой решетки плоская волна с длиной волны  $\lambda$ , проходя сквозь решетку при нормальном падении, приобретает фазовый набег  $\phi(y)$

$$\phi(y) = 2\pi/\lambda \int_0^h \Delta n(x, y) dx, \quad (3)$$

где  $h$  - толщина решетки,  $x$  - направление распространения волны,  $y$  - направление изменения показателя преломления. Эффективность дифракции в  $m$ -ом порядке описывается как

$$\eta_m = \left| \frac{1}{d} \int_0^d \exp(i\phi(y)) \cdot \exp(-i2\pi my/d) dy \right|^2.$$

В §1.9 приведена методика расчета оптических характеристик линз и градианов, таких как фокусное расстояние, числовая апертура и продольная абберация с использованием лучевого анализа. Для расчета оптических характеристик необходимо знать траекторию светового луча, которая описывается уравнением

$$\frac{d}{ds} \left[ n(R) \frac{dR}{ds} \right] = \nabla n(R), \quad (4)$$

где  $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$  - длина дуги вдоль распространения луча,  $R \equiv (x, y, z)$  - координаты точки луча. Для произвольного распределения  $n(R)$  точного решения уравнения (4) в аналитическом виде не существует, поэтому определение траектории луча проводят с помощью численных расчетов. Для этого используется метод лучевого анализа (ray-tracing), в котором введением новой переменной  $dt = ds/n$  уравнение (4) сводится к виду

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{1}{2} \nabla n^2(R). \quad (5)$$

Зная  $n(x, y, z)$ , уравнение (5) можно решить численно, например, с помощью метода Рунге-Кутты.

В Главе II представлены результаты численного моделирования процесса формирования фазовых ионообменных дифракционных решеток в стекле при термической и



электростимулированной диффузии. Вычисления профилей концентрации диффундирующих ионов и дифракционных характеристик сформированных решеток проводились для ионного обмена  $Ag^+ - Na^+$  в стекле ЛК 1552 (см.Табл.1), для которого, как нами установлено, коэффициент диффузии зависит от концентрации. Часть стеклянных подложек типа ЛК 1552

Таблица 1. Состав стекла ЛК 1552, использовавшегося в эксперименте.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zr <sub>2</sub> O	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
мол. %	60.0	6.0	10.0	3.7	0.1	10.2	10.0

подвергалась дополнительной обработке, а именно высокотемпературному ионному обмену в расплаве NaNO<sub>3</sub>. Предполагалось, что в результате высокотемпературного обмена ионы Li<sup>+</sup>, находящиеся в стекле, будут заменены ионами Na<sup>+</sup> и, таким образом, обработанное стекло будет демонстрировать другой характер нелинейности, чем исходное. Необработанные образцы обозначались ULK, обработанные - PLK. Зависимость  $D(C)$  для стекол ULK и PLK вычислялась из экспериментальных профилей распределения

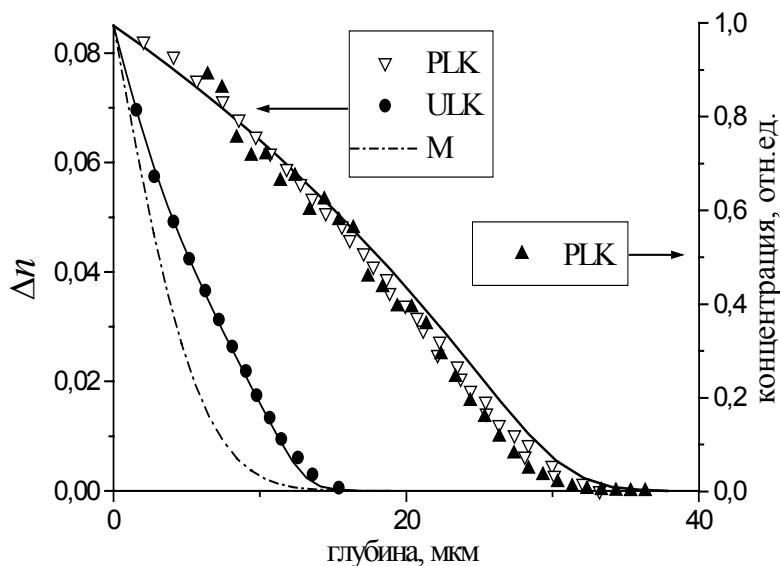


Рис. 1. Профили концентрации диффузанта и изменения показателя преломления в исследуемых стеклах

концентрации методом Больцмана-Матано [4] и использовалась в дальнейших расчетах.

Максимальное изменение показателя преломления  $\Delta n_{max}$ , вносимое ионами-диффузантами в стекла PLK и ULK, определялось экспериментально и составляло  $\Delta n_{max} = 0.085$  для обоих типов стекол. Для выявления влияния нелинейности диффузии на процесс формирования и оптические характеристики фазовых

дифракционных решеток расчеты проводились также для подложки, демонстрирующей линейную диффузию и имеющей то же значение  $\Delta n_{max}$ , что и стекла PLK и ULK (в дальнейшем будем называть такое стекло стеклом типа М).

На рис.1 приведены экспериментально определенные методом модовой спектроскопии профили изменения показателя преломления в стеклах ULK и PLK; определенный методом электронного микроанализа профиль концентрации ионов  $Ag^+$  в PLK (точки). Из рисунка видно, что профили концентрации и изменения показателя преломления совпадают. Также на рис.1 представлены расчетные профили изменения показателя преломления в подложках PLK, ULK и М (сплошные линии).

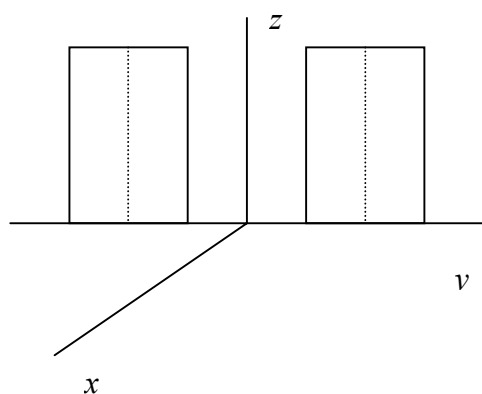


Рис.2. Маска, используемая для изготовления дифракционных решеток методом ионного обмена

преломления в подложках PLK, ULK и М (сплошные линии). Нелинейность диффузионного процесса существенно изменяет форму концентрационного профиля. Одномерный профиль в случае линейной диффузии вогнутый, тогда как для нелинейной диффузии в стекле типа PLK профиль имеет выпуклую форму.

Далее в работе были рассчитаны двумерные профили концентрации для ионного обмена через периодическую маску с параллельными щелями, нанесенную на поверхность образца (см. рис.2). Проводя диффузию таким образом, можно получить фазовую

дифракционную решетку. Величина фазового набег  $\Delta\phi = \phi_{max} - \phi_{min}$  может быть использована для приближенной оценки фазового контраста решетки. При  $\Delta\phi = \pi$  эффективность дифракции в первом порядке имеет максимум.

Из (3) и рис.1 очевидно, что при прочих равных условиях можно ожидать большей величины  $\Delta\phi$  в случае нелинейной диффузии в стекле PLK.

Зависимость максимального фазового набег  $\Delta\phi_{max}$  от скважности маски представлена на рис.3 для стекол PLK, ULK и М. Максимальный фазовый набег достигается при соотношении щель/период 0.3-0.4. Как и предполагалось, наибольшая величина  $\Delta\phi$  достигается в стекле PLK. Соответственно, и наибольшая эффективность дифракции в первом порядке также будет наблюдаться в стекле PLK.

Зависимость эффективности дифракции в первом порядке от времени ионного обмена имеет максимум вследствие “заплывания” решеток из-за краевой диффузии. Оптимальная продолжительность ионного обмена, позволяющая получить наиболее эффективную дифракционную решетку, зависит от скважности. Эта зависимость иллюстрируется рис.3. Из

рисунка видно, что оптимальное время уменьшается с увеличением ширины щели, т.е. при большей ширине щели диффузионный профиль сглаживается быстрее.

Результаты расчета эффективности дифракции в первом порядке  $\eta_1$  для решеток с различным периодом, сформированных в стекле PLK, приведены на рис.4. Из рисунка видно, что для некоторых периодов решетки зависимость  $\eta_1(t)$  имеет два максимума с одинаковой амплитудой, соответствующих  $\Delta\phi=\pi$ , а также дополнительные максимумы с меньшей амплитудой, соответствующие  $\Delta\phi=\pi+2\pi$ .

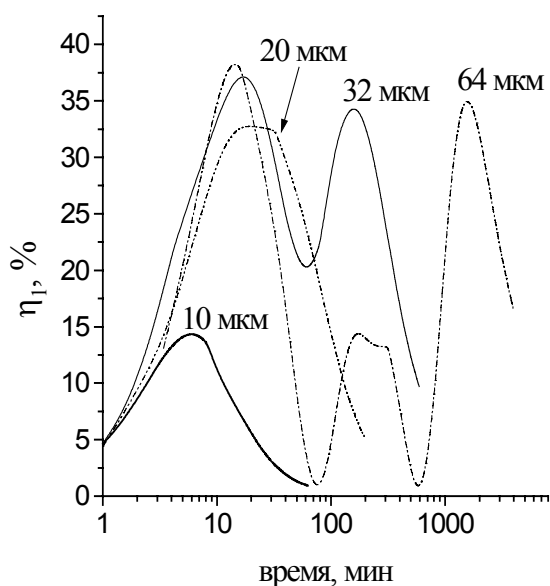


Рис.4. Эффективность дифракции в первом порядке в зависимости от времени для решеток различного периода

Далее в Главе II приведены результаты расчетов диффузионных профилей и эффективностей дифракции на решетках, которые могут быть сформированы

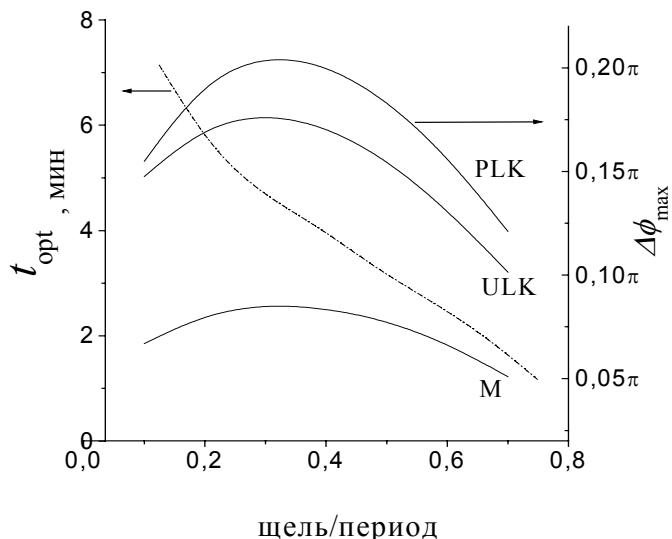


Рис.3. Зависимость максимального фазового набег (сплошная линия) и оптимального времени диффузии (пунктирная линия) от скважности решетки

получить дифракционную решетку достаточно малого периода, обеспечивающую высокую эффективность дифракции в первом порядке. Для повышения эффективности дифракции необходимо увеличить эффективную глубину диффузии. Этого можно добиться, обеспечив анизотропное движение ионов, а именно ускорив движение частиц вглубь от поверхности. Такой эффект может быть получен при приложении внешнего электрического поля перпендикулярно поверхности образца.

электростимулированным ионным обменом. Так как внешнее поле приложено только в направлении  $x$ , перпендикулярном плоскости маски (см. рис.2), для электростимулированного обмена естественно ожидать увеличения максимального фазового набега световой волны, который определяется глубиной диффузии, и сохранения оптимального времени диффузии, которое определяется моментом встречи диффузионных профилей от соседних щелей. Расчеты показали, что, как и предполагалось, время достижения максимального фазового набега практически не зависит от величины  $E$ . Величина максимального фазового набега в случае электродиффузии так же, как и в случае теплообмена, зависит от скважности. Максимум  $\Delta\phi$  можно получить при скважности маски 0.2-0.4. Как и ожидалось, электростимулированный ионный обмен позволяет получить гораздо большую величину  $\Delta\phi_{max}$ , чем термодиффузия.

Результаты расчетов дифракционных эффективностей решеток, полученных ионным обменом в электрическом поле  $E=0.5$  В/мкм, представлены на рис.5. Из рисунка видно, что, как и при термодиффузии, наибольшая эффективность дифракции достигается в стекле PLK. Для всех типов подложек величина максимальной эффективности дифракции существенно возрастает по сравнению с термодиффузией.

Глава III посвящена разработке и моделированию дифракционной решетки для 1:3 разветвителя для волоконной оптики. Разветвитель состоял из градиентной линзы на входе, склеенной с ней дифракционной решетки и градиентной линзы на выходе. Первая линза преобразовывала световой пучок, выходящий из оптоволокна, в плоскую волну, падающую на поверхность дифракционной решетки. Свет, проходя через решетку, разделялся на три пучка одинаковой интенсивности и затем с помощью второй линзы выводился в коллектор из трех оптических волокон.

Для формирования дифракционной решетки было выбрано стекло PLK, демонстрирующее нелинейный характер диффузии. Как было показано в Главе II,

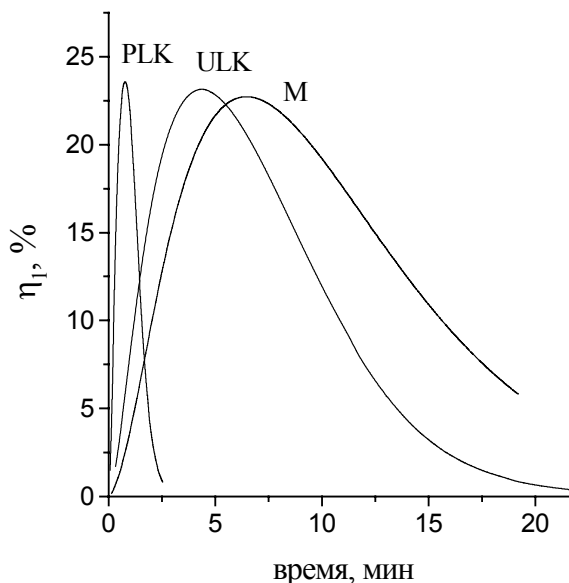


Рис.5. Временная зависимость эффективности дифракции в первом порядке для электродиффузии в исследуемых стеклах

использование стекла PLK позволяет получить наиболее эффективные решетки за малое время ионного обмена. Преимущества стекла PLK объясняются нелинейностью диффузии, а также тем, что при низкотемпературном ионном обмене в стекле PLK возникают меньшие напряжения по сравнению со стеклом ULK, поскольку матрица PLK не содержит  $\text{Li}^+$ , и ионный обмен в нем происходит между двумя близкими по радиусу компонентами:  $\text{Na}^+$  -  $\text{Ag}^+$ , тогда как в ULK в обмене участвуют 3 иона:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$  -  $\text{Ag}^+$ .

В Главе III представлены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния скорости установления концентрации на поверхности на формирование фазового фронта световой волны и дифракционные характеристики решетки. В конкретно рассматриваемом случае необходимо учитывать время установления постоянной концентрации на поверхности образца, которое может оказаться сопоставимым со временем диффузии. Такой учет может быть произведен постановкой граничных условий III рода

$$-D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = k_{\text{кин}} (C_{\text{max}} - C|_{x=0}),$$

где  $C_{\text{max}}=1$ ,  $k_{\text{кин}}$  – кинетический параметр, определяемый из эксперимента.

Расчеты, проведенные в Главе III, показали, что скорость установления концентрации на поверхности влияет не только на граничную концентрацию, но и на вид диффузионного профиля и приводит к уменьшению глубины диффузии. Соответственно, будет уменьшаться и фазовый набег световой волны (см.(3)). Таким образом, скорость установления концентрации на поверхности приводит к увеличению времени, необходимого для достижения той или иной величины фазового набега и эффективности дифракции.

Кроме скорости установления концентрации на поверхности, для точного расчета дифракционных характеристик полученной решетки необходимо учесть поверхностный рельеф, появляющийся при диффузии из-за отличия радиусов ионов, участвующих в обмене. Согласно исследованиям с помощью атомного силового микроскопа, высота рельефа поверхности порядка нескольких нанометров. Такой рельеф может приводить к дополнительной модуляции фазового набега, а значит должен быть включен в расчет  $\phi(y)$ .

В расчетах предполагалось, что высота рельефа  $h(y)$  в точке  $y$  пропорциональна полному числу атомов, продиффундировавших в данной точке  $h(y) = k_{\text{рел}} \cdot \int C(x, y) dx$ , где  $k_{\text{рел}}$  – константа. Дополнительный фазовый набег, определяемый поверхностным рельефом, вычислялся по формуле  $\phi_{\text{рел}}(y) = 2\pi/\lambda h(y) \cdot (n_s + \Delta n_{\text{max}} - n)$ , где  $n_s$  – показатель преломления стеклянной матрицы,  $\Delta n_{\text{max}}$  – максимальное изменение показателя преломления, вносимое

ионом-диффузантом,  $n$  – показатель преломления среды, соприкасающейся с подложкой (например, клея, используемого для соединения оптических элементов). Константа  $k_{\text{рел}}$  была определена из экспериментально измеренных дифракционных эффективностей для одной и той же решетки в различных иммерсиях.

Численное моделирование процесса формирования дифракционной решетки проводилось для диффузии сквозь маску периода 61.6 микрона со скважностью 0.4. Параметры решетки выбирались в соответствии с параметрами оптических волокон и градианов, использовавшихся в разветвителе. Выбор скважности маски определялся проведенными ранее расчетами, которые показали, что максимальную эффективность дифракции в первом порядке можно получить при соотношении щель/период 0.3-0.4.

Для определения константы  $k_{\text{рел}}$ , обуславливающей вклад поверхностного рельефа в эффективность дифракции, и кинетического параметра  $k_{\text{кин}}$  была изготовлена фазовая градиентная дифракционная решетка с периодом 61.6 микрона в стекле PLK. Время диффузии составляло 20 минут при температуре 265°C. Для изготовленной решетки были проведены измерения дифракционных эффективностей в различных иммерсиях: 1) в воздухе,  $n=1$ ; 2) в иммерсии 41,  $n=1.549$ ; 3) в иммерсии 67,  $n=1.627$ . Из экспериментальных данных были определены константа  $k_{\text{рел}}$ , которая составляла  $k_{\text{рел}}=0.007$ , и кинетический параметр  $k_{\text{кин}}=2.3$ .

Далее в Главе III был проведен расчет дифракционных характеристик решетки для 1:3 разветвителя с учетом скорости установления концентрации и рельефа на поверхности образца ( $k_{\text{кин}}=2.3$ ,  $k_{\text{рел}}=0.007$ ). Расчет проводился для иммерсии с показателем преломления 1.55, так как это соответствует значению показателя преломления оптического клея, который использовался для соединения различных элементов разветвителя. Временная зависимость величины  $\eta_1/\eta_0$  с учетом скорости установления концентрации на поверхности и поверхностного рельефа приведена на рис.6. Видно, что нужное для 1:3 разветвителя

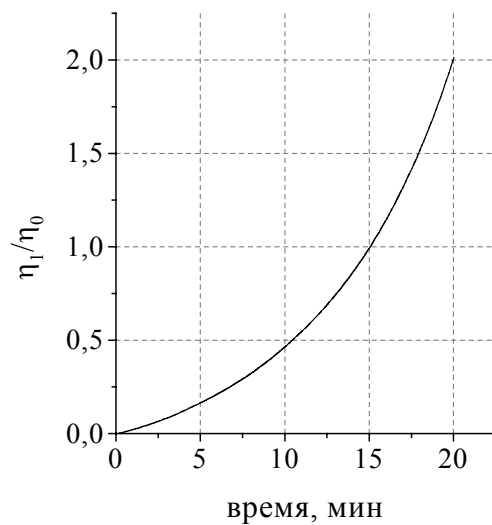


Рис.6. Расчетная зависимость относительной эффективности дифракции в первом порядке от времени (показатель преломления иммерсии 1.55)

соотношение  $\eta_1=\eta_0$  достигается в результате 15 минут диффузии. Таким образом, в результате моделирования найден режим ионного обмена, в соответствии с которым была сформирована решетка с равными интенсивностями света в нулевом и  $\pm 1^{0M}$  порядках дифракции, и изготовлен разветвитель.

В Главе IV представлены результаты моделирования процесса формирования ионообменных градиентных линз в стекле. В главе рассматривается формирование микролинз методом термического и электростимулированного ионного обмена, а также влияние последиффузионного отжига на фокусирующие свойства линзы. Моделирование проводится как для промышленного стекла ЛК 1552, так и для новой стеклянной матрицы.

Вначале в Главе IV приводятся результаты исследования микролинз, сформированных термодиффузией в стеклах М, PLK и ULK. Для термического ионного обмена через маску с круглым отверстием были рассчитаны профили концентрации диффундирующих ионов, а затем вычислены траектории световых лучей в среде с градиентом показателя преломления, сформированным в результате диффузии. Проведенные исследования показали, что точка

пересечения луча и оптической оси зависит от высоты падения луча, т.е. имеет место продольная aberrация. При этом с увеличением времени ионного обмена до некоторого значения  $t_{opt}$  происходит улучшение фокусирующих свойств формируемой линзы. При  $t > t_{opt}$  дальнейшего уменьшения aberrации не происходит. Сравнение фокусирующих способностей линз,

сформированных в стеклах М, ULK и PLK приведено на рис. 7. На этом рисунке изображены зависимости

фокусного расстояния от высоты падения луча для продолжительности ионного обмена  $t=t_{opt}$ . Из рисунка видно, что наименьшая aberrация наблюдается в случае стекла PLK, что объясняется выпуклой формой концентрационного профиля в этом стекле. Кроме того, расчеты показали, что и время  $t_{opt}$  является наименьшим для стекла PLK. Таким образом,

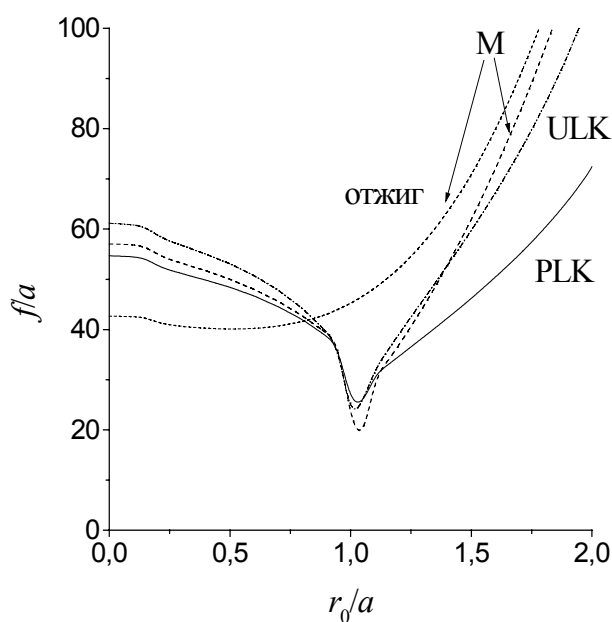


Рис.7. Зависимость фокусного расстояния от высоты падения луча ( $a$  - радиус линзы)

ионный обмен в стекле PLK позволяет сформировать микролинзу с наименьшей абберацией за более короткое время диффузии по сравнению со стеклами ULK и M.

Далее в работе проводилось исследование влияния последидиффузионного отжига на продольную абберацию микролинз, сформированных термическим ионным обменом. В результате моделирования было установлено, что отжиг позволяет значительно улучшить фокусирующие свойства линзы. Однако в процессе отжига в результате сглаживания диффузионного профиля происходит также уменьшение величины  $\Delta n_{max}$ , и при слишком большом времени отжига это приведет к практически полному исчезновению градиента показателя преломления. Таким образом, существует оптимальная продолжительность отжига, позволяющая сформировать линзу с наименьшей абберацией.

Проведенные в диссертации исследования показали, что с увеличением времени диффузии фокусное расстояние микролинз уменьшается. Так для линзы, сформированной в стекле ULK (радиус отверстия маски 10 микрон, температура диффузии 300°C), увеличение времени ионного обмена с 250 до 1334 часов приводит к уменьшению фокуса с 1550 до 600 микрон. Увеличение продолжительности отжига также сопровождается уменьшением фокуса линзы до тех пор, пока время отжига не превышает оптимального значения; затем фокусное расстояние увеличивается по мере роста продолжительности отжига. Влияние отжига на фокусное расстояние и абберацию линзы демонстрируется рис.7 для стекла M.

Далее в работе рассматривалось влияние внешнего электрического поля на процесс

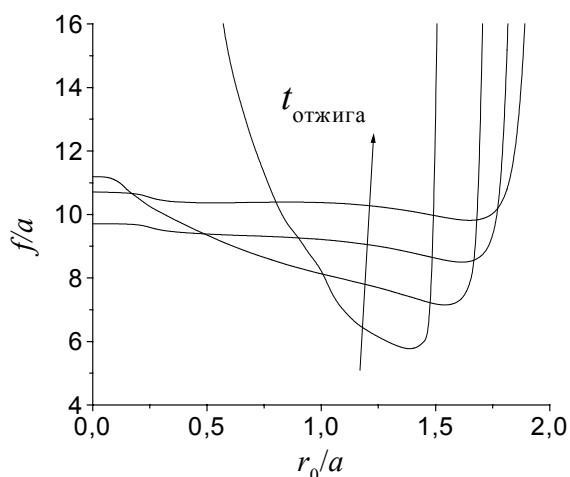


Рис.8. Изменение зависимости фокуса от высоты падения луча в процессе последидиффузионного отжига ( $a$  - радиус линзы)

формирования и оптические характеристики ионообменных микролинз. Ранее уже говорилось, что приложение внешнего электрического поля приводит к увеличению глубины диффузии при том же времени ионного обмена. Увеличение глубины градиентной области, в свою очередь, приводит к формированию микролинз с более коротким фокусным расстоянием. В частности, для линзы, сформированной в стекле PLK (радиус отверстия маски 25 микрон), приложение внешнего электрического поля 0.2 В/мкм уменьшает фокусное расстояние с 1375 до 475 микрон.



Расчеты показали, что, как и в случае термодиффузии, для электростимулированного ионного обмена существует оптимальная продолжительность диффузии, для которой абберрация сформированной микролинзы минимальна. Кроме того, фокусирующие свойства линзы могут быть значительно улучшены в процессе последиффузионного отжига. Существует оптимальное время отжига, которое, вообще говоря, зависит от режимов ионного обмена – его продолжительности, температуры и внешнего электрического поля. При этом абберрации отожженной линзы уменьшаются по мере увеличения времени диффузии и существенно меньше аналогичных значений для линз, полученных термодиффузией. Влияние отжига на фокусирующие свойства микролинзы, сформированной методом электростимулированного ионного обмена в стекле PLK, демонстрируется рис.8. Из рисунка видно, что в процессе отжига можно получить линзу, абберрация которой в области  $0 \leq r_0 \leq a$  порядка 5%. Таким образом, метод электростимулированного ионного обмена, сопровождаемый последиффузионным отжигом, позволяет сформировать микролинзы с малой абберрацией.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы:

1. Зависимость коэффициента диффузии от концентрации влияет на скорость ионообменного процесса и определяет форму концентрационного профиля. За счет меньших напряжений, возникающих при ионном обмене, и выпуклой формы профиля концентрации стеклянная матрица, образованная из промышленного стекла ЛК 1552 заменой  $Li^+$  на  $Na^+$ , при прочих равных условиях позволяет сформировать дифракционные решетки с большей эффективностью и микролинзы с меньшей абберрацией за более короткое время ионного обмена, чем стекло ЛК 1552 и стекло, демонстрирующее линейный характер диффузии.
2. При изготовлении дифракционных решеток методом ионного обмена в стекле существует оптимальная скважность маски и оптимальное время диффузии такие, что эффективность дифракции в первом порядке максимальна.
3. При формировании микролинз увеличение времени диффузии до некоторого времени  $t_{opt}$  приводит к улучшению фокусирующих свойств микролинзы. Если время ионного обмена превышает  $t_{opt}$ , дальнейшего уменьшения абберрации при увеличении продолжительности диффузии не происходит.
4. Диффузия во внешнем электрическом поле позволяет получать более эффективные дифракционные решетки и микролинзы с меньшим фокусным расстоянием и абберрацией.
5. Последиффузионный отжиг приводит к существенному улучшению фокусирующих свойств градиентных ионообменных микролинз, сформированных в процессе

термического или электростимулированного ионного обмена; при этом существует оптимальная продолжительность отжига, позволяющая сформировать линзу с наименьшей абберацией.

6. С увеличением времени диффузии фокусное расстояние микролинз уменьшается. Увеличение продолжительности отжига также приводит к уменьшению фокуса линзы до тех пор, пока время отжига не превышает оптимального значения; затем фокусное расстояние увеличивается по мере роста продолжительности отжига.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Linares J., Sotelo D., Lipovskii A.A., Zhurihina V.V., Tagantsev D.K., Turunen J. New glasses for graded-index optics: influence of non-linear diffusion in the formation of optical microstructures // Opt.Materials. 2000. V.14. №2. P.145-153.
2. Карапетян Г.О., Журихина В.В., Липовский А.А., Таганцев Д.К., Татаринцев Б.В. Влияние нелинейности диффузии на характеристики градиентных дифракционных структур, формируемых в стеклах методом ионного обмена // Физика и химия стекла. 2000. Т.26. №2. С. 258-269.
3. Gordova M.R., Liñares J., Lipovskii A.A., Zhurihina V.V., Tagantsev D.K., Tatarintsev B.V., Turunen J. A prototype of hybrid diffractive/graded-index splitter for fiber optics // Optical Engineering. 2001. V.40. №8. P.1507-1512.
4. Журихина В.В. Диффузионные фазовые дифракционные решетки // Оптика и спектроскопия. 2000. Т.89. №6. С.1000-1004.
5. Журихина В.В. Влияние нелинейности диффузии и внешнего электрического поля на формирование ионообменных дифракционных решеток в стекле // Оптика и спектроскопия. 2001. Т.91. №1. С.144-146.

**Литература:**

1. Abou-El-Leil M., Cooper A.R. Analysis of field-assisted binary ion-exchange // J.Amer.Ceram.Soc. 1979. V.62. P.390-395.
2. Albert J., Lit J.W.Y. // Full modeling of field assisted ion-exchange for graded index buried channel optical waveguides. Appl.Opt. 1990. V.29. №18. P.2798-2804.
3. Lupascu A., Kevorkian A., Boudet T., Saint-Andre F., Persegol D., Levy M. Modeling ion exchange in glass with concentration-dependent diffusion coefficients and mobilities // Opt.Eng. 1996. V.35. №6. P.1603-1610.
4. Crank J. The Mathematics of Diffusion. Oxford: Clarendon. 1975. p.61