

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Петра Великого  
Институт металлургии машиностроения и транспорта  
Кафедра физико-химии и технологии микросистемной техники

Работа допущена к защите  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ С. Е. Александров  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема: **Оптимизация режима ионного обмена в стеклах для получения  
градиентного циркулязатора излучения диодных лазеров**  
Направление: 22.03.01 – Материаловедение и технологии материалов

Выполнил студент гр. 43313/1  
Руководитель, доктор хим. наук

А.М. Паршуков  
Д.К. Таганцев

Санкт-Петербург  
2017

## **Аннотация**

Общий объем работы составляет 28 страниц, включая 16 рисунков, 12 формул и 1 таблицу. Список используемой литературы содержит 7 источников.

Целью работы является оптимизация режима ионного обмена в пластине стекла для формирования параболического распределения показателя преломления. Была произведено моделирование оптимального ионно-обменного режима для получения градиентных цилиндрических линз из стекла ТЛ. Проведенные расчеты доказывают, что полученные режимы могут обеспечить получение высокоапертурных градиентных цилиндрических линз с поперечной сферической абберацией порядка 4мкм.

Ключевые слова: градан, диффузант, ионный обмен.

## Содержание

Введение.....	4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ .....	14
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	15
4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	19
Заключение .....	27
Список используемой литературы .....	28

## Введение

В современной оптотехнике используется огромное количество материалов, как простых, так и сложных, композиционных, комбинированных [1]. Производство материалов с новыми оптическими характеристиками способствует созданию оптических приборов, основанных на новых принципах и обладающих уникальными свойствами.

Основным требованием, предъявляемым к оптическим материалам, является их высокая однородность и прозрачность для оптического излучения. В основном, такие материалы получают искусственным путём различными технологическими методами, используя различные химические элементы и их соединения. При построении любых традиционных оптических систем используются всего два класса переменных: свойства материала, такие, как показатель преломления  $n$ , дисперсия и другие, и параметры формообразующих поверхностей.

Оптические материалы делятся на следующие типы: цветное, бесцветное и кварцевое стекла, монокристаллы, поликристаллы, ситаллы и волоконно-оптические элементы. Цветные стекла используются для изготовления светофильтров с избирательным поглощением светового излучения в широком диапазоне [2]. Ситаллы представляют собой особый класс стеклокерамических материалов, имеющих в своей основе стеклообразную матрицу с кристаллами размером не более 1 мкм, равномерно распределенных по всему объёму стеклообразного вещества [3]. В качестве оптического материала наибольшую популярность получили оптические стекла, так как они обладают многообразием оптических свойств, хорошими технологическими и эксплуатационными качествами.

Оптические стекла используются в производстве оптических деталей, приборов, оптико-технических устройствах, а также, используются для создания астрономических устройств.

Появление и развитие градиентной оптики обычно принято связывать с теоретическими работами Максвелла (1854 год) и получением градиентных

оптических элементов, передающих изображение, в Японии, Америке и России в конце 60-х — начале 70-х годах. Вся природная оптика, как было показано еще в середине XIX в., помимо кривизны преломляющих поверхностей, характеризуется наличием градиента  $n$ . Существование распределения  $n$  в природных объектах, в том числе и в хрусталике глаза человека, закономерно, так как при этом становится несущественным иммерсирующее действие солевых растворов. То же характерно и для градиентной оптики: она хорошо работает как в воздухе, так и в жидких средах [4].

Развитие ионообменных технологий позволило ввести в оптику новую переменную — строго заданное пространственное распределение основных оптических характеристик. Это позволяет существенно упростить решение классических задач оптики, т.е. снизить в приборах число элементов без потери качества изображения и решить ряд принципиально новых проблем оптоэлектроники и микрооптики.

Для обеспечения формирования и трансляции изображения используются градиентные элементы с радиальным распределением  $n$  (граданы). С помощью диффузионных процессов создаются рациональные технологии массового производства градиентных элементов широкого спектра использования.

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Самым распространенным представителем градиентной оптики являются граданы. Градан, или GRIN lens (по международной терминологии), представляет собой цилиндрический стержень с радиальным распределением показателя преломления (рис.1), соответствующим выражению (1)

$$n^2(r) = n_0^2 \operatorname{sech}^2(g^2 r^2) \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления,  $n_0$  – показатель преломления на оси стержня,  $r$  – радиальная координата,  $g = R^{-1}(2\Delta n/n_0)^{1/2}$  – градиентная константа ( $R$  – радиус стержня, а  $\Delta n$  – разность (перепад) между показателями преломления на оси стержня и его боковой поверхности) [5].

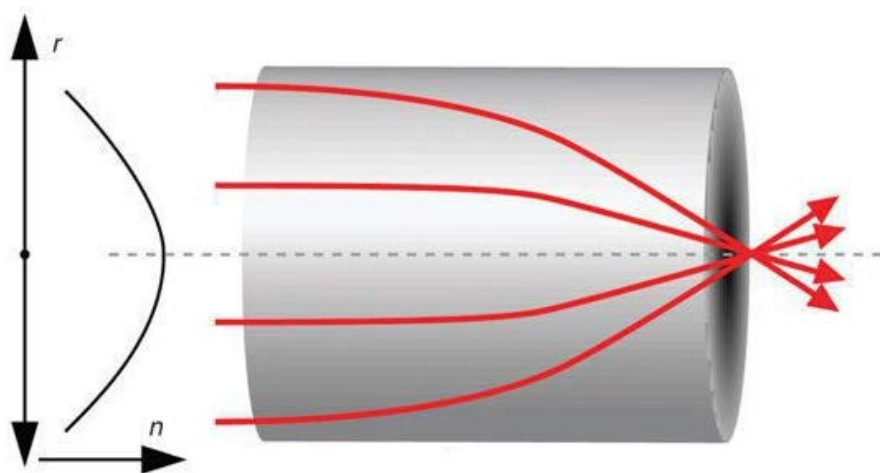


Рис. 1. Распределение показателя преломления в градане

Траектория движения лучей в градане близка к косинусоидальной с периодичностью  $\Omega = 2\pi/g$ , а на оси градана окажется определенное количество точек, которые будут расположены на расстоянии  $(2i - 1)\Omega/4$  от входного торца, где  $i = 1, 2, 3$  и т.д.

На сегодняшний день граданы широко используются во многих оптических приборах и устройствах. Большая часть современных копировальных машин оборудована двух- или трехрядными полосами граданов, которые предназначены для считывания и переноса текстовой и

графической информации с объекта сканирования на фоточувствительный барабан, на котором формируется шаблон для печати (рис. 2).



Рис. 2. Двухрядные полосы градианов в сканирующем устройстве

Благодаря тому, что поверхности градиентных элементов плоские, они могут складываться в стопки, образуя при этом сложные оптические структуры, которые будут сочетать в этом блоке дифракционные и фокусирующие свойства. Первым оптическим устройством, в котором использовался такой принцип, был волоконный делитель (рис. 3).

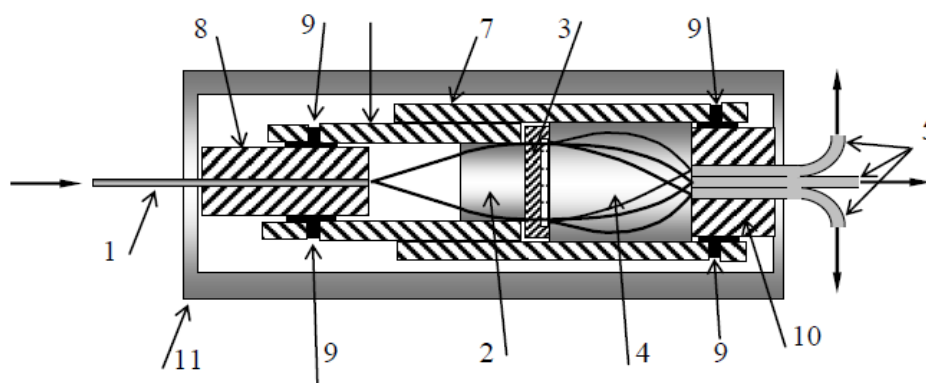


Рис. 3. Волоконный делитель в сборке

Расходящийся световой пучок от входного волокна попадает на входной торец градана 2, который формирует на выходе плоский фронт, попадающий на фазовую дифракционную решетку 3. Из-за дифракции светового пучка на решетку появляются три световых пучка равной

интенсивности. Выходной градан 4 фокусирует эти пучки в три равноудаленных пятна, свет из которых попадает в три одинаковых выходных волокна. Делитель используется для разветвления оптического сигнала, несущего информацию [5].

Граданы используют в коллиматорах для формирования пучков диодных лазеров или для стыковки волокон и интегрально-оптических устройств (рис. 4).

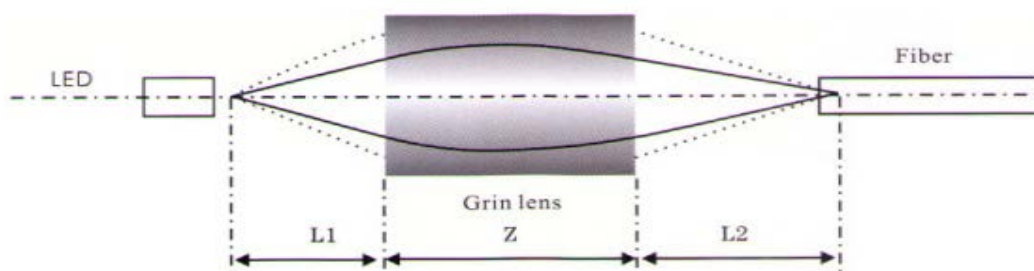
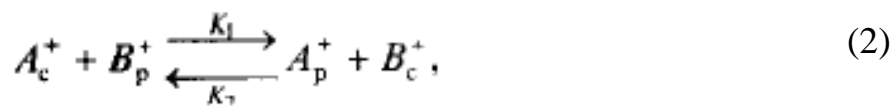


Рис. 4. Оптический коллиматор

Процесс ионного обмена представляет собой следующее: выдерживая стекло, которое содержит ионы типа А, в расплавах соли, содержащей ионы типа В, ионы стекла типа А могут выходить через поверхность стекла в расплав и замещаться ионами расплава типа В. Образовавшиеся в приповерхностном слое стекла градиенты концентраций ионов А и В способствуют возникновению диффузионных потоков ионов А из глубины образца к его поверхности и ионов В от поверхности вглубь образца. В результате, под поверхностью образца будет образовываться слой, состав которого монотонно изменяется от поверхности вглубь и будет определяться профилями концентрации ионов А и В.

В следствие того, что ионы А и В несут на себе положительной заряд, а диффузия проходит по обменному механизму, который, из-за подвижностей обменивающихся катионов, способствует поддержанию электронейтральности образца в любой точке его объема. Принцип электронейтральности выражается следующей химической реакцией (2):





где индексы «р» и «с» обозначают стекло и расплав, соответственно, или уравнением  $A_c + B_c = 1$ , которое выражает то обстоятельство, что в процессе ионного обмена суммарная концентрация ионов А и В в любой части образца остается неизменной, а  $K_1$  и  $K_2$  – константы скоростей прямой и обратной реакций. Поэтому, когда исходное стекло и расплав соли содержат по одному (но разному) типу катионов, способных к ионному обмену, для описания процесса диффузии достаточно следить за концентрацией только одного типа катионов, например А.

В этом случае, процесс формирования поверхностного слоя переменного состава описывают всего одним уравнением (3) (вторым законом Фика), содержащим только один параметр (коэффициент взаимодиффузии D):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[D(C)\nabla C] \quad (3)$$

Метод ионообменной диффузии широко используется для получения заданного распределения показателя преломления. Различаются два типа процессов: низкотемпературный ионный обмен, при котором релаксационные процессы в стекле сильно заторможены, и высокотемпературный ионный обмен, при котором подвижность структурной сетки стекла достаточна для полноценного протекания релаксации структуры.

Основной задачей разработки технологии градиентных оптических элементов является поиск режимов ионообменной обработки, обеспечивающих создание заданного профиля показателя преломления в заготовках будущего изделия. В процессе ионного обмена содержащиеся в матрице положительно заряженные ионы заменяются ионами из внешнего

источника, которым может служить солевой расплав, т.е. необходимо провести выдержку заготовки, в основном, в расплавах нитратов и сульфатов при температурах, соответствующих вязкости стекла ( $10^8 - 10^{14}$  Па·с). Диффузионные потоки появляются благодаря возникновению в приповерхностном слое стекла градиента концентраций ионов. В результате, под поверхностью образца образуется слой, состав которого монотонно меняется от поверхности вглубь и определяется профилями концентрации ионов.

Рассмотрим случай, когда катион типа А входит в стекло и затем диффундирует вглубь (катион В при этом выходит в расплав и диффундирует из глубины образца). В результате ионного обмена и последующей диффузии в образце возникнет распределение концентраций катионов А, которые, в случае бесконечной пластины, можно описать системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ f(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right]; \quad (4)$$

$$\left[ f(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x=1} = Bi(c_\infty - c_{x=1}); \quad (5)$$

$$\left[ f(c) \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x=0} = -Bi(c_\infty - c_{x=0}); \quad (6)$$

$$c_{t=0} = 1. \quad (7)$$

где (4) – уравнение диффузии в прямоугольных координатах; (5) и (6) – граничные условия, которые ставят условие «сшивания» потоков на границе раздела «стекло – расплав соли»; (7) – начальные условия. Величины  $c$ ,  $t$  и  $x$  – безразмерные, концентрация, время и координата соответственно, определенные следующими выражениями:

$c = C/C_0$ ,  $x = l/L$ ,  $t = \tau / t_0$ , где  $t_0 = L^2/D_0$ , где  $C_0$  – размерная концентрация иона в исходном стекле;  $l$  – размерная текущая координата;  $L$  – толщина пластины;  $\tau$  – размерное время;  $D_0$  – характерное значение коэффициента

взаимодиффузии;  $f(c)$  – функция концентрации, определяющая зависимость коэффициента взаимодиффузии  $D(C)$  от безразмерной концентрации как  $D(C) = D_0 f(c)$ ;  $Bi$  – критерий подобия Био, который равен  $(\alpha/D_0)L$ , а  $\alpha$  и  $c_\infty$  – кинетический коэффициент и равновесная концентрация диффундирующего иона в стекле, которые могут быть определены по формулам (8) и (9):

$$\alpha = K_1 C_A + K_2 C_B; \quad (8)$$

$$c_\infty = K_1 C_A / \alpha, \quad (9)$$

где  $C_A$  и  $C_B$  – концентрации ионов в расплаве соли.

В общем случае процесс диффузии нелинейный, т.е. подвижности участвующих в процессе ионов зависят от концентрации этих ионов [6].

Для моделирования ионообменного процесса необходима информация либо о численном значении коэффициента диффузии (в линейном случае), либо о его зависимости от концентрации (в нелинейном случае), которая может быть получена из экспериментальных профилей концентраций, с помощью методики Больцмана – Матано [7].

По этой методике коэффициент в уравнении планарной термической диффузии (4) можно найти, проведя измерения экспериментального профиля распределения концентрации для одномерной диффузии при фиксированной температуре.

В этом случае, зависимость  $D(C)$  может быть найдена по формуле Больцмана (10):

$$D(C) = -\frac{1}{2t} \frac{dx}{dc} \int_C^{c_s} x(C) dC \quad (10)$$

где  $t$  – продолжительность диффузии,  $x$  – расстояние от границы,  $c_s$  – поверхностная концентрация входящих ионов. Производная  $dx/dc$  и значение интеграла могут быть определены из экспериментальных диффузионных профилей.

Моделирование процесса ионного обмена позволяет определять технологические параметры процесса, обеспечивающие формирования

заданного распределения концентрации диффундирующего иона и, в дальнейшем, характеристики града.

Наиболее важной характеристикой ионного обмена являются концентрационные профили обмениваемых ионов, которые определяются в процессе изменения профилей показателя преломления. Так как показатель преломления в оксидных стеклах в основном линейно зависит от концентраций щелочных и других одновалентных катионов, то есть, тех катионов, которые в основном и используются для формирования градиентных оптических структур, связь показателя преломления с концентрацией диффузанта, может быть представлена в виде линейной зависимости (11)

$$n = n_s + \Delta n_{max} \cdot C, \quad (11)$$

где  $n_s$  – показатель преломления исходного стекла,  $C$  - концентрация допирующих ионов,  $\Delta n_{max}$  - максимальное изменение показателя преломления, которое достигается при проведении ионного обмена (измеряется экспериментально).

Линейная связь между  $\Delta n$  и  $C$  дает возможность использовать оптические измерения для определения профиля концентрации, который формируется в результате диффузии, т.е. по оптическим диффузионным профилям с помощью метода Больцмана возможно определить зависимость коэффициента диффузии от перепада показателя преломления  $D(\Delta n)$ , а не концентрации  $D(C)$ . Использование в качестве аргумента показатель преломления, а не концентрацию гораздо удобнее, так как, для дальнейших расчетов при решении оптических задач наибольшее значение будет иметь именно профиль показателя преломления  $\Delta n(x)$ , а не концентрации.

Доказательством служит то, что, при подстановке уравнения (11) в уравнение диффузии (4), мы получим уравнение (12), решением которого является профиль показателя преломления

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\Delta n) \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \right), \quad (12)$$

где  $\Delta n = n_s - n$ , а  $D(\Delta n)$  – зависимость коэффициента диффузии от перепада показателя преломления, найденная методом Больцмана из профиля показателя преломления, полученного при одномерной ионообменной диффузии при известных температуре и времени процесса.

Циркулязатор (рис.5) представляет собой градиентную цилиндрическую линзу (1), которая преобразует астигматический пучок (2) от лазера (3) в круглый, то есть в сферический волновой фронт (4). Распределение показателя преломления (5) в линзе имеет параболический вид.

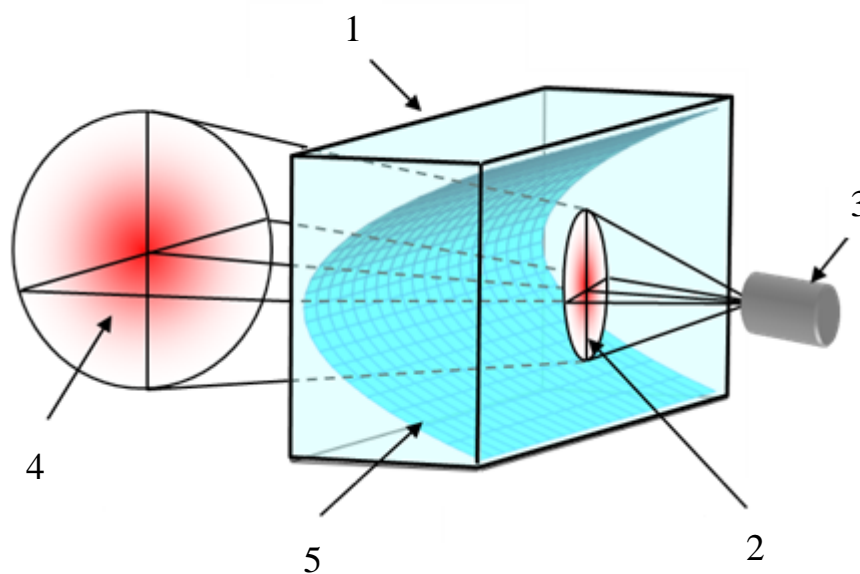


Рис. 5. Циркулязатор излучения диодных лазеров

## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Практически все диодные лазеры генерируют световые пучки с сильным астигматизмом. Это обстоятельство приводит к значительным потерям при стыковке диодных лазеров с оптическим волокном. Проблема решается с помощью цилиндрических линз, установленных на выходной зрачек диодного лазера. В качестве цилиндрических линз часто используются куски оптического волокна. Однако те же функции может выполнять тонкий брусок стекла с прямоугольным сечением, в котором в поперечном направлении реализован параболический профиль показателя преломления. Такой брусок принято называть градиентной цилиндрической линзой.

Цель: Определение зависимости коэффициента диффузии от концентрации диффузанта и, используя полученную зависимость, проведение оптимизации режима ионного обмена в пластину стекла, обеспечивающего в ней в поперечном направлении формирование параболического распределения показателя преломления.

Для выполнения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- определить температурно-временной диапазон проведения ионного обмена в стекле ТЛ, необходимый для получения экспериментальных образцов;
- провести интерферометрические измерения профилей показателя преломления в образцах, подвергнутых ионному обмену при найденной температуре, но за разное время;
- произвести математическую обработку полученных профилей показателя преломления и определить зависимость коэффициента диффузии от концентрации диффузанта;
- провести моделирование оптимального ионно-обменного режима для получения градиентных цилиндрических линз из стекла ТЛ.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе были использованы тонкие срезы, полученные из образцов кубической формы, подвергнутых ионному обмену в солевом расплаве нитрата калия ( $KNO_3$ ) в течение разного времени. Ниже приведена таблица (табл. 1), в которой представлен состав стекла ТЛ, которое использовалось в настоящей работе.

Табл.1 Состав стеклянного образца

Вещество	Содержание, масс %
$Tl_2O$	30
$Na_2O$	10.6
$K_2O$	3.4
$SiO_2$	43.5
$ZnO$	12.5

Методы измерения профилей показателя преломления  $n$  можно разделить на две группы: интерферометрические и рефрактометрические. Самыми простыми являются интерферометрические методы, а наиболее распространенным – метод «тонкого среза».

Измерение радиального распределения показателя преломления в градах по методу тонкого среза осуществляется с помощью интерферометра Маха-Цендера (рис. 6). В состав данного интерферометра входят: два сплошных зеркала 1, два полупрозрачных зеркала 2, когерентный источник свет 3 и горизонтальный микроскоп 4. В интерферометре, использованном в данном исследовании, источник свет был He-Ne лазер ( $\lambda=0,63$  мкм). Кроме того, микроскоп интерферометра был оснащен цифровой камерой 5, что позволяло разделить во времени процедуру измерения и анализа результирующей интерференционной картины.

В исходном положении интерферометр настроен на полосу бесконечной ширины, то есть зеркала интерферометра выставляются таким образом, чтобы оптические пути в опорном и измерительном плече

интерферометра были равны, и оптическое поле, образованное наложением опорного и измерительного пучков и наблюдаемое через микроскоп, имело однородную освещенность.

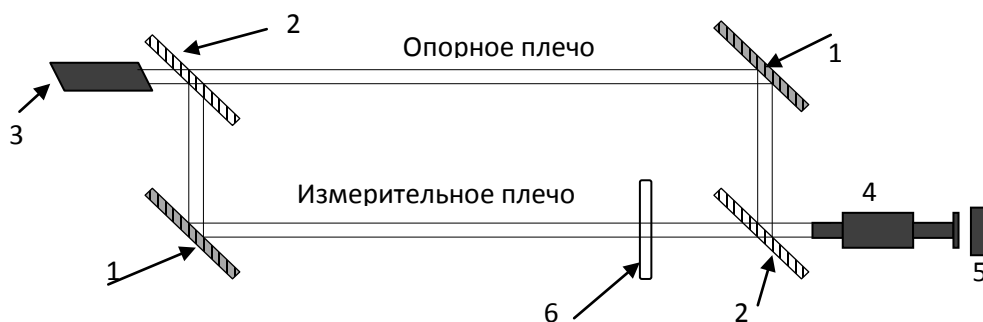


Рис. 6. Интерферометр Маха-Цендера

Принцип действия интерферометра заключается в следующем: когда в измерительное плечо интерферометра помещается прозрачный объект с показателем преломления, отличным от воздуха, равенство оптических путей в опорном и измерительном плечах нарушается за счет изменения оптического пути. Если обозначить толщину образца как  $d$ , а показатель преломления материала  $n$ , то разность оптических путей через плечи интерферометра можно выразить как  $(n \times d) - (1 \times d) = d\Delta n$ , где  $\Delta n = n - 1$ , а показатель преломления воздуха равен 1. Разность оптических путей, то есть величина  $d\Delta n/\lambda$ , умноженная на  $2\pi$ , будет означать фазовый сдвиг волнового фронта измерительного пучка, которое вызвано присутствием в нем образца с показателем преломления, отличным от воздуха.

При сдвиге фазы на  $k\pi$  ( $k$  – нечетное целое число), амплитуды света в опорном и измерительном пучках входят в объектную плоскость микроскопа в противофазе и, как следствие, гасят друг друга. Светлое поле, наблюдаемое через микроскоп в отсутствии образца, становится темным в присутствии образца.

Возникновение интерференционной картины в исследуемом образце обусловлено неоднородностью показателя преломления. Тонкий срез исследуемого графана, в плоскости которого лежит распределение показателя



преломления, помещается в измерительное плечо интерферометра, настроенного на полосу бесконечной ширины.

Срез – это плоскопараллельный диск, вырезанный из изучаемого градана в направлении, перпендикулярном его оптической оси. Луч измерительного плеча интерферометра направлен нормально к поверхности диска. В тонком срезе существование градиента показателя преломления возможно только в радиальном направлении, а независимо от толщины показатель преломления остается постоянным.

Учитывая тот факт, что при одинаковой толщине среза значение показателя преломления в самой плоскости среза будет различным, при наведении фокальной плоскости микроскопа на тонкий срез будут представлены интерференционные полосы, имеющие одинаковый оптический путь, или, при фиксированной толщине пластины, одинаковый показатель преломления. Так как, оптический путь - это произведение физического пути луча через оптическую среду на её показатель преломления, любые две соседние полосы будут локализоваться в областях, отличающихся друг от друга по показателю преломления на величину  $\lambda/d$ , где  $\lambda$  - длина волны света, а  $d$  - толщина пластинки (рис. 7).

Таким образом, если известна толщина пластинки, то можно рассчитать все поле показателя преломления по координатам выхода полос одного цвета, то есть функцию  $n(x)$ , используя условие  $n(x_2) - n(x_1) = \Delta n = \lambda/d$

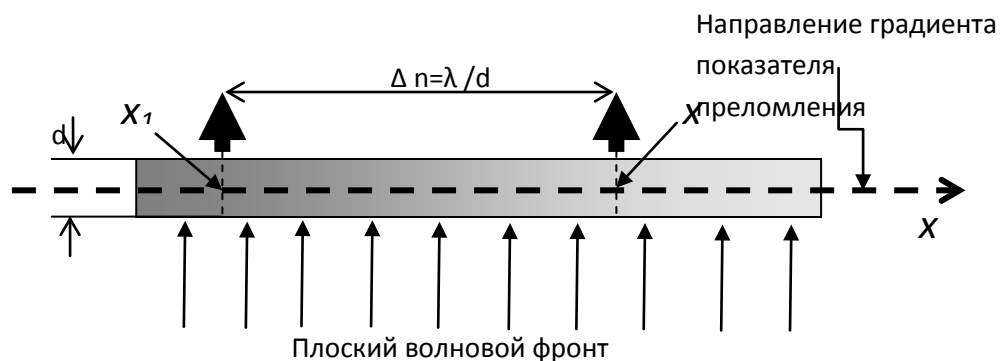


Рис. 7. Построение интерференционной картины в тонком срезе градана; толстыми черными стрелками показаны места выхода полос одного цвета (темных или светлых)

Главное требование к срезу: он должен быть достаточно тонок, чтобы его можно было считать чисто фазовым объектом. Так как, при увеличении толщины образца из-за искривления лучей в нем возрастает ошибка в определении места локализации полос. Погрешность определения из-за искривления лучей зависит от толщины среза. При допустимой погрешности, равной 0,5 %, предельная толщина образца может быть рассчитана по формуле  $d = (0,05R) \sqrt{(n_0/2\Delta n)}$ , где  $n_0$  – показатель преломления на оси градана;  $R$  – радиус градана.

Полученные интерференционные картины были сфотографированы и перенесены в программу Photoshop для нахождения радиальных координат максимумом белых или черных полос (в нашем случае черных). Полученные данные обрабатывались для получения профиля перепада показателя преломления; по оси  $X$  откладывали найденные в программе Photoshop координаты, а по оси  $Y$  – значения показателя преломления, соответствующие данным координатам и рассчитанные по формуле  $m\lambda/d$ , где  $m$  – номер черной полосы, отсчитанный от оси градана.

Обработка полученных профилей производилась в программе MathLab в программе №1, в которой была определена зависимость  $D(n)$  и в программе №2, в которой определялся оптимальный режим ионного обмена.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования, связанные с поиском температурно-временной области, которая обеспечивает формирование в стекле ТЛ диффузионных профилей глубиной до 1мм, показали, что оптимальный диапазон температур составляет 560-562 °С.

С помощью интерферометра Маха-Цендера были получены интерферограммы тонких срезов образцов, необходимых для изучения. Ниже представлен пример образца среза, подвергнутого ионному обмену в расплаве калия при температуре равной 562 °С в течение 70 (рис. 8).

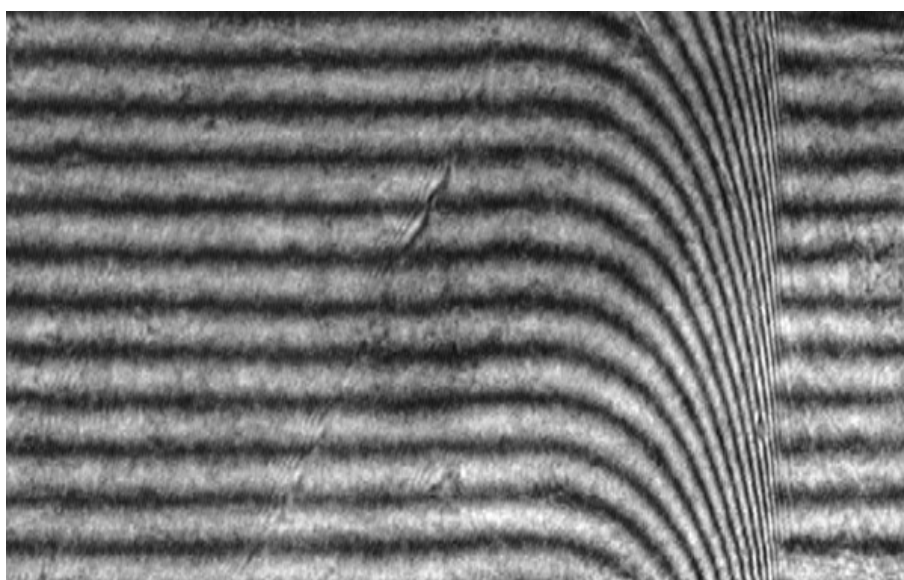


Рис. 8. Интерферограмма тонкого среза образца стекла ТЛ, подвергнутого ионному обмену в нитрате калия при температуре 562 °С в течение 70 часов

После обработки интерферограмм с помощью программы Photoshop, данные были преобразованы, и на основе полученных данных были построены профили показателя преломления для образцов, подверженных ионному обмену в течение 43 и 70 часов (рис. 9).

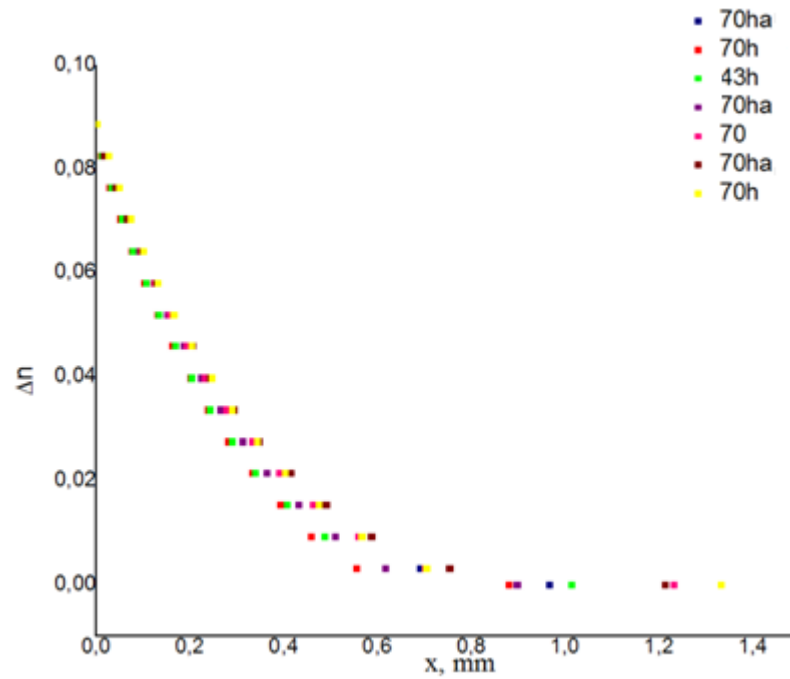


Рис. 9. Профили распределения показателя преломления исследуемых образцов

Следующим шагом была проверка полученных распределений на автомодельность. На рис. 10 изображены профили показателя преломления в автомодельных координатах.

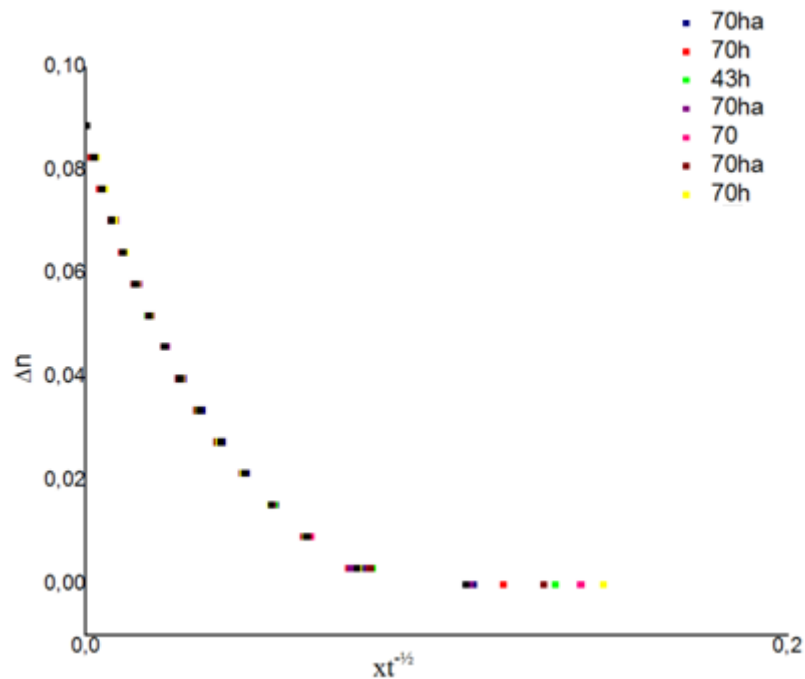


Рис. 10. Профили распределения показателя преломления исследуемых образцов в автомодельных координатах

График распределения на рис. 9 показывает совпадение профилей, что подтверждает их автомодельность. На основе полученных данных был построен профиль процесса длительностью 100ч (рис. 11), используемый для нахождения зависимости  $D(n)$  в последующих операциях.

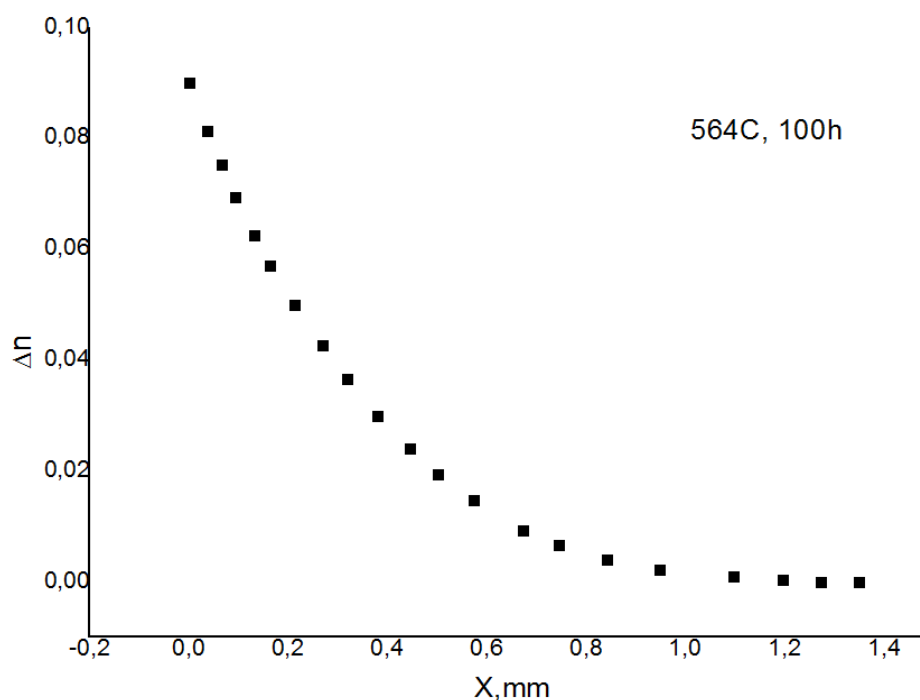


Рис. 11. Профиль распределения показателя преломления при ионном обмене длительностью 100 часов

Полученный профиль использовался в Программе №1 для определения табулированной зависимости  $D(n)$  по методу Больцмана-Матано. Обработка производилась при следующих параметрах:

Длина волны излучения – 0,63 мкм

Показатель преломления среды – 1,64

Время диффузии – 6000 минут

Глубина диффузии – 1500 мкм

В программе №1 было произведено аппроксимирование табулированной зависимости  $D(n)$  полиномом заданной шестой степени. Окно программы с рассчитанным и аппроксимированным профилем  $D(n)$  представлено на рис. 12. Слева изображен сглаженный профиль зависимости

$n(x)$ , а справа изображен профиль зависимости  $D(n)$ . Красной линией показано поведение полиномиальной функции, которой было произведено аппроксимирование зависимости  $D(n)$ . Из этих этой зависимости видно, что полином шестой степени подходит для описания полученной зависимости.

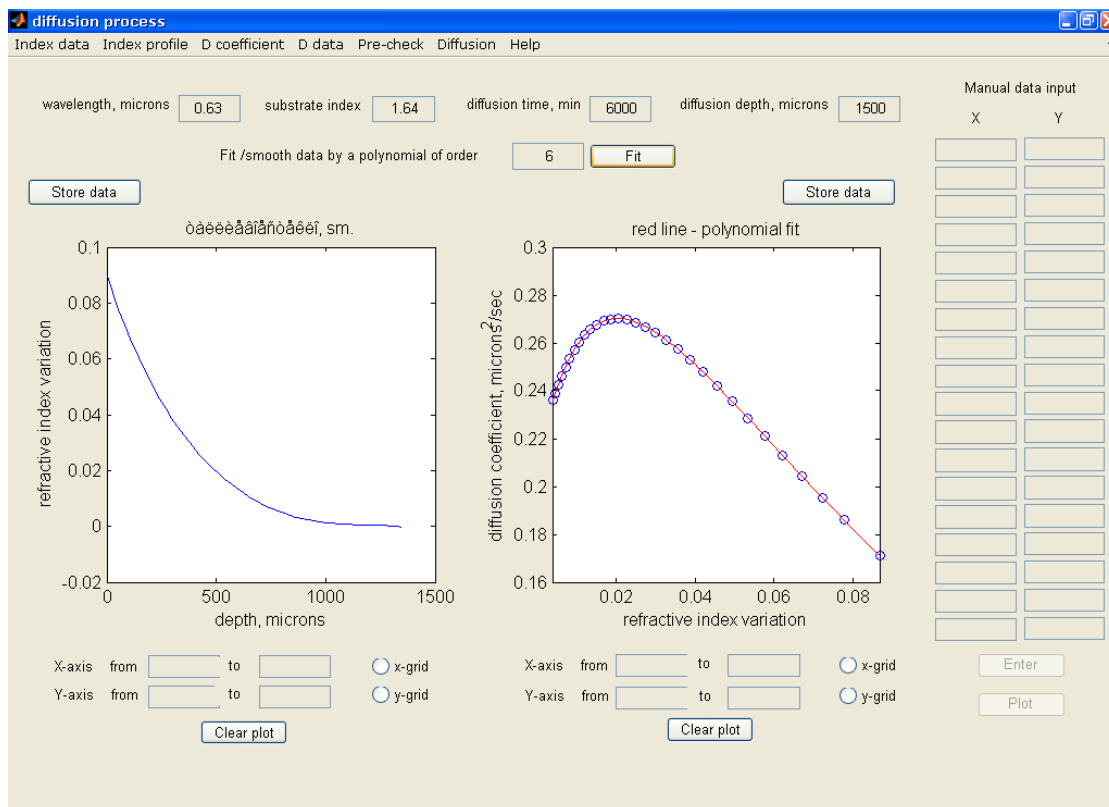


Рис. 12. Окно программы №1, в котором показаны рассчитанный и аппроксимированный профили  $D(n)$

В программе №2 производили расчёт режима ионного обмена для пластины толщиной 1800 мкм. Цель работы заключалась в определении режима для параболического распределения  $n$ , максимальное значение которого равно 0.09. Величина выходного пятна не должно превышать значение 4 мкм.

Была проведена проверка, адекватно ли найденная зависимость  $D(n)$  описывает ионообменный процесс; для этого в Программе №2, используя полученный полином, установили концентрацию на границе равной 0, а в первой ванне равной 1 и произвели расчёт для заданного времени 6000 минут. Полученный график распределения  $n$  сравнили с графиком, изображенным на рис. 11. Из графика на рис. 13 можно сделать вывод, что

полином верно описывает зависимость  $D(n)$ , из чего следует, что режим ионного обмена можно рассчитывать в Программе №2.

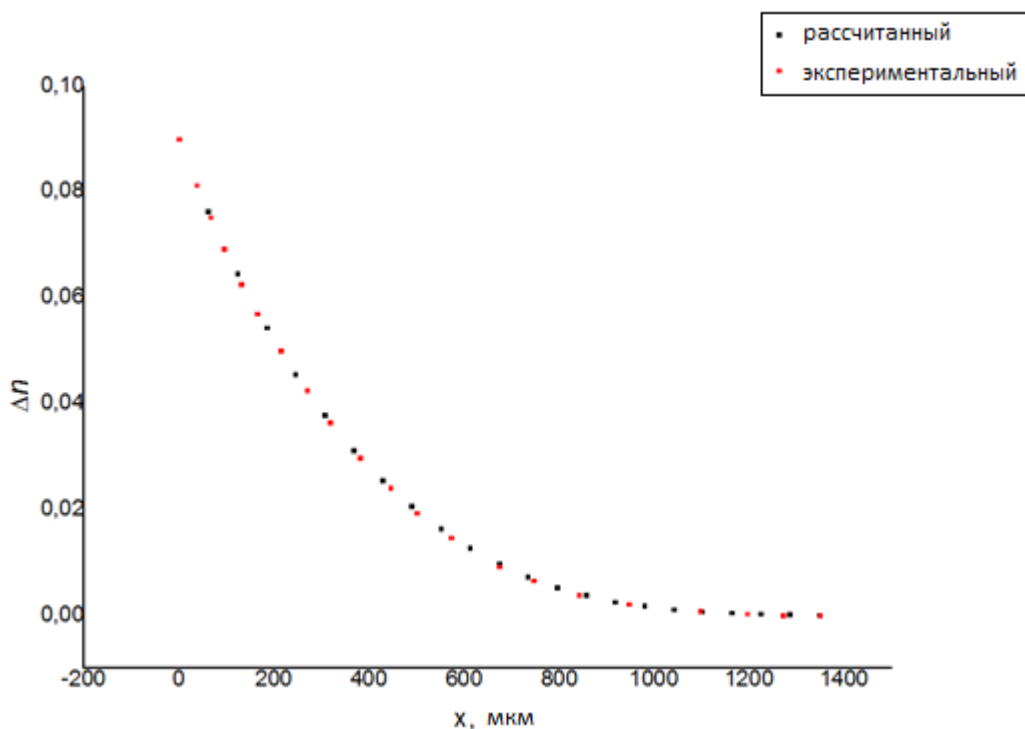


Рис. 13. Сравнение рассчитанного и экспериментального профилей

Первоначальной задачей было определение «удобного» режима работы, поэтому использовались две ванны. Было определено время, за которое диффузия пройдет до оси без потери перепада  $n$ . Для данного стекла ТЛ было выбрано время, равное 5000 минут. Следующим шагом было разделение времени на две части, для каждой из которых соответствует определенная концентрация таллия. Для проведения процесса ионного обмена необходимо было определить концентрацию таллия в первой ванне. После проверки оказалось, что нельзя начинать процесс с той ванны, в которой отсутствует таллий, так как невозможно добиться параболы. На рис. 14 показано окно Программы №2 с профилем показателя преломления, полученным при процессе ионного обмена в двух ваннах при отсутствии таллия в первой ванне. На рисунке видно, что профиль перепада  $n$  не имеет параболическую форму. На графике ниже представлен ход лучей в граде. Программа автоматически рассчитывает ход 80% лучей. На самом нижнем графике отображается диаметр пятна в зависимости от координаты.

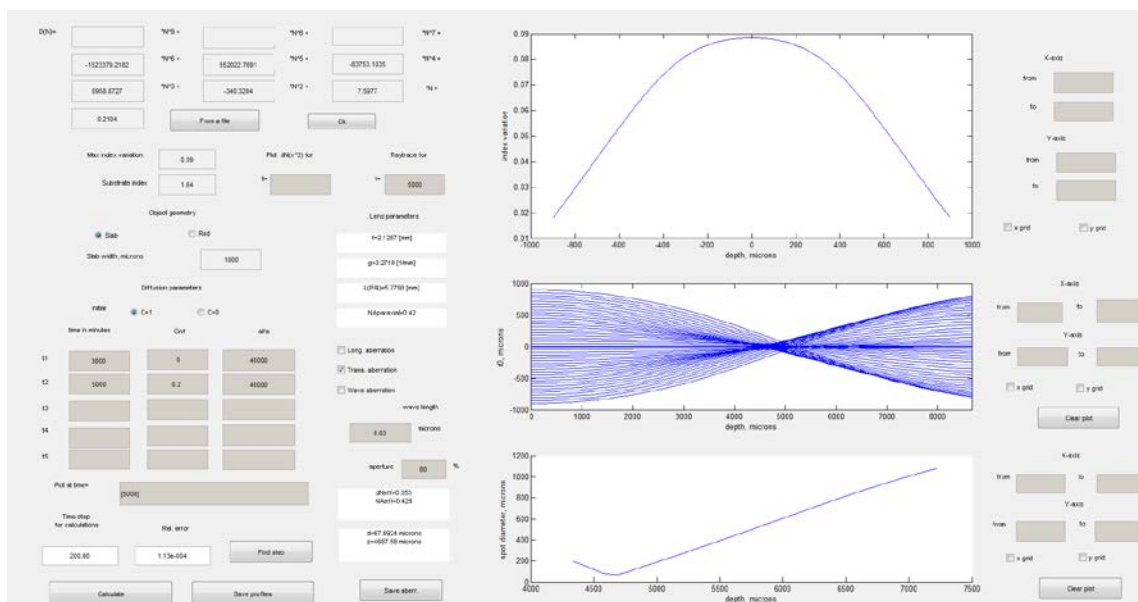


Рис. 14. Режим ионного обмена с двумя ваннами при отсутствии таллия в первой ванне

Необходимо провести процесс ионного обмена, добавив при этом таллий в первую ванну. Процесс поиска необходимого режима показал, что в первой ванне оптимальная концентрация должна быть равной 0,2, а во второй – 0. При данной комбинации концентраций может быть получена параболическое распределение показателя преломления, а его значение не будет превышать максимального – 0.09

Следующим шагом было определение точки переключения и точки окончания процесса ионного обмена, при которых полученный диаметр пятна будет минимальным.

Две режима с двумя ваннами были получены следующие значения переменных: время переключения на вторую ванну составило 7100 минут, а время окончания процесса – 8610. Также было получено значение перепада  $n$ , равное 0.81. Полученный диаметр пятна составил 3.3323 мкм, что соответствует заданному интервалу. На рис. 15 представлено окно Программы №2.



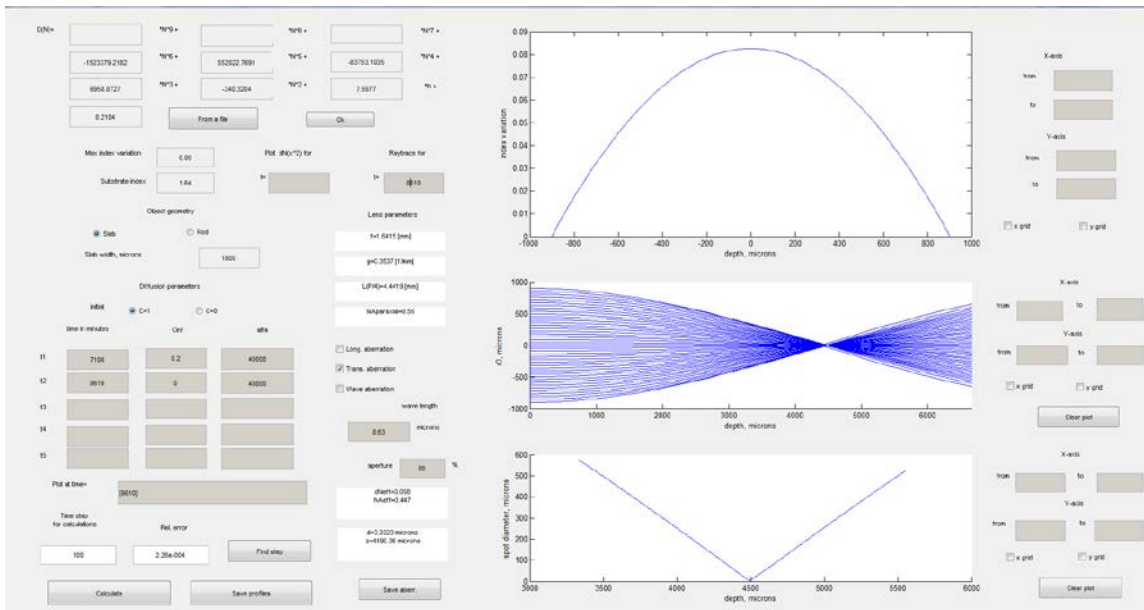


Рис. 15. Режим ионного обмена с двумя ваннами

Производить режим ионного обмена с отсутствием таллия в первой ванне можно с использованием трех ванн. Методом поиска была выбрана концентрация таллия во второй ванне, равная 0.2, а в третьей ванне равной 0. Значение перепада  $n$  было получено равным 0.86. Для этого режима были выбраны следующие значения переменных: время перехода на вторую ванну равно 3000 минут при концентрации таллия 0, время перехода на третью ванну составило 5700 минут с концентрацией 0.2, а время окончания процесса было выбрано 6960 минут при концентрации таллия 0. Окно Программы №2 при режиме с тремя ваннами представлено на рис. 16.

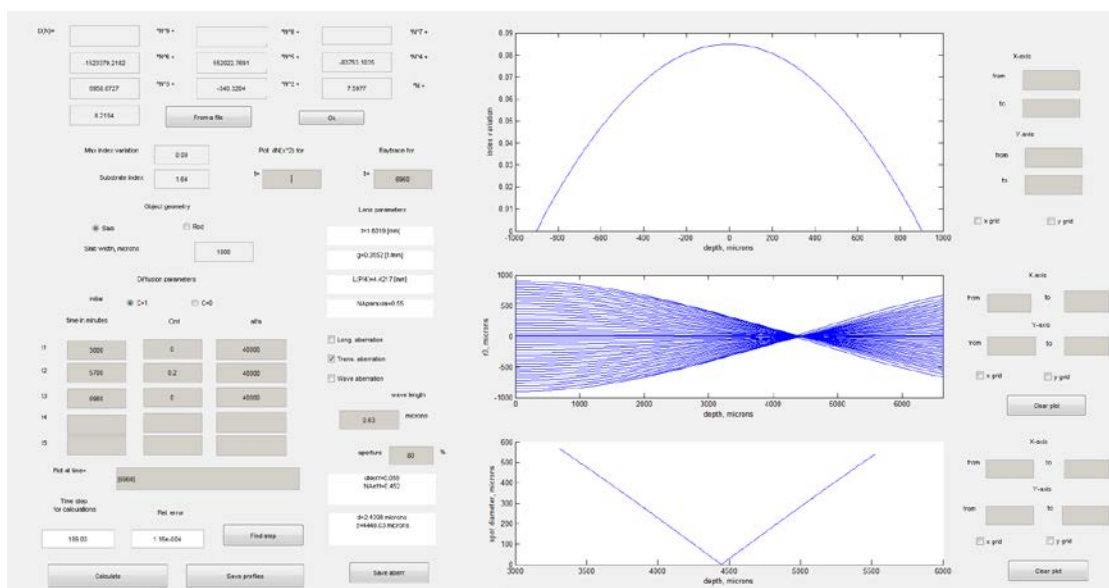


Рис. 16. Режим ионного обмена с тремя ваннами.

Сравнивая результаты, можно сделать вывод, что режим с тремя ваннами с технологической точки зрения более сложен, однако позволяет получить меньший диаметр пятна при меньшем времени проведения процесса, а также, учитывая тот факт, что значения перепада  $n$  получается более высоким, чем в режиме с двумя ваннами, можно утверждать, что апертура графана будет выше.

## **Заключение**

На основе экспериментальных данных, полученных при исследовании образцов стекол ТЛ, изготовленных в АО «НИИ Полюс», был получен набор необходимых параметров стекла, необходимый для проведения компьютерного моделирования процесса ионного обмена, т.е. распределение показателя преломления, зависимость коэффициента диффузии от показателя преломления. На основе этих параметров была проведена оптимизация режима ионообменной обработки пластин стекол толщиной 1800 мкм. Согласно расчётам, полученные режимы должны обеспечить получение высокоапертурных градиентных цилиндрических линз (циркулизаторов излучения диодных лазеров) с поперечной сферической абберацией порядка 4мкм.

### Список используемой литературы

1. Роусон Г. Неорганические стеклообразующие системы / Г. Роусон // М.: МИР, 1967 – 307 с.
2. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 2. Уч. пос. для конструкторов оптических приборов / В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова, Т.В. Точилина // СПб: СПб НИУ ИТМО, 2013 – 248 с.
3. Вильчинская С.С. Оптические материалы и технологии: уч. пос. / С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын // Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011 – 107 с.
4. Архипова Л.Н. Проблемы градиентной оптики: обзор / Л.Н. Архипова, Г.о. Карапетян, Д.К. Таганцев // Приборостроение, 1996, Т.39, № 5–6.
5. Таганцев Д.К. Стеклообразные материалы: уч. пос. / Д.К. Таганцев // СПб: Издательство Политехнического университета, 2010 – 204 с.
6. Журихина В.В. Оптические наноматериалы и структуры на основе ионообменных стекол: дис. на соиск. учен. степ. док. физ.-мат. наук. / В.В. Журихина // СПб: Издательство Политехнического университета, 2015 – 279 с.
7. Boltzmann, L. Zur Integration der Diffusionsgleichung bei variablen Diffusioncoefficient / L. Boltzmann // Ann. Phys. Chem. – 1894. – V.53. – P.959 – 964.