

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КубГУ»)

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

Допустить к защите
Заведующий кафедрой
д-р техн. наук, профессор

_____ Н. А. Яковенко

_____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В ГРАДИЕНТНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Работу выполнил _____ Астафуров Руслан Алексеевич

Направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и
системы связи

Направленность (профиль) Оптические системы и сети связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук, доцент _____ В. В. Галуцкий

Нормоконтролер инженер _____ И. А. Прохорова

Краснодар
2018

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 59 с., 56 рис., 14 источников.

ГРАДИЕНТНЫЙ НИОБАТ ЛИТИЯ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ, ПРОТОННО-ИОННЫЙ ОБМЕН, ПОСТОБМЕННЫЙ ОТЖИГ, ЗАГЛУБЛЕННЫЕ ВОЛНОВОДЫ

Объектом рассмотрения данной выпускной квалификационной работы являются заглубленные канальные волноводы в ниобате лития.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование режимов получения заглубленных волноводов в градиентном ниобате лития в ходе проведения эксперимента.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы были изучены методы создания волноводов, экспериментально подобраны технологические режимы изготовления, и получены заглубленные канальные волноводы в кристалле ниобата лития методом протонно-ионного обмена.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Оптика волноводов.....	5
1.1 Зеркальные планарные волноводы.....	8
1.2 Диэлектрические планарные волноводы.....	13
1.3 Двумерные волноводы.....	17
1.4 Фотонно-кристаллические волноводы.....	18
1.5 Периодические волноводы.....	19
1.6 Геометрия и материалы изготовления волноводов.....	20
1.7 Устройства ввода излучения.....	22
1.8 Преимущества заглубленных волноводов.....	24
2 Методы получения заглубленных волноводов.....	27
2.1 Метод твердотельной диффузии.....	28
2.2 Метод ионного обмена.....	30
2.3 Создание оптических схем методами твердотельной диффузии и ионного обмена.....	33
3 Изготовление заглубленных канальных оптических волноводов в градиентном ниобате лития.....	38
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Исследование режимов получения заглубленных волноводов в градиентном ниобате лития связано с рассмотрением методов создания волноводов, и подбором опытным путем технологических режимов их изготовления.

Волновод представляет собой линейный участок с измененным показателем преломления. Они применяются в волоконно-оптических линиях передачи в качестве основы для интегрально-оптических схем, а также необходимы для создания электрооптических модуляторов. Волноводы в кристалле могут быть планарные и канальные. Те же в свою очередь могут быть либо поверхностными, либо заглубленными. К основным методам получения заглубленных волноводов относят методы электростимулированной диффузии, эффузии, ионной имплантации, твердотельной диффузии и протонно-ионного обмена. Наиболее распространенными являются метод твердотельной диффузии титана, и метод протонно-ионного обмена, вследствие более простого технологического процесса изготовления волноводов. Для получения заглубленных канальных волноводов в кристалле ниобата лития был выбран метод протонно-ионного обмена, так как потери в волноводе, полученным таким методом намного меньше, чем потери в волноводах, изготовленными другими методами. В данном методе ионы лития замещаются на протоны (ионы водорода), в следствие чего изменяется показатель преломления, в той области, где произошел данный обмен.

Целью данного проекта является получение заглубленных канальных волноводов в градиентном ниобате лития.

При этом существенно важным является решение следующих задач:

- провести литературный анализ по теме волноводных структур;
- изучить методы получения заглубленных волноводов в ниобате лития;
- экспериментально подобрать технологические режимы изготовления заглубленных волноводов в градиентном ниобате лития.

1 Оптика волноводов

Довольно широкое применение волноводы нашли в волоконно-оптических линиях передачи (ВОЛП). Интегрально-оптические схемы на основе монокристалла ниобата лития (LiNbO_3) используются с целью кодирования последовательности данных, передаваемых по оптическому волокну. Также, ярким примером использования волноводов в связи можно назвать электрооптический волноводный модулятор Маха-Цендера на основе одноименного интерферометра. В качестве материала для создания данного модулятора применяют ниобат лития. Он состоит из волноводов, которые расположены между двумя ответвителями, разделенными в пропорции 1:1. Задача модулятора Маха-Цендера состоит в управлении амплитудой излучения, которое проходит через прибор. Если подать напряжение на находящиеся в одном из плеч интерферометра электроды, то изменится показатель преломления волновода и произойдет сдвиг фазы электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу. После того, как обе волны объединятся на втором ответвителе, а также за счет разности фаз, которую вызвало приложенное на электроды напряжение, мы получим управляемую амплитудную модуляцию. Электрооптический волноводный модулятор Маха-Цендера представлен на рисунке 1.

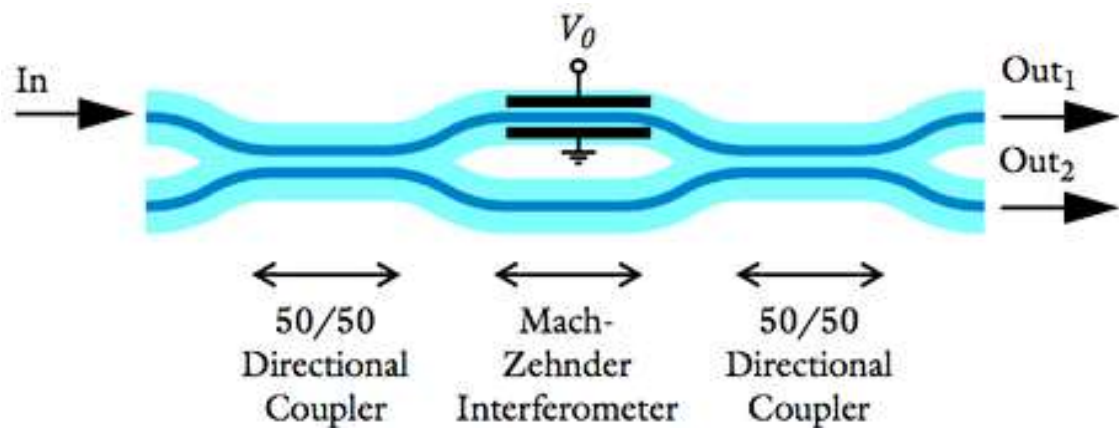


Рисунок 1 – Электрооптический модулятор Маха-Цендера на основе ниобата лития (LiNbO_3)

Кроме того, модуляторы Маха-Цендера применяются в интегральной оптике, как распределители (коммутаторы) оптического излучения. Режим работы заключается в следующем: если внешние волноводы согласовать с входным и выходным портами, то возможно отъюстировать напряжение так, что излучение будет распределяться в определенной пропорции между выходными портами. На рисунке 2 в качестве примера показан электрооптический фазовый модулятор на основе ниобата лития «MPZ-LN-20» французской компании «Photline Technologies», работающий в диапазоне длин волн 1530 – 1625 нанометров. Скорость модуляции составляет от 12,5 до 40 Гбит/с, напряжение от 2,5 до 9,5 В, а вносимые потери лазерного излучения от 2,7 до 6 дБ.



Рисунок 2 – Электрооптический фазовый модулятор «MPZ-LN-20» на основе ниобата лития (LiNbO_3)

Основу оптики волноводов – полное внутреннее отражение, впервые продемонстрировал Джон Тиндаль. В классических оптических системах и приборах свет распространяется в виде пучков, которые передаются и фокусируются призмами, линзами, и зеркалами. Вследствие явления дифракции пучки расходятся, и для того, чтобы собрать их опять, необходимы зеркала или линзы. В любом случае, объемные оптические элементы, составляющие такие системы, зачастую велики по размеру, а объекты, встречаемые пучком на своем пути, могут противодействовать его прохождению, или же рассеивать его.

Зачастую предпочтительно передавать оптические пучки по диэлектрическому кабелю. Техника, позволяющая достигнуть этого, называется

оптикой волноводов. Изначально ее целью была передача света на большие расстояния без потребности в дополнительных линзах. Данная техника и сейчас имеет очень много важных применений, среди которых передача света на большие расстояния в оптических системах связи, получение изображений в медицине, где свет необходимо доставить в малодоступные области, а также элементы связи в миниатюрных оптоэлектронных устройствах.

Принцип сдерживания света достаточно прост. Среда с большим показателем преломления, окруженная средой с меньшим показателем преломления, работает как ловушка для света, в которой лучи удерживаются за счет эффекта полного внутреннего отражения на границах. Из-за того, что данный эффект способствует удержанию света, генерируемого в среде с большим показателем преломления, его возможно использовать для производства световых кабелей – проводников, передающих свет из одного места в другое. Оптический волновод – это канал для передачи света, состоящий из диэлектрического слоя, погруженный в диэлектрический материал с меньшим показателем преломления. Области линейной формы с увеличенным показателем преломления будут являться оптическими волноводными каналами. Свет распространяется в среде с большим показателем преломления, не излучаясь во внешнюю среду с меньшим показателем преломления (рисунок 3). Рисунки, представленные в литературном обзоре, были взяты из первого тома «Оптика и фотоника» авторов Б. Салех, М. Тейх. Наиболее обширно из данных волноводов используется оптическое волокно, состоящее из двух цилиндров из диэлектрика с низкими потерями, такого, например, как стекло [1].

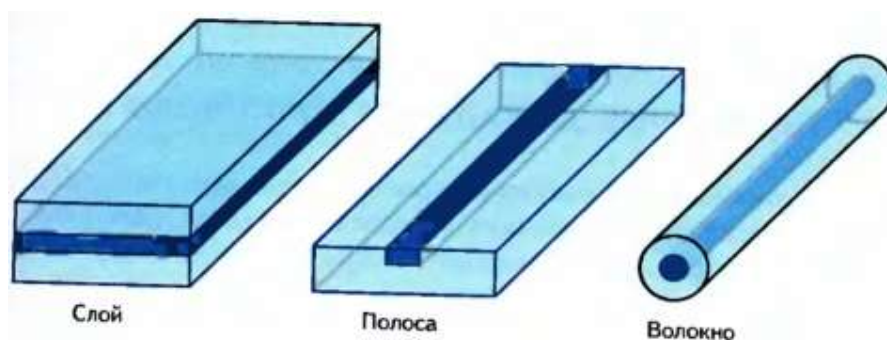


Рисунок 3 – Оптические волноводы

Интегральная оптика – это технология, в которой на одном чипе (подложке) находятся вместе разные оптические устройства и компоненты для генерации, деления, изоляции, совмещения, соединения, фокусировки, поляризации, детектирования, переключения, и модуляции света. Благодаря оптическим волноводам поддерживается связь между такими элементами. Такие чипы (рисунок 4) являются оптическим аналогом электронных интегральных схем. Интегральная оптика стремится к уменьшению размеров и массы оптических приборов.

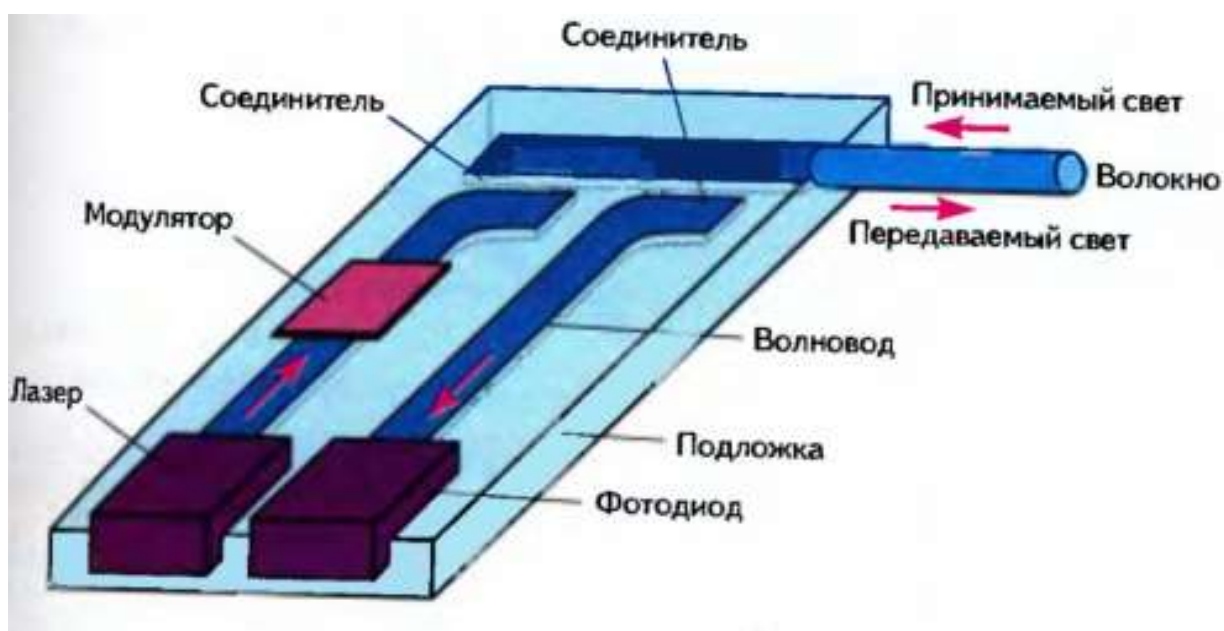


Рисунок 4 – Пример интегрально-оптической схемы, используемой как оптический приемник и передатчик.

1.1 Зеркальные планарные волноводы

Рассмотрим волновод, состоящий из двух параллельных друг другу плоских зеркал, расстояние между которыми равно d (рисунок 5). Подразумевается, что зеркала без потерь отражают свет. Луч света, находящийся в плоскости $y-z$ и образующий угол θ с зеркалами, неоднократно отражается и распространяется между данными зеркалами без потерь. Из чего следует, что луч направляется вдоль оси z .

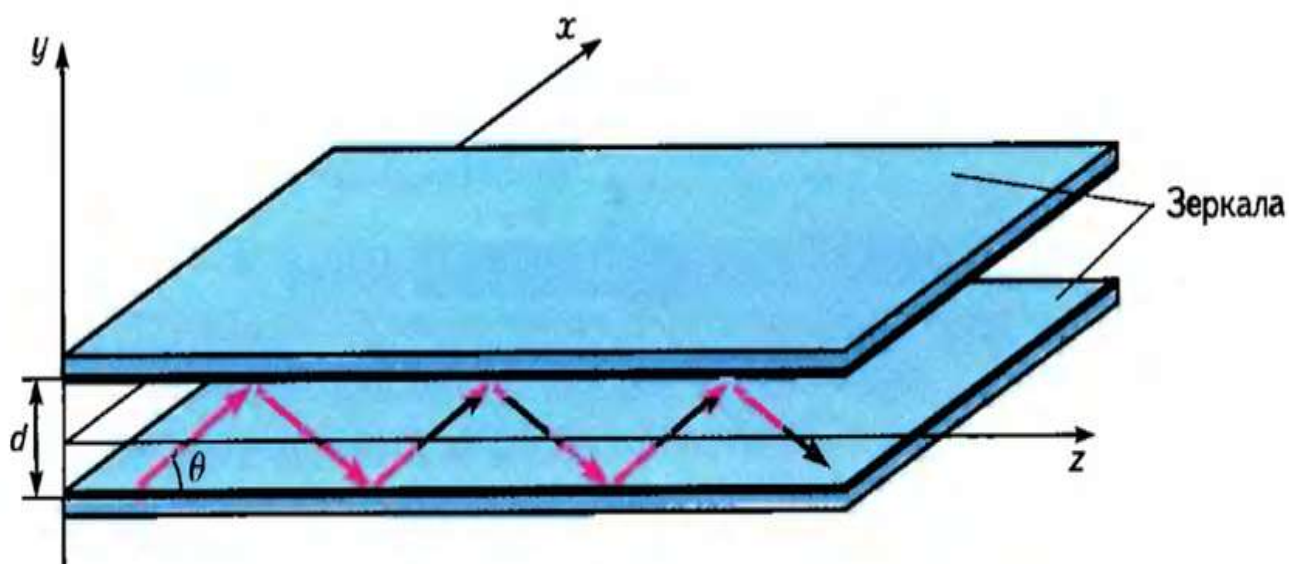


Рисунок 5 – Зеркальный планарный волновод

Данный волновод является идеальным направляющим устройством для распространения световых лучей, но он не используется на практике вследствие высокой стоимости и сложности производства зеркал с низкими потерями. Тем не менее мы рассмотрим данный пример более обстоятельно, так как он обладает высокой педагогической ценностью для введения в физику диэлектрических волноводов [2].

Каждому световому лучу соотносится поперечная электромагнитная (ТЕМ) волна. Электромагнитное поле является суммой этих плоских волн.

Разберем монохроматическую плоскую ТЕМ-волну с волновым числом $k = nk_0$, длиной волны $\lambda = \lambda_0/n$, и фазовой скоростью $c = c_0/n$, где n — показатель преломления между зеркалами. Поляризована волна в направлении x , а волновой вектор лежит в плоскости $y-z$ и образует угол θ с осью z . Волна отражается от верхнего зеркала, проходит под углом $-\theta$, отражается от нижнего зеркала, далее опять распространяется под углом θ и так далее. Так как вектор электрического поля параллелен зеркалам, каждое отражение сопровождается сдвигом фазы π , при этом амплитуда поляризации не изменяется. Сдвиг фазы не обязательно обращает в нуль суммы падающей и отраженной волн, так что на поверхности зеркал полное поле остается равным нулю. В любой точке внутри

волновода мы имеем поперечные электромагнитные волны, распространяющиеся вверх под углом θ и вниз под углом $-\theta$, все волны поляризованы вдоль оси x .

Если после двух отражений волна воспроизводит саму себя, то поля, отвечающие такому условию, называются модами волновода, или же собственными функциями. Следует отметить, что моды—это поля волновода, сохраняющие поперечное распределение и поляризацию во всех точках вдоль оси волновода [3].

Поперечные распределения поля изображены на рисунке 6. Любая мода представляет собой волну, распространяющуюся в направлении z и стоячую в направлении y . Моды с большими m распространяются в поперечной плоскости с меньшей постоянной и большей частотой. Поле будет равно нулю при $y = \pm d/2$ для всех мод, поэтому граничные условия на поверхности зеркал всегда выполняются.

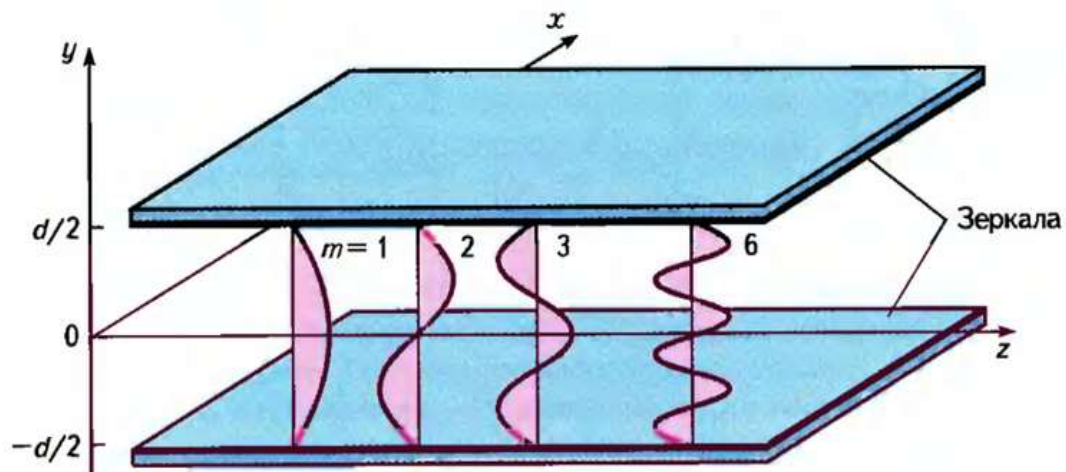


Рисунок 6 – Распределение поля в модах планарного зеркального волновода

Рассмотрим формулу нахождения числа мод:

$$M \doteq 2d/\lambda, \quad (1)$$

где d —диаметр сердечника волокна,

λ —длина волны света.

Символ « \approx » означает, что $2d/\lambda$ уменьшается до ближайшего целого числа. К примеру, при $2d/\lambda = 0,9; 1; 1,1$ имеем 0, 0 и 1. Следовательно, M —число мод волновода. В волноводе свет может распространяться в виде одной, двух или же большего числа мод. Реальное число мод зависит от источника возбуждения, но максимальное число равно M . Если $1 < 2d/\lambda \leq 2$, то разрешена только одна мода. Такой режим называется одномодовым. Длиной волны отсечки называется $\lambda_c = 2d$. Это наибольшая длина волны, которую может направлять данная структура. Этой длине волны соответствует частота отсечки:

$$v_c = c/2d, \quad (2)$$

где d —диаметр сердечника волокна,

c —скорость света.

Также длина волны соответствует угловой частоте отсечки $\omega_c = 2\pi v_c = \pi c/d$. Как изменяется число мод, когда угловая частота ω увеличивается, показано на рисунке 7 (а).

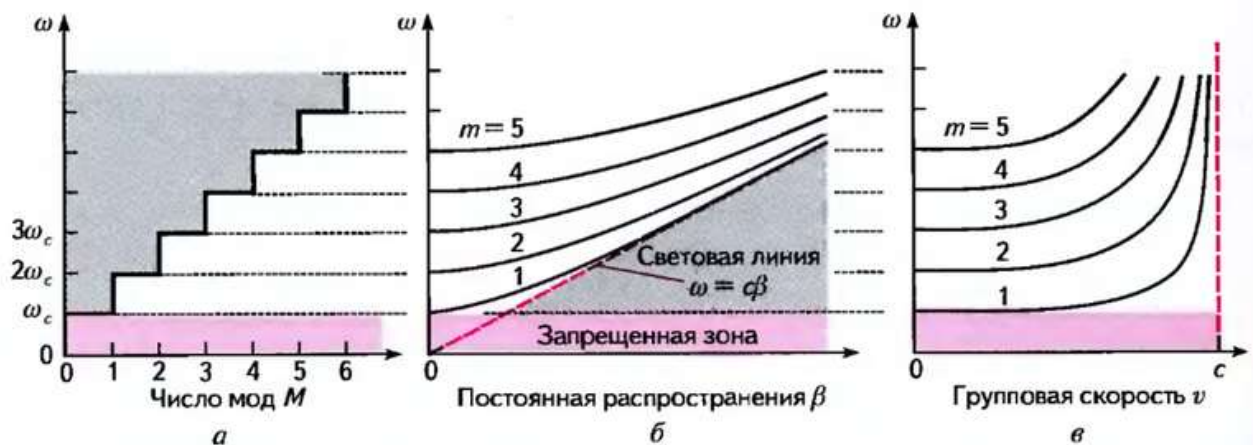


Рисунок 7 – Число мод как функция угловой частоты (а). Дисперсионное соотношение (б). Групповые скорости мод как функция угловой частоты (в)

Связь между угловой частотой ω и постоянной распространения β есть важнейшая характеристика волновода, более известная как дисперсионной

соотношение. Для однородной среды дисперсионное соотношение представляется в виде $\omega = c\beta$. Как показано выше, на рисунке 7 (б), для $m=1,2, \dots, n$ постоянная распространения β для моды равна нулю при угловой частоте $\omega = m\omega_c$, и будет монотонно возрастать с увеличением частоты, и в конце концов приблизится к линейному соотношению $\beta = \omega/c$ для довольно больших значений β .

В среде с заданным дисперсионным соотношением между β и ω импульс света с частотой ω распространяется со скоростью, которая называется групповой скоростью и равна:

$$v = d\omega/d\beta . \quad (3)$$

Моды, имеющие более сильный наклон, распространяются в среде с меньшей групповой скоростью, так как они проходят больший зигзагообразный путь. Зависимость групповой скорости от угловой частоты изображена на рисунке 7 (в), где показано, что для каждой моды групповая скорость монотонно растёт с 0 до скорости света по мере того, как частота увеличивается от отсечки до бесконечности [4].

На рисунке 8 рассматривается геометрический путь последовательных отражений плоской волны между зеркалами в ходе ее зигзагообразного распространения.

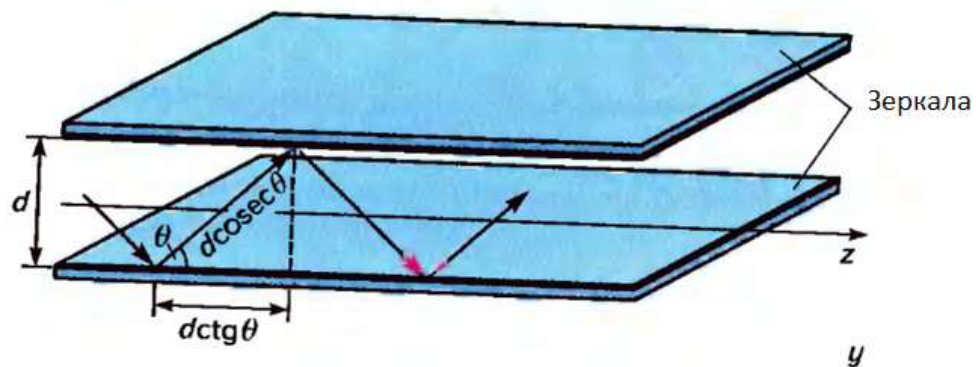


Рисунок 8 – Плоская волна, отражающаяся под углом θ , проходит расстояние
вдоль оси z

Пока что мы рассматривали только ТЕ–моды с электрическим полем с направлением по оси x . В зеркальном волноводе могут распространяться и ТМ–моды, у которых магнитное поле имеет направление вдоль оси x . Для их рассмотрения исследуем плоскую ТЕМ–волну с магнитным вектором, направленным вдоль оси x . Она распространяется под углом θ к поверхности зеркал и отражается от них (рисунок 9). В таком случае электрическое поле имеет составляющие по направлению осей y и z . Так как z –компонента параллельна зеркалам, то она ведет себя точно так же, как вела себя x –компонента в случае моды ТЕ (то есть обращается в нуль на поверхности зеркал и приобретает фазовый сдвиг на π при отражении).

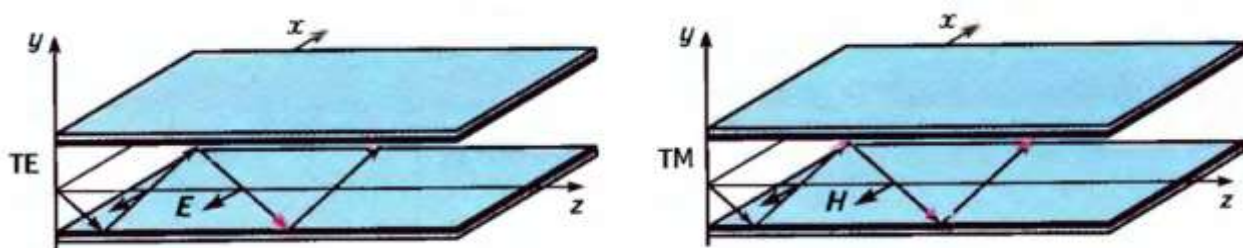


Рисунок 9 – Направляемые моды ТЕ и ТМ

Для того, чтобы свет распространялся в волноводе, не обязательно, чтобы он состоял из одной моды. Действительно, поле, удовлетворяющее граничным условиям (то есть поле, исчезающее на зеркалах), но во всем остальном имеющее абсолютно произвольное распределение в поперечной плоскости, может направляться волноводом. Но энергия при этом делится между модами. Так как разные моды имеют разные постоянные распространения и распространяются с разными групповыми скоростями, то поперечное распределение поля в процессе распространения по волноводу изменяется [5].

1.2 Диэлектрические планарные волноводы

Диэлектрический планарный волновод является слоем диэлектрического материала, окруженного средами с более низким показателем преломления. Свет

распространяется внутри слоя за счет явления ПВО (полного внутреннего отражения). В тонкопленочных устройствах внутренний слой называется пленкой, а его окружение — подложкой и покрытием. Внешняя часть называется оболочкой, а внутренняя — сердцевиной волновода. Рассмотрим распространение света в симметричном планарном диэлектрическом волноводе, состоящем из слоя диэлектрика толщиной d с показателем преломления n_1 в оболочке с более низким показателем преломления n_2 , как изображено на рисунке 10. Предположим, что все материалы не имеют потери. Световые лучи, образующие с осью z углы θ в плоскости y — z , испытывают многократное полное внутреннее отражение на границе раздела двух сред (сердцевины и оболочки). Это происходит при условии, что θ не превышает угла, дополнительного к критическому:

$$\theta_{\text{кр}} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (4)$$

Лучи света распространяются в направлении z , отражаясь от сердцевины без потерь энергии. Лучи с большими углами отклонения частично отражаются, частично преломляются, теряя при этом часть своей энергии при каждом отражении и в конечном итоге затухают.

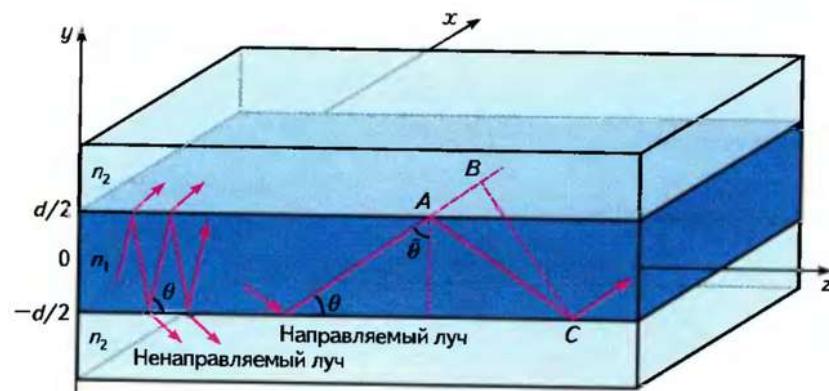


Рисунок 10 – Диэлектрический планарный волновод

Единственное отличие условий самосогласования мод диэлектрических волноводов от зеркальных заключается в том, что фазовый сдвиг π при

отражении от идеального зеркала нужно заменить фазовым сдвигом φ_r , который вносится при отражении на границе раздела диэлектриков.

Если $\lambda/2d > \sin\theta_{кр}$, то существует всего одна мода. Волновод в таком случае называется одномодовым. Так получается, когда или длина волны довольно большая, или сердцевина волновода достаточно тонкая. В отличие от зеркального волновода диэлектрический волновод не имеет абсолютной частоты (или длины волны) отсечки. В диэлектрическом волноводе всегда, как минимум, присутствует одна мода ТЕ, так как фундаментальная мода $m = 0$ всегда разрешена. Каждая из мод имеет свою частоту (длину волны) отсечки.

В частотных переменных условие одномодовости заключается в том, что $\nu > \nu_c$ или $\omega > \omega_c$, где частота отсечки моды равна:

$$\nu_c = \frac{\omega_c}{2\pi}. \quad (5)$$

Число мод равно:

$$M = \frac{\nu}{\nu_c} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (6)$$

Число M увеличивается на единицу при увеличении частоты на ω_c , как показано на рисунке 11. Точно такие же результаты получаются и для мод ТМ.

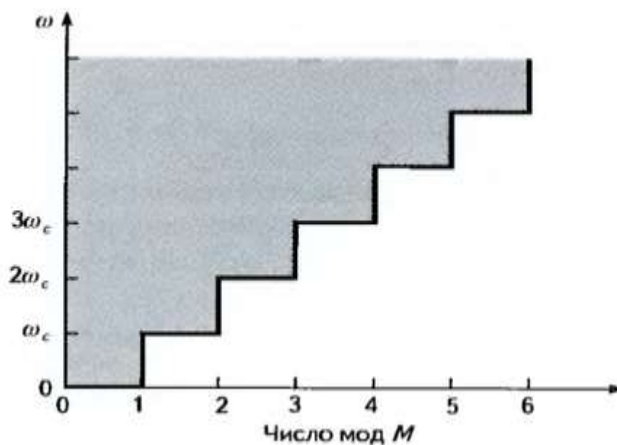


Рисунок 11 – Число ТЕ—мод как функция частоты

Рассмотрим распределение поля в ТЕ—моды с $m = 0$. По своей форме распределение подобно гауссову пучку, но в отличие от него направляемые свет не подвергается расходимости в поперечном направлении во время распространения вдоль оси волновода (рисунок 12). В волноводе склонность к дифракции уравнивается направляющим действием среды.

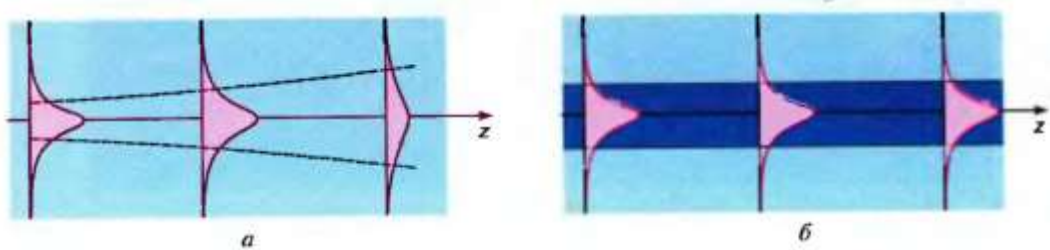


Рисунок 12 – Гауссов пучок в однородной среде (а); направляемая мода в волокне (б)

Проанализируем как зависит групповая скорость от угловой частоты. Групповая скорость для каждой направляемой моды определяется соотношением $v = d\omega/d\beta$. Зависимость групповой скорости от угловой частоты изображена на рисунке 13. Для любой моды при росте угловой частоты выше частоты отсечки моды групповая скорость убывает от своего максимального значения, а далее стремится к c_1 снизу. Из этого следует, что групповые скорости мод находятся в интервале от максимального значения до минимального значения немного меньше c_1 .

Из-за того, что моды имеют разные скорости, световые импульсы начинают расплываться во времени при распространении в многомодовом волокне. Данный эффект называется модовой дисперсией. В одномодовом волокне световой импульс начинает расплываться из-за зависимости групповой скорости от частоты. Такой эффект носит название дисперсии групповой скорости. Он имеет место быть в однородных материалах, так как обусловлен зависимостью показателя преломления от частоты. Бывают случаи, когда дисперсия групповой скорости появляется в волноводах даже в отсутствие дисперсии самого материала. При таком стечении обстоятельств она появляется

из-за частотной зависимости коэффициентов распределения, которая представляет собой зависимость оптического ограничения волны от ее длины [6]. На рисунке 13 показано, что у каждой моды присутствует такая частота, при которой групповая скорость мало зависит от частоты.

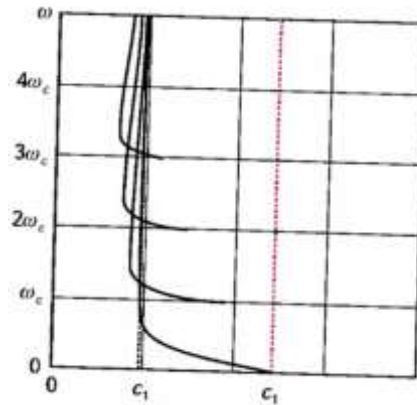


Рисунок 13 – Схематическое представление частотной зависимости групповой скорости

1.3 Двумерные волноводы

Ранее рассмотренные зеркальные и диэлектрические волноводы сдерживают свет в одном поперечном направлении (направлении y) и направляют его вдоль оси z . Двумерный же волновод ограничивает свет в двух поперечных направлениях x и y . Структура мод и принцип действия у них примерно такие же, за исключением более длинного математического описания [7]. Пример двумерного волновода показан на рисунке 14.

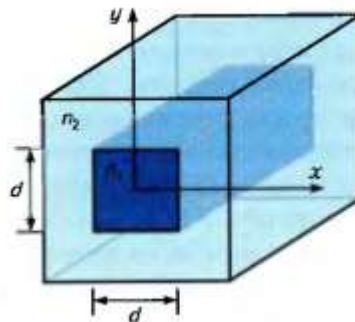


Рисунок 14 – Двумерный прямоугольный диэлектрический волновод

1.4 Фотонно-кристаллические волноводы

Рассмотрим волноводы с решетками Брэгга. Данная решетка представляет собой набор чередующихся слоев диэлектрика и имеет своеобразную зависимость коэффициента отражения от частоты света и угла падения. Волна определенной частоты может направляться в волноводе благодаря многократным отражениям в определенном диапазоне углов. Распределение поля в распространяющейся моде сфокусировано в слое диэлектрика между отражателями. Затухающие остатки распределения попадают внутрь соседних слоев, как изображено на рисунке 15.

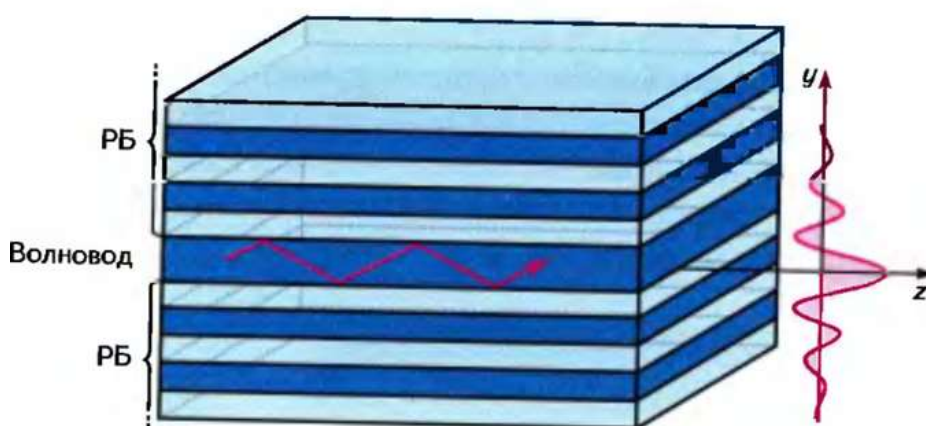


Рисунок 15 – Волновод из диэлектрического слоя, расположенного между двумя брэгговскими решетками

Когда нижняя и верхняя брэгговские решетки одинаковы, а толщина слоя диэлектрика сопоставима с толщиной периодических слоев, образующих решетку, то тогда вся среда рассматривается как одномерный фотонный кристалл с дефектом. Допустим есть периодичная всюду, кроме центрального слоя, структура. Такой слой называется дефектным, так как он отличается толщиной и показателем преломления от других слоев. Если дефект находится в фотонной запрещенной зоне, то в нем может распространяться мода, находящаяся преимущественно внутри дефектного слоя. Данная мода

соответствует значению частоты, находящемуся внутри фотонной запрещенной зоны.

Волновод также можно изготовить в двумерном фотонном кристалле в виде дорожки дефектов. На рисунке 16 показан двумерный фотонный кристалл, образованный цилиндрическими отверстиями в диэлектрике. Он имеет фотонную зону, полностью запрещенную для волн, распространяющихся по нормали к осям отверстий. Волновод образуется в виде линии пропущенных отверстий [8]. Наиболее распространенный профиль распределения поля показан на рисунке 16 (а), а на рисунке 16 (б) изображен L-образный волновод.

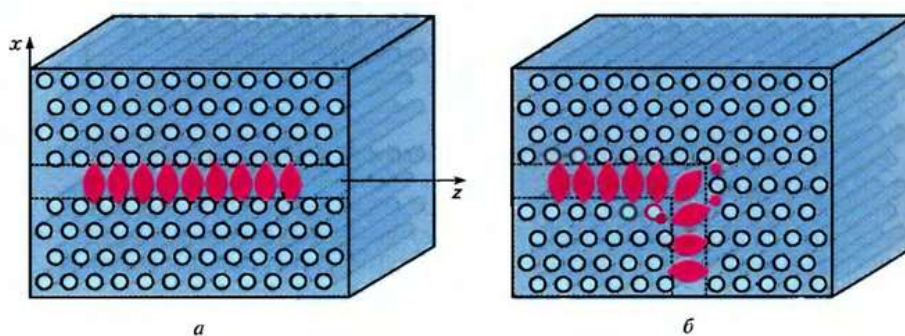


Рисунок 16 – Типичный профиль распространяющейся моды в фотонно-кристаллическом волноводе (а); L-образный фотонно-кристаллический волновод (б)

1.5 Периодические волноводы

В однослойном волноводе излучение распространяется в виде мод, дисперсионная кривая которых лежит между $\omega = c_1\beta$ и $\omega = c_2\beta$. В периодическом волокне все происходит по-другому. Дисперсионные кривые концентрируются в разрешенных зонах, разделенные фотонными запрещенными зонами. Можно сделать предположение, что моды распространяются параллельно слоям, следовательно, зоны также лежат в области между световыми линиями [9]. Пример периодического волновода и его дисперсионной диаграммы представлен на рисунке 17.

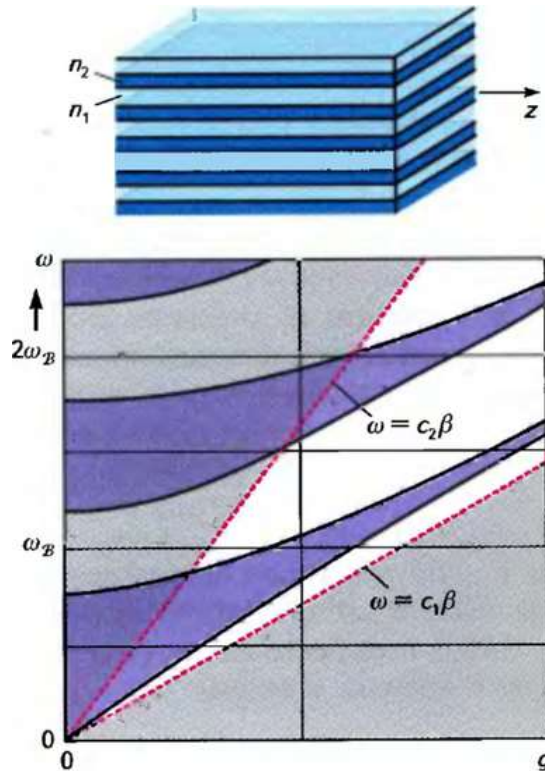


Рисунок 17 – Периодический волновод и его дисперсионная диаграмма

1.6 Геометрия и материалы изготовления волноводов

На рисунке 18 представлены наиболее часто используемые типы геометрии волноводов. Такими являются нагруженный полоской, погружной полоской, полосковый и гребенчатый типы волноводов.

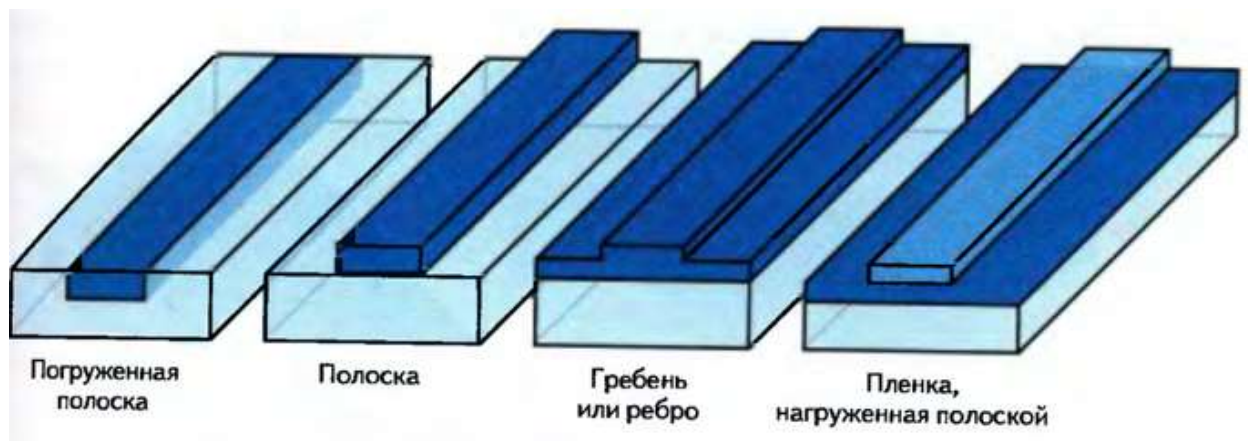


Рисунок 18 – Варианты геометрии волноводов. Более темный оттенок соответствует большему показателю преломления

Волноводы с погружной полоской могут быть представлены в разных вариантах изготовления. Примеры различных конфигураций показаны на рисунке 19. S-образные используются для сдвига оси распространения, Y-образные для деления и совмещения пучков, а два Y-образных разветвителя могут образовывать интерферометр Маха—Цендера.



Рисунок 19 – Различные конфигурации волноводов

Самой развитой технологией изготовления являются волноводы на Ti:LiNbO_3 . Такие волноводы с погруженной полоской образуются путем диффузии титана в подложку из ниобата лития, в следствие чего получается линейный участок (полоска) с повышенным показателем преломления. Полосковые GaAs волноводы изготавливаются из слоев AlGaAs и GaAs. Также недавно стал важным полупроводниковый материал InP. При помощи ионного обмена изготавливают стеклянные волноводы. Кроме того, все чаще встречаются заявления о полимерных волноводах.

Достаточно интересной является технология на основе структуры кремний на диэлектрике (КНД), или же встречающаяся также под названием кварц на кремнии. Данная комбинация материалов имеет очень большую разницу в значениях показателя преломления (показатель преломления кремния $\approx 3,5$; показатель преломления кварца чуть менее 1,5). Характерный КНД-волновод изображен на рисунке 20. Он представляется собой слой кварца, снизу которого находится кремниевая подложка, а сверху кремниевый гребенчатый волновод.

Наиболее важным преимуществом данной технологии является ее совместимость с технологией изготовления комплементарных металлооксидных полупроводников (КМОП). КМОП — это способ производства электронных схем. В сравнении с биполярными технологиями (например, ТТЛ), КМОП отличается малым энергопотреблением в статическом режиме. Большинство современных цифровых микросхем — КМОП.

Одно из главных требований к материалам, используемым в таких устройствах интегральной оптики, является возможность изменять показатель преломления [10].



Рисунок 20 – LiNbO_3 - и КНД-волноводы

1.7 Устройства ввода излучения

Один из способов введения света в волновод является непосредственная фокусировка на его конец. Для того, чтобы заданная мода возбудилась, поперечное распределение поля у падающего света $s(y)$ должно совпадать с подобным для моды. Поляризация требуемой моды должна совпадать с поляризацией падающего света. Недостатком такого метода ввода излучения являются малые размеры волноводного слоя, из-за чего возбуждение получается неэффективным. Также слабым местом данного способа является высокая

сложность юстировки и фокусировки [11]. На рисунке 21 показан ввод пучка света в один из концов оптического волновода.

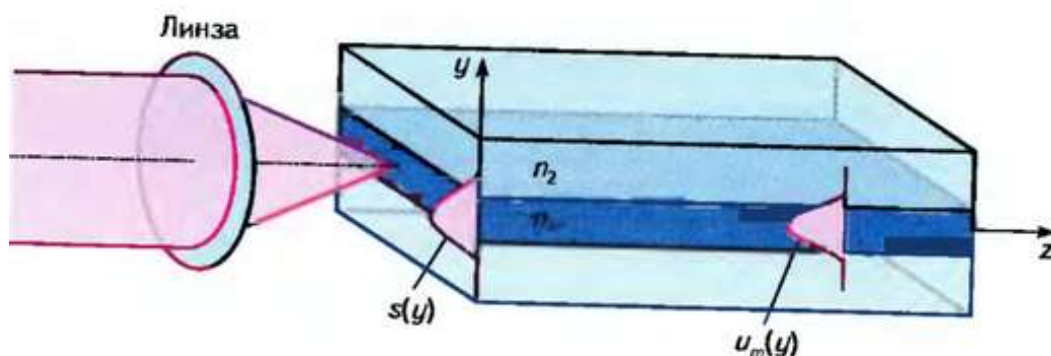


Рисунок 21 – Ввод оптического излучения в волновод

Фокусировка световых лучей в многомодовом волноводе показана на рисунке 22. Направления распространяющихся лучей ограничены углом:

$$\theta_{кр} = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (7)$$

Для достижения наибольшей эффективности возбуждения падающий свет нужно вводить в волновод под углом θ_a .

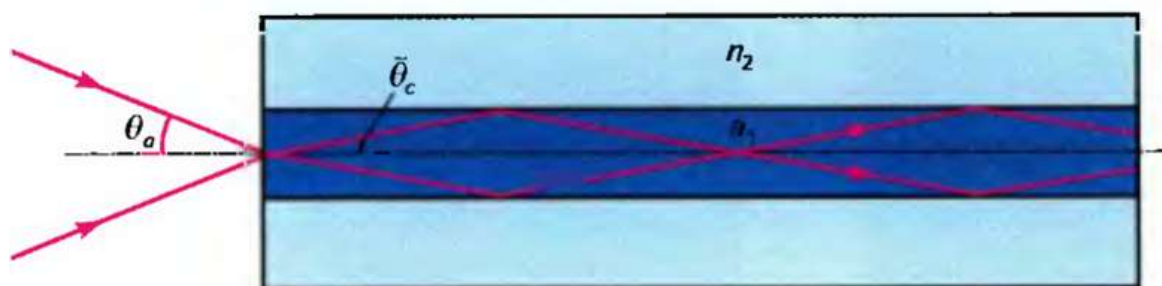


Рисунок 22 – Фокусировка лучей в многомодовый волновод

Оптической излучение от светоизлучающего диода или же лазерного диода можно ввести путем совмещения торцов источника света и волновода с минимальным зазором между ними. Такой способ показан на рисунке 23. Есть и

другие методы ввода излучения. Эти методы подразумевают использование дифракционных решеток, призм и других волноводов [12].

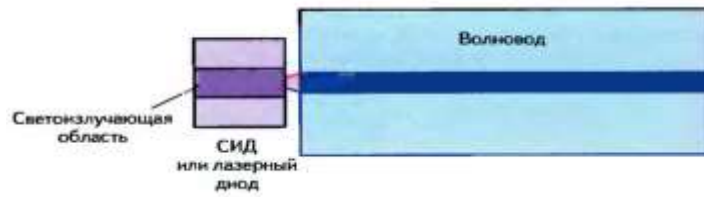


Рисунок 23 – Соединение СИД или лазерного диода с торцом волновода

1.8 Преимущества заглубленных волноводов

Волноводы бывают планарными и канальными, как это изображено на рисунке 24.

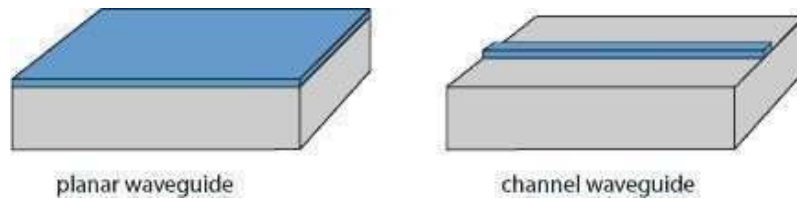


Рисунок 24 – Планарный и канальный волноводы

Волновод называется планарным, если он имеет ограничения только в одном направлении. Пример планарного волновода показан на рисунке 25. В этом случае волноводный слой имеет ограничения по оси X и обладает толщиной h . Планарные волноводы имеют разделение на пленочные и градиентные.

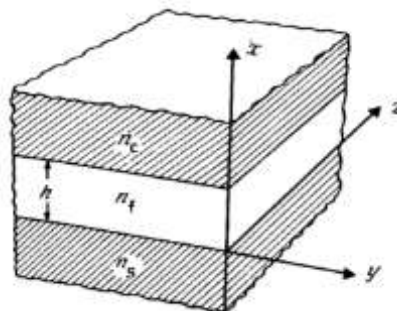


Рисунок 25 – Планарный волновод

Пленочный волновод изготавливается путем нанесения на подложку, выполненную из одного материала (допустим, стекла), тонкой пленки из другого материала (с большим показателем преломления). В градиентных волноводах показатель преломления волноводного слоя n_0 плавно изменится вдоль оси X. При изготовлении таких волноводов образуется приповерхностный слой с увеличенным показателем преломления, в котором свет может распространяться путем полного внутреннего отражения (ПВО) от границ волноводного слоя с покровным, а также путем рефракции в самом волноводном слое, который является оптически неоднородной средой.

Канальный волновод включает в себя волноводную область с показателем преломления n_1 , которая окружена со всех сторон областью с показателем преломления n_2 (данный показатель преломления меньше, чем n_1). Это наглядно видно на рисунке 26.

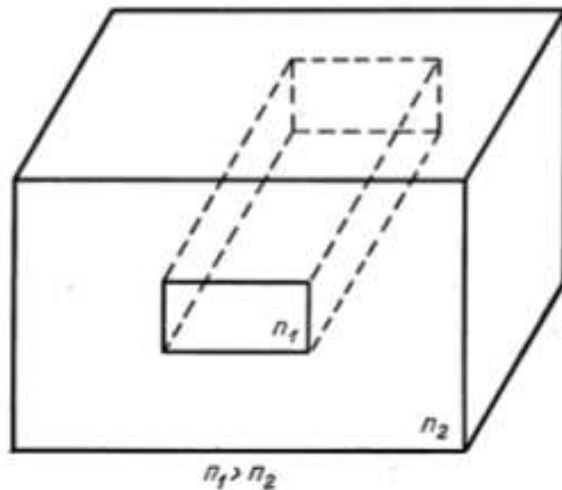


Рисунок 26 – Канальный волновод

Такие волноводы носят названия канальных, полосковых или трехмерных. Они бывают приподнятые (рисунок 27 (а)), гребенчатые (рисунок 27 (б)), внедренные (рисунок 27 (в)), с наложенной полоской (рисунок 27 (г)), и заглубленные (рисунок 27 (д)).

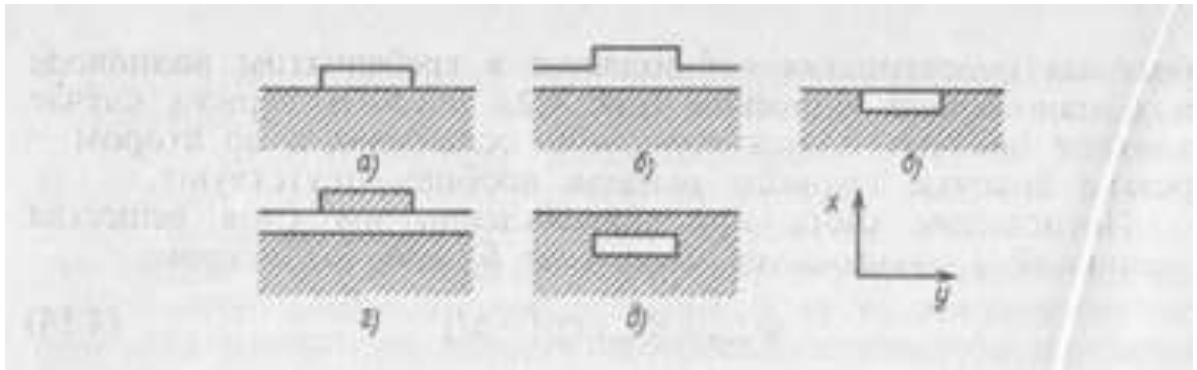


Рисунок 27 – Виды канальных волноводов

Основными преимуществами заглубленных волноводов по сравнению с поверхностными волноводами являются низкие потери и возможность эффективного согласования профиля показателя преломления волновода с профилем показателя преломления волокна. Заглубленные волноводы на основе стекол обладают стабильностью параметров, большим диапазоном изменения свойств в результате изменения химического состава подложек или модификатора, устойчивостью к воздействиям внешних факторов и высоким качеством поверхности [13].

2 Методы получения заглубленных волноводов

Заглубленный волновод может быть изготовлен методами электростимулированной диффузии, эффузии, ионной имплантации, твердотельной диффузии и ионного обмена.

1) Электролиз

К электродам, расположенным на стеклянной пластине, подводится постоянное электрическое поле, в следствие чего щелочные ионы смещаются к катоду, при этом образовывая слой с повышенной концентрацией. В этом время под анодом образуется обедненный щелочной слой. В зависимости от соотношения показателя преломления стекла и окисла, волноводными свойствами будет обладать или слой возле катода, или слой возле анода. Данный процесс протекает при температуре ниже температуры стеклования и при напряжении электрического поля 3000 В/см. Потери в волноводах, изготовленных данным методом, составляют от 1 до 2 дБ/см.

2) Эффузия

Данный метод основан на идеи улетучивания различных компонентов материала, которые вводились с целью уменьшения показателя преломления. После того, как данные компоненты улетучились с поверхностного слоя, то на этом месте образуется волноводная область с повышенным показателем преломления. Этот метод является самым простым из всех известных методов изготовления оптических волноводов. Недостатками метода эффузии являются узкий выбор материалов, содержащих легколетучие фтористые соединения, и нестабильность поверхностных слоев при комнатной температуре. Потери в волноводах, изготовленных данным методом, составляют менее 1 дБ/см.

3) Ионная имплантация

Суть метода заключается в том, что при облучении материала высокоэнергетическими протонами или тяжелыми ионами, изменяется его показатель преломления. Во время облучения в поверхностном слое образуется плотная область смешанных атомов. Преимуществом данного метода является

получение волноводов с различными профилями показателя преломления, а недостатком — использование сложной и дорогостоящей аппаратуры.

Отдельно выделим методы твердотельной диффузии и ионного обмена для изготовления заглубленных канальных (полосковых) волноводов в ниобате лития.

2.1 Метод твердотельной диффузии

В основе этого метода лежит диффузия высокопреломляющего модификатора из пленки, которая была предварительно нанесена на поверхность подложки (рисунок 28). Модификатор увеличивает показатель преломления, в следствие чего и образуется волновод. Очень часто данный процесс происходит при температуре выше, чем температура стеклования. Разные модификаторы позволяют получать различные показатели преломления. Недостатками этого метода являются высокая температура, которая может изменять свойства стекла, и окрашивание модификаторами поверхностного слоя, что вызывает дополнительное поглощение. Потери в волноводах, изготовленных данным методом, составляют от 1 до 3 дБ/см.

Метод диффузии Ti в LiNbO_3 довольно широко применялся ранее. Однако, на данный момент этот способ изготовления заглубленных волноводов является устаревшим. При создании волновода таким методом, следует принять во внимание следующие факторы: начальная ширина титановой полоски, температура и время диффузии.

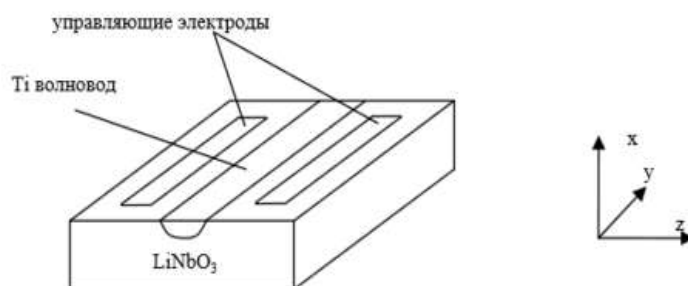


Рисунок 28 – Полосковый титан-диффузионный волновод

Рассмотрим значения основных параметров для изготовления оптических волноводов:

- Ширина титановой полоски должна составлять от 3 до 10 микрометров, а толщина от 50 до 120 нанометров;
- Температура диффузии 950 – 1100 °С;
- Время диффузии примерно от 5 до 10 часов.

Параметры ширины и толщины титановой пленки обязаны выдерживаться с точностью до 0,1 %. Чем меньше температура, тем более длительное время потребуется для процесса диффузии. Максимальный предел температуры зависит от ее значения в точке Кюри, то есть от такого значения температуры, при котором изменяются магнитные свойства материала. При превышении данной точки кристалл может деполяризоваться. В нашем случае значение точки Кюри составляет приблизительно 1125 °С. Особенно важно, обратить внимание на процесс диффузии оксида лития. Из-за данного процесса может получиться планарный волновод для необыкновенной поляризации. Он будет поляризован в плоскости, которая не перпендикулярна главной плоскости и главному сечению. Для того, чтобы уменьшить диффузии оксида лития из образца обычно применяют водяной пар. Если влажность воздуха будет составлять 80 %, а температура около 1000 °С, то в таких условиях оптический волновод не появится. Существуют и альтернативные способы. Например, насыщение газовой атмосферы оксидом лития, методом добавления лития в газ, проходящий через печь. Также можно добавить материал в саму печь, который будет испускать при увеличении температуры оксид лития. Следует отметить, что ни один из методов не сможет до конца избавиться от данной проблемы.

Для того, чтобы применять волноводы, изготовленные методом диффузии Ti в LiNbO_3 , придется использовать дополнительный элемент, который называется интегрально-оптический поляризатор. Так происходит из-за того, что оптический волноводы полученный данным методом не в состоянии выделять только одну из плоскостей поляризации, что является существенным недостатком этого метода изготовления.

2.2 Метод ионного обмена

Наиболее часто используемым в акустоэлектронике и интегральной оптике сегнетоэлектриком (веществом, обладающим спонтанной поляризацией, которую можно изменять с помощью внешнего электрического поля) является ниобат лития (LiNbO_3). Одним из основных методов изготовления оптических волноводов наряду с методом диффузии Ti в LiNbO_3 , является метод протонно-ионного обмена. Суть данного метода состоит в том, что в образце (кристалле ниобата лития) ионы лития замещаются на протоны (ионы водорода). Ионы из расплава, как правило, имеют большую удельную рефракцию (преломление). Следствием этого процесса является изменение показателя преломления, в той области, где произошел данный обмен. Потери в волноводах, изготовленных таким методом, составляют от 0,2 до 0,5 дБ/см. Преимуществом метода ионного обмена являются наименьшие потери по сравнению с другими методами. К недостаткам можно отнести ограничение по выбору диффузантов, так как для определенного типа кристаллов существует определенный набор таких ионов.

Необходимо отметить три главных фактора:

- температура источника протонов;
- время самой диффузии;
- концентрация протонов, доступных для замещения (то есть кислотность источника протонов).

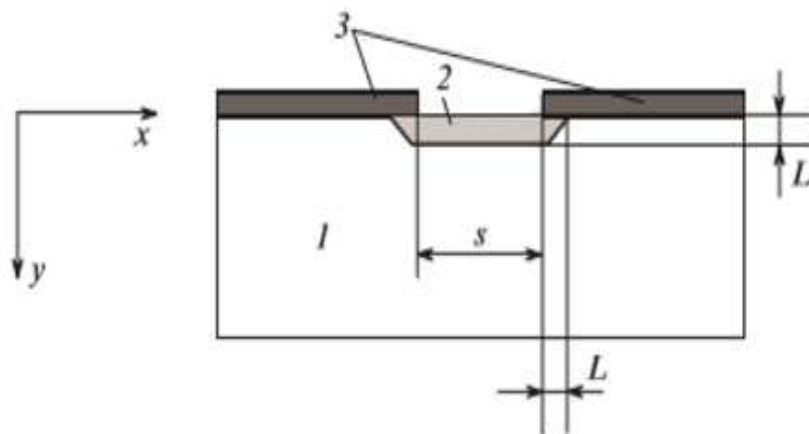
Источниками протонов являются следующие кислоты: бензойная, стеариновая и серная. От кислоты будет зависеть температура, и она может составлять 150 – 250 °С, время же находится в диапазоне от нескольких минут (обычно 5 минут) до нескольких часов (как правило 5 часов). После данного процесса получается ступенчатый ППП (профиль показателя преломления). Из-за чего, при соединении оптического волокна с волноводом, большая разность между показателями преломления волновода и волокна будет приводить к обратным отражениям. Для того, чтобы уменьшить данное отражение в месте соединения применяют отжиг волновода.

Как правило, отжиг волновода происходит в диапазоне температур от 350 до 400 °С. Время проведения данного процесса составляет от 1 до 5 часов. В конечном итоге ППП волновода становится плавнее.

Рассмотрим пример изготовления волновода с применением бензойной кислоты:

На поверхности подложек с помощью фотолитографии наносятся металлические маски (обычно Al). Они представляют собой набор из 8 прорезей с шагом 100 микрометров.

Источником ионов в этом случае является расплав бензойной кислоты ($C_7H_6O_2$). Его весовая концентрация составляет от 0 до 5 %. При времени диффузии 20 минут и температуре процесса 170 – 180 °С удается получить световод с глубиной x -среза 0,25 микрометров и шириной z -среза 4,1 микрометра. После окончания процесса диффузии металлические маски удаляются методом «мокрого» травления, а торцы световодов подвергаются полировке. На рисунке 29 показано как распределяются протоны в волноводе по окончании первого этапа диффузии.



1 – подложка $LiNbO_3$; 2 – область с повышенной концентрацией ионов;
3 – металлическая маска

Рисунок 29 – Модель распространения протонов в световоде по окончании первого этапа диффузии

Если же провести последующий отжиг данного волновода в течение 30 минут при температуре 360 °С, размеры моды для x-среза станет равным 1,9 микрометра, а для z-среза получится 5,1 микрометр. На рисунке 30 изображены распределения показателя преломления в x-срезе (а) и y-срезе (б): штрихованная кривая – время проведения отжига составляет 2 часа, сплошная кривая – время проведения отжига составляет 4 часа.

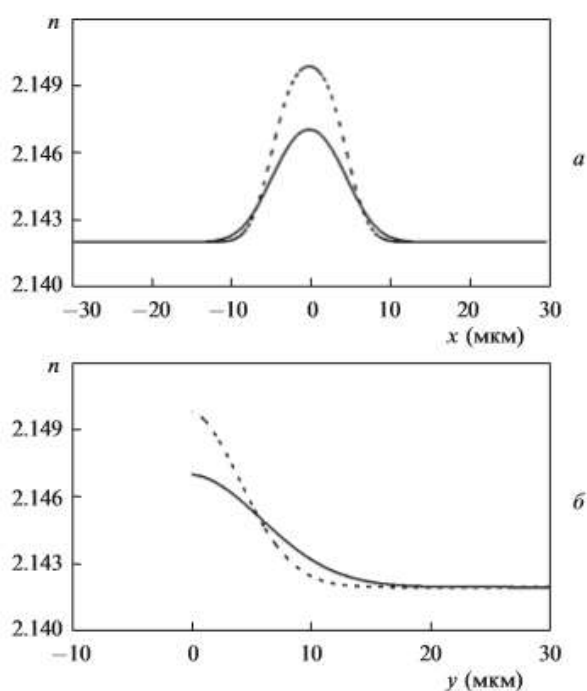


Рисунок 30 – Распределения показателя преломления в x-срезе (а) и y-срезе (б) в зависимости от времени отжига (штрихованная кривая – 2 часа, сплошная кривая – 4 часа)

Таким образом, была использован метод низкотемпературного протонно-ионного обмена с использованием модели двухэтапной диффузии. Первый этап представлял из себя протонно-ионный обмен на поверхности LiNbO_3 (в процессе которого образуется область с повышенной концентрацией ионов), который проводился в бензойной среде (в расплаве бензойной кислоты). Второй же этап – это процесс высокотемпературного отжига.

Следует отметить, что метод протонно-ионного обмена имеет ряд преимуществ перед методом диффузии Ti в LiNbO_3 , таких как возможность

проведения процессов при низких температурах, невысокую стоимость, более простую реализацию технических операций, и доступность оборудования [14].

2.3 Создание оптических схем методами твердотельной диффузии и ионного обмена

Вначале рассмотрим волноводные структуры, выполненные методом диффузии Ti в LiNbO₃. Как уже отмечалось ранее, потери в волноводах, изготовленных таким методом, составляют 100 – 300 дБ/м. Рассмотрим ключевые этапы производства волноводных структур:

- 1) Подготовка подложки, которая включает в себя вырезку образца и полировку поверхности кристалла;
- 2) Составление фотошаблонов и создание фотолитографической маски;
- 3) Нанесение слоя Ti (толщиной примерно 90 – 110 нанометров);
- 4) Удаление фоторезиста;
- 5) Процесс диффузии Ti в LiNbO₃;
- 6) Полировка торцов кристалла (для того, чтобы обеспечить качественный ввод оптического излучения).

Самыми важными параметрами является качественная полировка подложки и равномерность напыления металлических пленок. Также определяющим параметром является правильный режим проведения процесса диффузии. Для нанесения слоя Ti как правило применяется технология магнетронного распыления. Данный метод примечателен тем, что у него снижено давление газа в камере и увеличена скорость распыления мишеней. На рисунке 31 изображена схема установки для нанесения металлических пленок методом магнетронного распыления, где 1 – мишень, которая является катодом; 2 – магнит; 3 – анод. На данной рисунке не показано, но над анодом находится подложка, на которой и формируется металлическая пленка (в нашем случае это пленка из титана, хотя могут применяться и металлические пленки из других металлов).

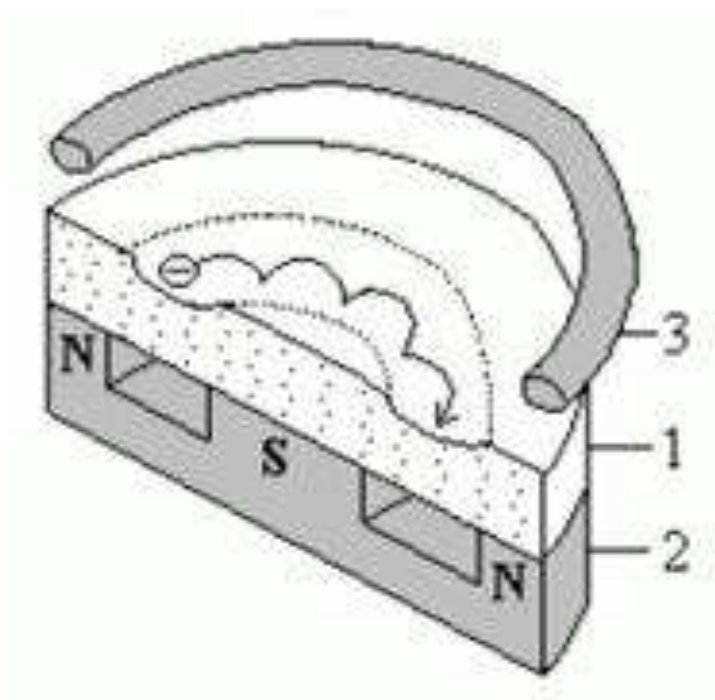


Рисунок 31 – Схема установки для нанесения металлических пленок методом магнетронного распыления

Вследствие того, что траектория движения электронов замкнутая, резко возрастает вероятность столкновения электрона с атомами газа. Из этого следует, что давление в камере будет значительно ниже, чем при изготовлении пленок другими методами. Благодаря гораздо меньшему давлению, пленки получаются более чистыми. Скорость распыления мишени выше, чем в других методах, за счет того, что ионизация газа происходит прямо возле мишени, а не происходит между в пространстве между электродами (катодом и анодом). Эти преимущества и являются основополагающими для применения данного метода нанесения металлических пленок на подложку.

Примером оптической схемы, где используются волноводы выполненные методом диффузии Ti в $LiNbO_3$ является интегрально-оптический фазовый модулятор, показанный на рисунке 32. Принцип работы данной схемы заключается в электрооптических свойствах ниобата лития. В самом простом варианте исполнения электроды, которые применяются для подачи тока к кристаллу, располагаются по разные стороны от световода.

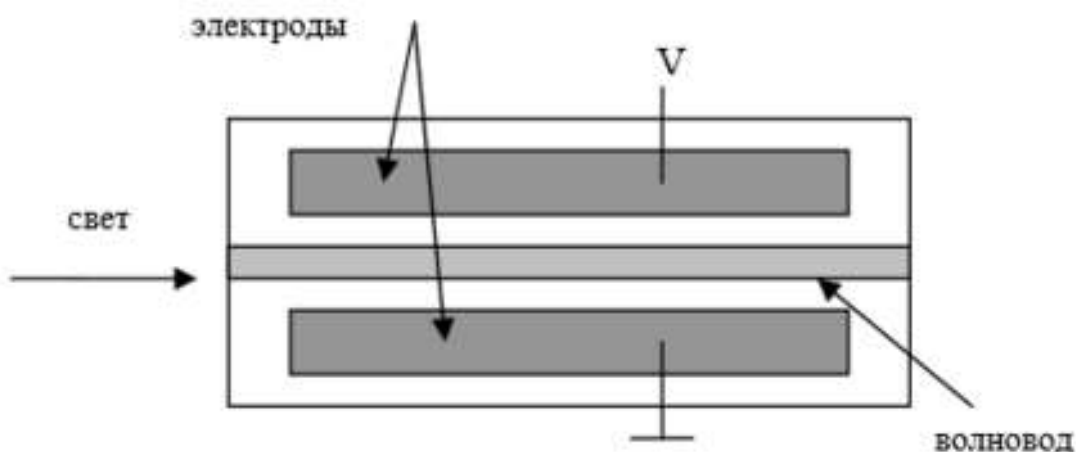


Рисунок 32 – Фазовый электрооптический модулятор

Рассмотрим МИОС (многофункциональную интегрально-оптическую схему) изготовленную методом диффузии Ti в $LiNbO_3$. Как правило, такая схема производится в виде четырехполюсника, что показано на рисунке 33. Ее отличительным качеством является применение X-ветвителя. Таким образом, МИОС имеет два входа (равнозначных), оптическое волокно присоединяется к какому-то одному из входов, второй же при этом является запасным.

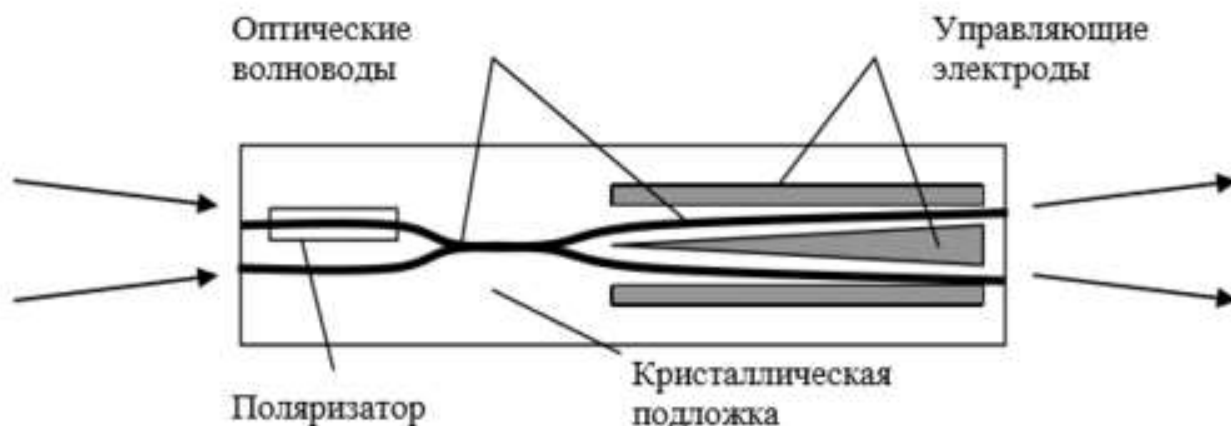


Рисунок 33 – Многофункциональная интегрально-оптическая схема, выполненная методом диффузии Ti в $LiNbO_3$

МИОС, выполненные данным методом, являются более простыми в процессе реализации, чем МИОС выполненные методом протонно-ионного обмена. В то же время их главным недостатком является использование

поляризатора, так как отмечалось уже ранее, волноводы, полученные таким методом, не могут выделять только одну из плоскостей поляризации.

Теперь рассмотрим МИОС, изготовленные по технологии протонно-ионного обмена. Отличительной чертой данной технологии является то, что она низкотемпературная. Отметим главные этапы изготовления волноводов методом протонно-ионного обмена:

- 1) Составление фотошаблонов и создание фотолитографической маски;
- 2) Нанесение металлической пленки (как правило Al, толщиной 55 – 110 нанометров) на подложку;
- 3) Удаление фоторезиста и формирование металлической маски (Al);
- 4) Процесс протонно-ионного обмена (в расплаве бензойной кислоты);
- 5) Удаление металлической маски с поверхности кристалла (методом химического травления);
- 6) Проведение дополнительного отжига;
- 7) Полировка торцов кристалла (для того, чтобы обеспечить качественный ввод оптического излучения).

Наиболее значимыми параметрами являются температура и время проведения протонного обмена и отжига. Без проведения дополнительного отжига, потери на $\lambda = 1550$ нанометров будут составлять около 15 децибел, что является довольно большими потерями. Введение этапа дополнительного отжига позволяет получать волноводы с потерями менее 0,5 дБ/см.

Довольно значимой характеристикой протонно-обменных световодов, предназначенных для ИОМ (интегрально-оптических модуляторов), считается эффективный электрооптический коэффициент. При измерении данного коэффициента определяется пригоден ли волновод для применения его в схеме или нет. Величина коэффициента примерно 28 пм/В, считается приемлемой в основном для 6 и 8 микрометровых оптических волноводов, изготовленных методом протонно-ионного обмена.

Пример многофункциональной интегрально-оптической схемы, изготовленной методом протонно-ионного обмена изображен на рисунке 34. В

МИОС выполненных таким методом, часто используемым разветвителем, для разделения входного сигнала на два канала, является Y-ветвитель. При этом такой ветвитель имеет большие потери из-за большого угла расхождения плеч. С уменьшением угла расхождения уменьшаются и потери.

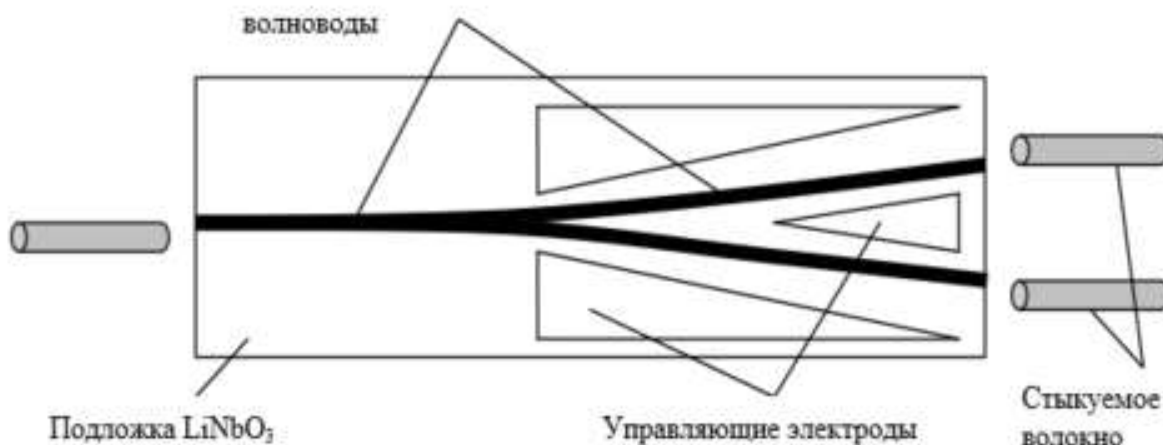


Рисунок 34 – Многофункциональная интегрально-оптическая схема, выполненная методом протонно-ионного обмена

Основным преимуществом МИОС, изготовленных методом протонно-ионного обмена, по сравнению с МИОС, выполненных методом диффузии Ti в LiNbO_3 является отсутствие необходимости использования поляризатора, так как в таких оптических волноводах распространяются моды, имеющие только одну плоскость поляризации. Поляризатор в схеме является источником внесения дополнительных потерь. Так же еще одним преимуществом волноводов, выполненных по технологии протонно-ионного обмена, становятся более высокие электрооптические свойства. К недостаткам можно отнести то, что данная технология на сегодняшний день менее отработана и более сложна в реализации, чем технология диффузии Ti в LiNbO_3 .

3 Изготовление заглубленных канальных оптических волноводов в градиентном ниобате лития

В качестве подложки для изготовления волноводов будем использовать кристалл ниобата лития. Ниобат лития (LiNbO_3) — вещество, являющееся бесцветным кристаллом с определенной ромбоэдрической структурой (рисунок 35). Представляет собой смешанный оксид ниобия лития. Одним из основных методов выращивания данных кристаллов является метод Чохральского. LiNbO_3 является наиболее привлекательным материалом для оптоэлектроники, благодаря своим уникальным фотоупругим, электрооптическим, пьезоэлектрическим и нелинейным свойствам в совокупности с отличными механическими свойствами, которые послужили основой для создания большого ряда приборов.

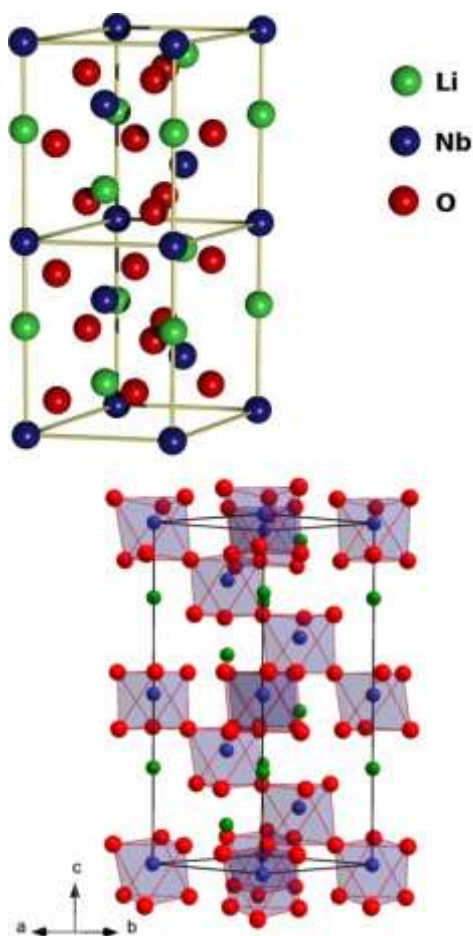


Рисунок 35 – Кристаллическая решетка ниобата лития

Ниобат лития не разлагается при достаточно высоких температурах, не растворяется в воде, и отличается высокой механической прочностью. Он является сегнетоэлектриком (то есть обладает спонтанной поляризованностью в определенном температурном интервале) с температурой Кюри примерной равной 1200 °С. Среди свойств, зависящих непосредственно от состава кристалла, следует отметить эффект фоторефракции - фотоиндуцированное изменение показателей преломления, возникающее в освещенной области кристалла. В зависимости от области применения монокристалла ниобата лития фоторефрактивный эффект (изменение свойств кристалла под действием света) стараются либо усилить (например, для осуществления голографической записи) путем легирования фоторефрактивными примесями, либо подавить (для использования в оптоэлектронике) путем легирования нефоторефрактивными примесями.

Для нарезки образца нужной геометрической формы была использована специальная пила, показанная на рисунке 36.



Рисунок 36 – Специальная установка для нарезки кристаллов

Во время проведения обработки ниобат-литиевого кристалла, мы использовали алмазные пасты для полировки торцов данного кристалла. Благодаря им на обрабатываемые поверхности было оказано механическое и химическое воздействие. Данные пасты создают тонкодисперсные эмульсии, содействующие заметно более равномерному распределению алмазной крошки в рабочей зоне. В составе паст находятся определенные, поверхностно-активные вещества, которые нужны для упрощения промывки деталей и вывода из зоны обработки легковоспламеняющихся жидкостей, а также получившиеся в процессе обработки стружку и шлаки. За счет повышения абразивной способности улучшается производительность труда и качество обрабатываемых поверхностей. Ручную обработку торцов кристалла начинали с пасты, имеющей большую зернистость, после приступали к полировке пастой меньшей зернистости. Таким образом мы последовательно использовали пасты АСМ 40/28, АСМ 28/20, АСМ 20/14, АСМ 14/10, АСМ 10/7, АСМ 7/5, АСМ 5/3, АСМ 3/2, АСМ 2/1 для улучшения эффекта полировки. С целью наработки навыка полировки ниобата лития было обработано несколько предварительных образцов, изображенных на рисунках 37 и 38.



Рисунок 37 – Плоскость кристалла ниобата лития после полировки



Рисунок 38 – Кристаллы ниобата лития после обработки плоскостей и граней

Результаты полировки основного образца, в дальнейшем используемого в качестве подложки для изготовления заглубленных канальных волноводов можно увидеть на рисунках 39, 40, и 41.



Рисунок 39 – Кристалл ниобата лития после полировки (фотография без вспышки)



Рисунок 40 – Кристалл ниобата лития после полировки (фотография со вспышкой)

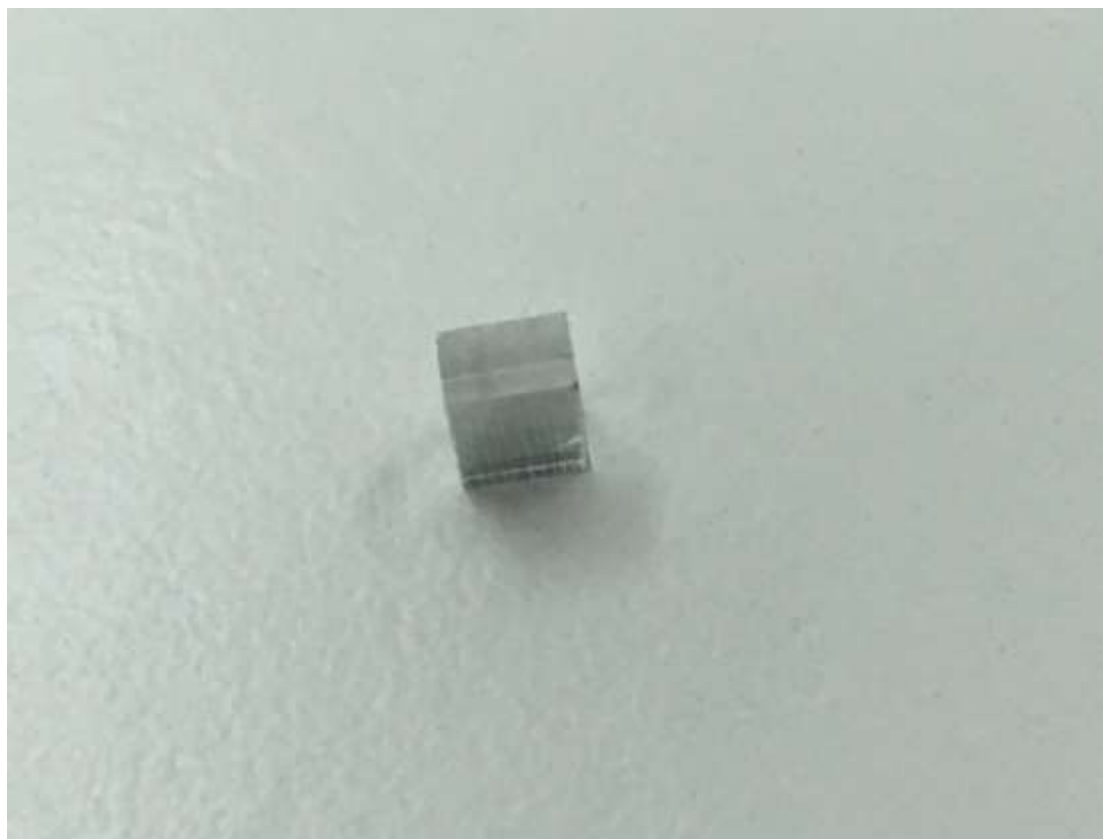


Рисунок 41 – Торец кристалл ниобата лития после полировки (фотография без вспышки)

Так как протонно-ионный обмен и последующий отжиг производятся при определенных высоких температурах, то нам нужно твердотельное реле и ПИД-регулятор для того, чтобы устанавливать на определенный уровень и поддерживать рабочую температуру. Поэтому для более полной характеристики рассматриваемого вопроса были проведены опыты с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором ТРМ101 с универсальным входом и интерфейсом RS-485, подключенным к управляющему компьютеру через преобразователь интерфейсов АС4. Оба устройства произведены компанией «ОВЕН». Блок приборов для установки и поддержания температуры, а также для коммутации с управляющим компьютером, показаны на рисунке 42, где 1 – ПИД-регулятор ТРМ101; 2 – преобразователь интерфейсов АС4; 3 – твердотельное реле; 4 – тумблер.



Рисунок 42 – Блок приборов для установки и поддержания температуры, а также для коммутации с управляющим компьютером

ПИД-регулятор расшифровывается как пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор. Данное устройство применяется в системах автоматического управления для создания сигнала управления с целью получения необходимой точности процесса. Он создает управляющий сигнал, который является суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе — интеграл сигнала рассогласования, третье — производная сигнала рассогласования. Применяемый в данном исследовании ПИД-регулятор ТРМ-101 компании «ОВЕН» изображен на рисунке 43.



Рисунок 43 – ПИД-регулятор ТРМ-101 компании «ОВЕН»

Для определения температуры мы использовали хромель-копелевую термопару в медном корпусе. Термопары хромель-копелевые (ТХК) обладают самой большой дифференциальной чувствительностью из всех промышленно выпускаемых термопар. ТХК применяются для более точных измерений температур, а также для измерений малых величин разности температур. Они могут стабильно работать несколько десятков тысяч часов, и обладают очень высокой термоэлектрической стабильностью в диапазоне до 600°C из-за того, что изменения термоЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов компенсируют друг друга, так как направлены в одну и ту же сторону. К недостаткам хромель-копелевой термопары можно отнести высокую, по сравнению с другими термопарами, чувствительность к деформации.

В ходе исследований были проведены три опыта (рисунок 44, рисунок 45, рисунок 46) с различными значениями пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, начальной температуре 25 °С и температуре уставки 40 °С.

Опыт 1: пропорциональная составляющая – 30, интегральная составляющая – 100, дифференциальная составляющая – 20 (заводские установки).

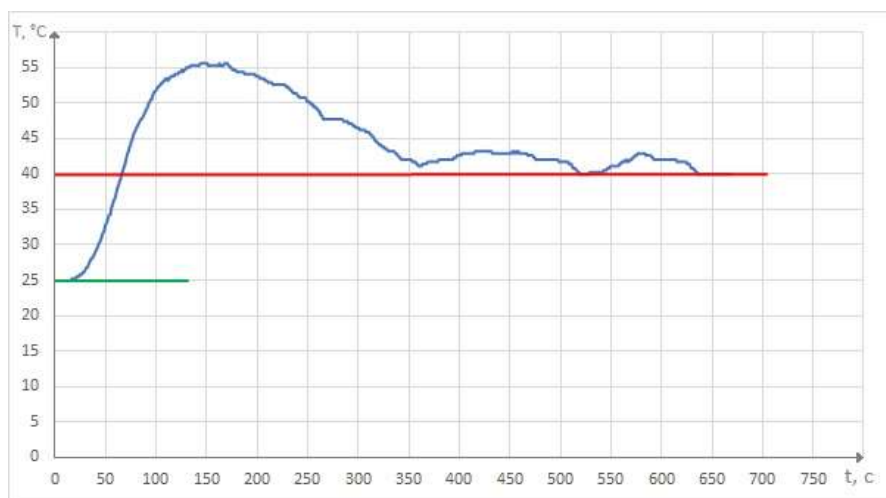


Рисунок 44 — Опыт 1

Опыт 2: пропорциональная составляющая – 20, интегральная составляющая – 125, дифференциальная составляющая – 15.

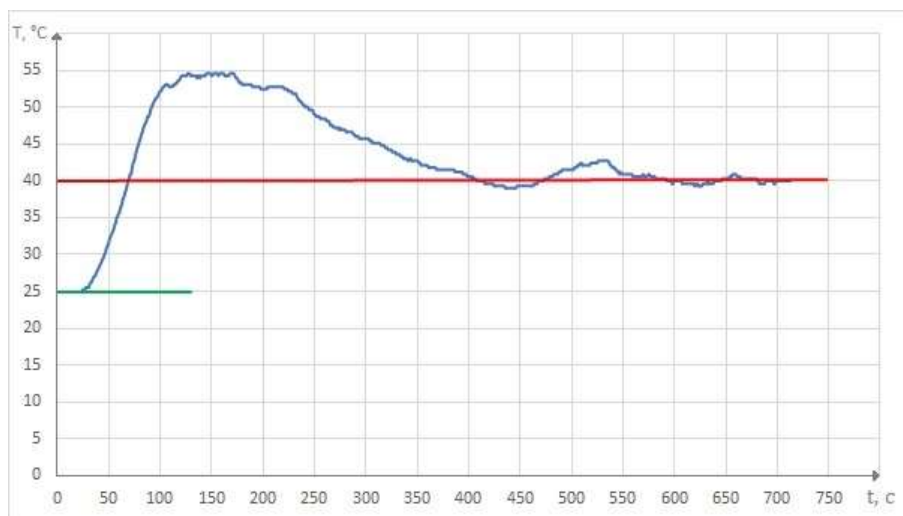


Рисунок 45 — Опыт 2

Опыт 3: пропорциональная составляющая – 10, интегральная составляющая – 135, дифференциальная составляющая – 5.

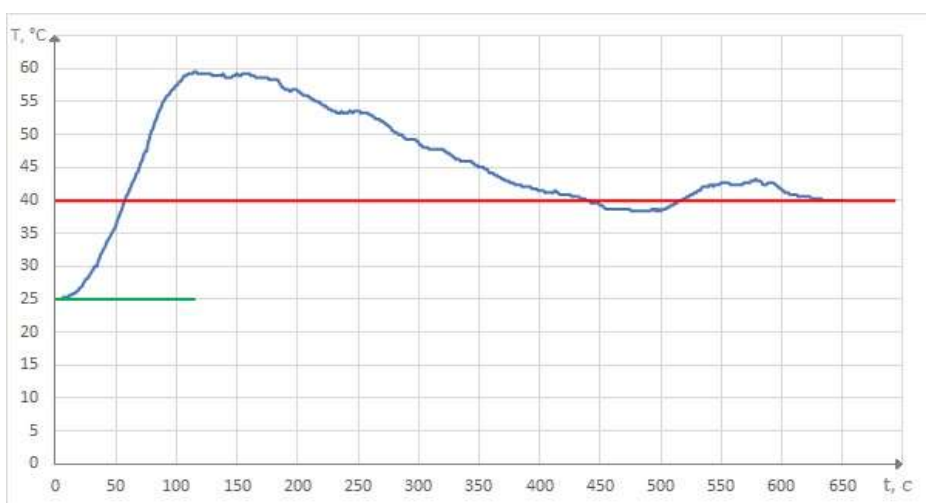


Рисунок 46 — Опыт 3

Далее были подобраны коэффициенты ПИД режима для регулирования температуры протонно-ионного обмена и последующего отжига. Был проведен ряд опытов с различными значениями пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих, начальной температуре 25 $^\circ\text{C}$ и температуре уставки 40 $^\circ\text{C}$. Наименьший интервал времени становления температуры уставки (360 с.) был получен при заводских значениях параметров управления: пропорциональной составляющей – 30, интегральной составляющей – 100, дифференциальной составляющей – 20. В последующем, данные значения будут дальше использоваться для создания заглубленных канальных волноводов в кристалле LiNbO_3 .

После подбора параметров управления ПИД-регулятора и обработки (полировки торцов и плоскостей) кристалла LiNbO_3 , на обработанный образец методом фотолитографии была нанесена алюминиевая маска с прорезями (каждая шириной 7 микрон), при помощи лазерного генератора изображения «Heidelberg $\mu\text{PG 101}$ ». Благодаря отличным техническим характеристикам данной установки на подложке удастся получить прорези с одинаковой шириной по всей длине плоскости кристалла. На рисунке 47

изображена плоскость кристалла с нанесенной маской, в которой присутствуют прорезы под потенциальные волноводы. Данное изображение мы видим в окуляр оптического микроскопа, так как невооруженным глазом рассмотреть металлическую маску с прорезями достаточно сложно.

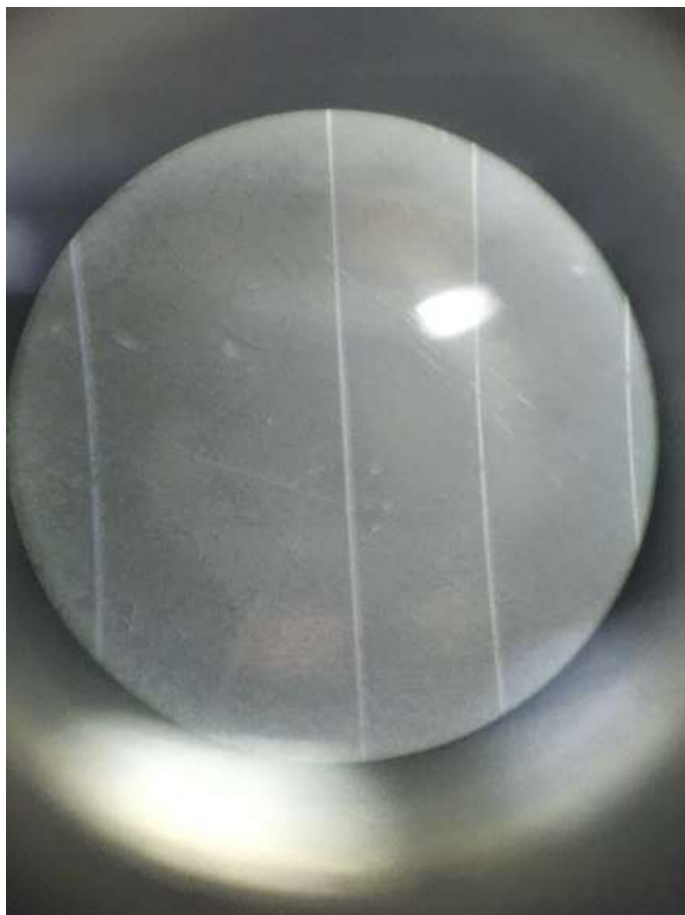


Рисунок 47 — Нанесенная на кристалл алюминиевая маска с прорезями

Следующим этапом было составлено расписание процесса протонно-ионного обмена в программе MasterSCADA компании «ИнСАТ», с целью автоматизации самого процесса. Для этого управляющий компьютер был скоммутирован с ПИД-регулятором ТРМ-101 через преобразователь интерфейсов АС4 при помощи программной технологии OPC-сервер компании «ОВЕН». Как выглядит рабочий интерфейс программы MasterSCADA на управляющем компьютере и расписание процесса, в частности, можно увидеть на рисунках 48 и 49. На рисунке 49 столбец «Параметр» означает значение температурной уставки.

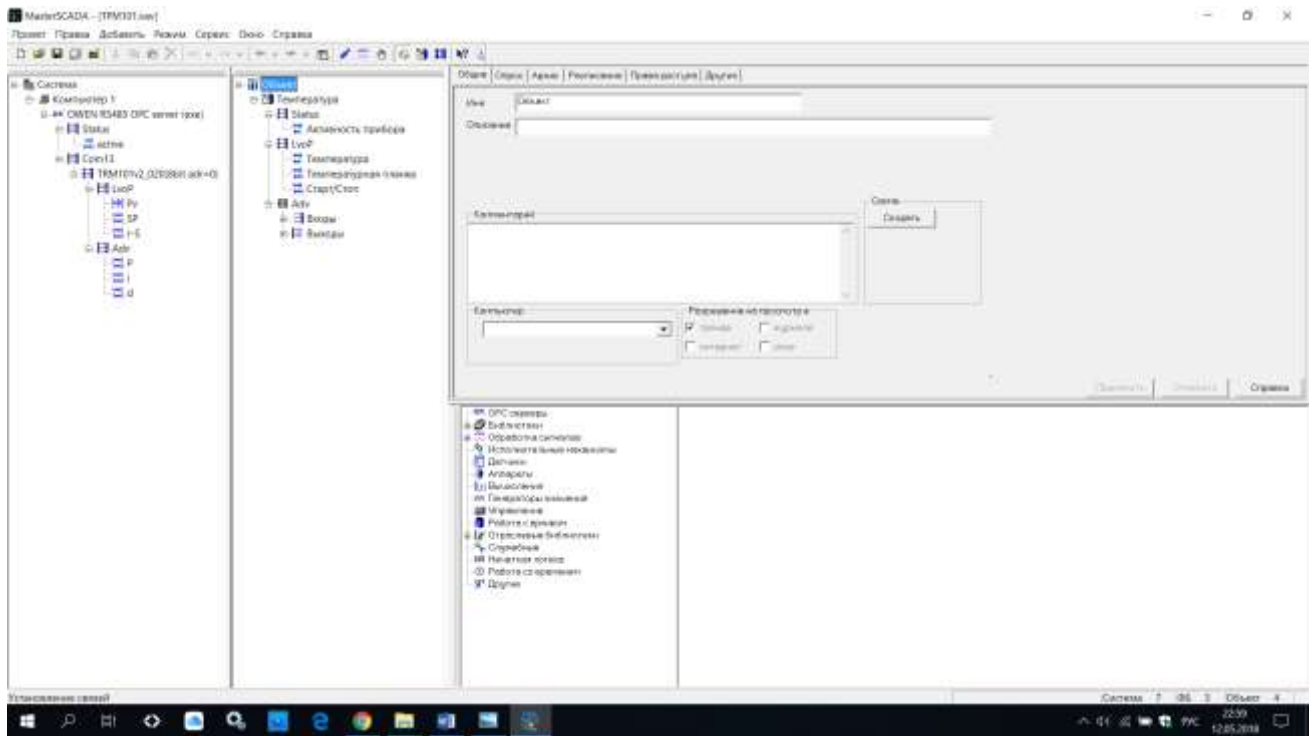


Рисунок 48 — Рабочий интерфейс программы MasterSCADA

The screenshot shows a table of process scheduling data. The table has columns for 'Действие', 'Документ', 'Параметр', 'Время', and 'Повтор'. The data is as follows:

Действие	Документ	Параметр	Время	Повтор
109 Присвоить	LvoP. Температур	110	04.05.2018 17:57:00	нет
110 Присвоить	LvoP. Температур	105	04.05.2018 17:58:00	нет
111 Присвоить	LvoP. Температур	100	04.05.2018 17:59:00	нет
112 Присвоить	LvoP. Температур	95	04.05.2018 18:00:00	нет
113 Присвоить	LvoP. Температур	90	04.05.2018 18:01:00	нет
114 Присвоить	LvoP. Температур	85	04.05.2018 18:02:00	нет
115 Присвоить	LvoP. Температур	80	04.05.2018 18:03:00	нет
116 Присвоить	LvoP. Температур	75	04.05.2018 18:04:00	нет
117 Присвоить	LvoP. Температур	70	04.05.2018 18:05:00	нет
118 Присвоить	LvoP. Температур	65	04.05.2018 18:06:00	нет
119 Присвоить	LvoP. Температур	60	04.05.2018 18:07:00	нет
120 Присвоить	LvoP. Температур	55	04.05.2018 18:08:00	нет
121 Присвоить	LvoP. Температур	50	04.05.2018 18:09:00	нет
122 Присвоить	LvoP. Температур	45	04.05.2018 18:10:00	нет
123 Присвоить	LvoP. Температур	40	04.05.2018 18:11:00	нет
124 Присвоить	LvoP. Температур	35	04.05.2018 18:12:00	нет
125 Присвоить	LvoP. Температур	30	04.05.2018 18:13:00	нет

Рисунок 49 — Часть расписания процесса протонно-ионного обмена

До начала проведения самого процесса изготовления волноводов, была сделана предварительная проверка работоспособности системы. Вместо тигеля с кристаллом в химическом составе, был взят тигель, наполненный водой. ПИД-регулятору, подающему сигналы твердотельному реле, была задана программа нагрева воды с 25 до 100 °С в течение 15 минут. Результат предварительной проверки был положительным, так как система сработала корректно, производя поэтапный нагрев воды до требуемой температуры в указанное время.

Далее был подобран химический состав, необходимый для процесса протонно-ионного обмена. В этот состав входит бензойная кислота ($C_7H_6O_2$) – 50 %, а также смесь нитратов (солей азотной кислоты): KNO_3 – 26 %, $NaNO_3$ – 15 %, $LiNO_3$ – 9 %. Значения температур плавления этих веществ составляют: $C_7H_6O_2$ – 123 °С, KNO_3 – 334 °С, $NaNO_3$ – 308 °С, $LiNO_3$ – 255 °С.

В термоустойчивый тигель, с подсоединенной хромель-копелевой термопарой в медном корпусе, необходимой для измерения температуры процесса, был погружен кристалл в химическом составе (рисунок 50).



Рисунок 50 — Термоустойчивый тигель, в котором находится кристалл в химическом составе

После этого тигель был поставлен внутрь специальной печки, которая представляет собой керамическое кольцо, обвитое металлической проволокой. Процесс нагрева в данной печке происходит за счет выделения количества теплоты по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t, \quad (8)$$

где I — сила тока,

R — сопротивление проводника,

Δt — время прохождения тока по проводнику.

Сила тока, идущая по проводнику, устанавливается твердотельным реле, которое получает сигналы от ПИД-регулятора. Сам ПИД-регулятор получает команды от управляющего компьютера через преобразователь интерфейсов.

Печка находится в специальном лабораторном шкафу с вытяжкой. То, как выглядит печка с находящимся внутри тигелем, показано на рисунке 51.



Рисунок 51 — Специальная печка, с находящимся внутри нее тигелем, в котором содержится кристалл в смеси бензойной кислоты и нитратов

Был разработан план, по которому должен проходить протонно-ионный обмен и отжиг:

- 1) Нагрев с 25 до 200 °С в течение 30 минут;
- 2) Поддержание заданной температурной планки в 200 °С в течение 1 часа (процесс протонно-ионного обмена);
- 3) Нагрев с 200 до 350 °С в течение 30 минут;
- 4) Поддержание заданной температурной планки в 350 °С в течение 2 часов (отжиг);
- 5) Контролируемое снижение температуры с 350 до 35 °С в течение 1 часа и более.

После чего план был внесен в расписание программы MasterSCADA на управляющем компьютере, подключенном к ПИД-регулятору. На этом этап подготовки к процессу протонно-ионного обмена завершен.

По завершению данного эксперимента, на управляющем компьютере получили график мнемосхемы, отражающий изменения температурной планки (обозначается зеленым цветом) и реальной температуры (обозначается красным цветом). График показан на рисунке 52.

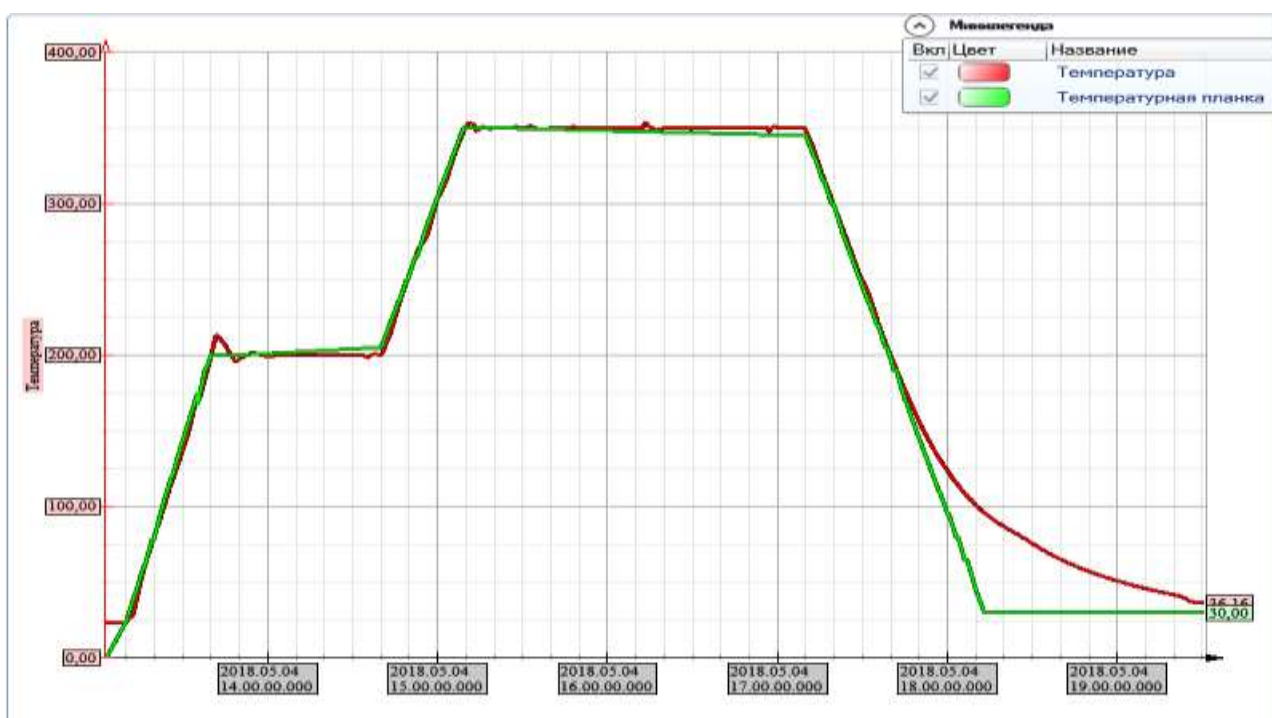


Рисунок 52 — Температурный график протонно-ионного обмена и отжига

После процесса протонно-ионного обмена и отжига, кристалл, остывший до комнатной температуры в 30 °С, был извлечен из тигля и очищен ацетоном от следов расплава нитратов и бензойной кислоты. Далее с образца была удалена алюминиевая маска, методом растворения ее в 1 %-ом растворе щелочи калия КОН. Внешне образец после проведенного опыта и температурных перепадов не получил физических деформаций и повреждений.

Следующим этапом стало рассмотрение, при помощи оптического микроскопа, полученных заглубленных канальных волноводов в кристалле ниобата лития. На рисунке 53 показан подсвеченный торец кристалла с получившимися волноводами, а на рисунке 54 - приближенный снимок этого же торца (волноводы на рисунках показаны стрелками). Данные изображения мы видим в окуляр оптического микроскопа.

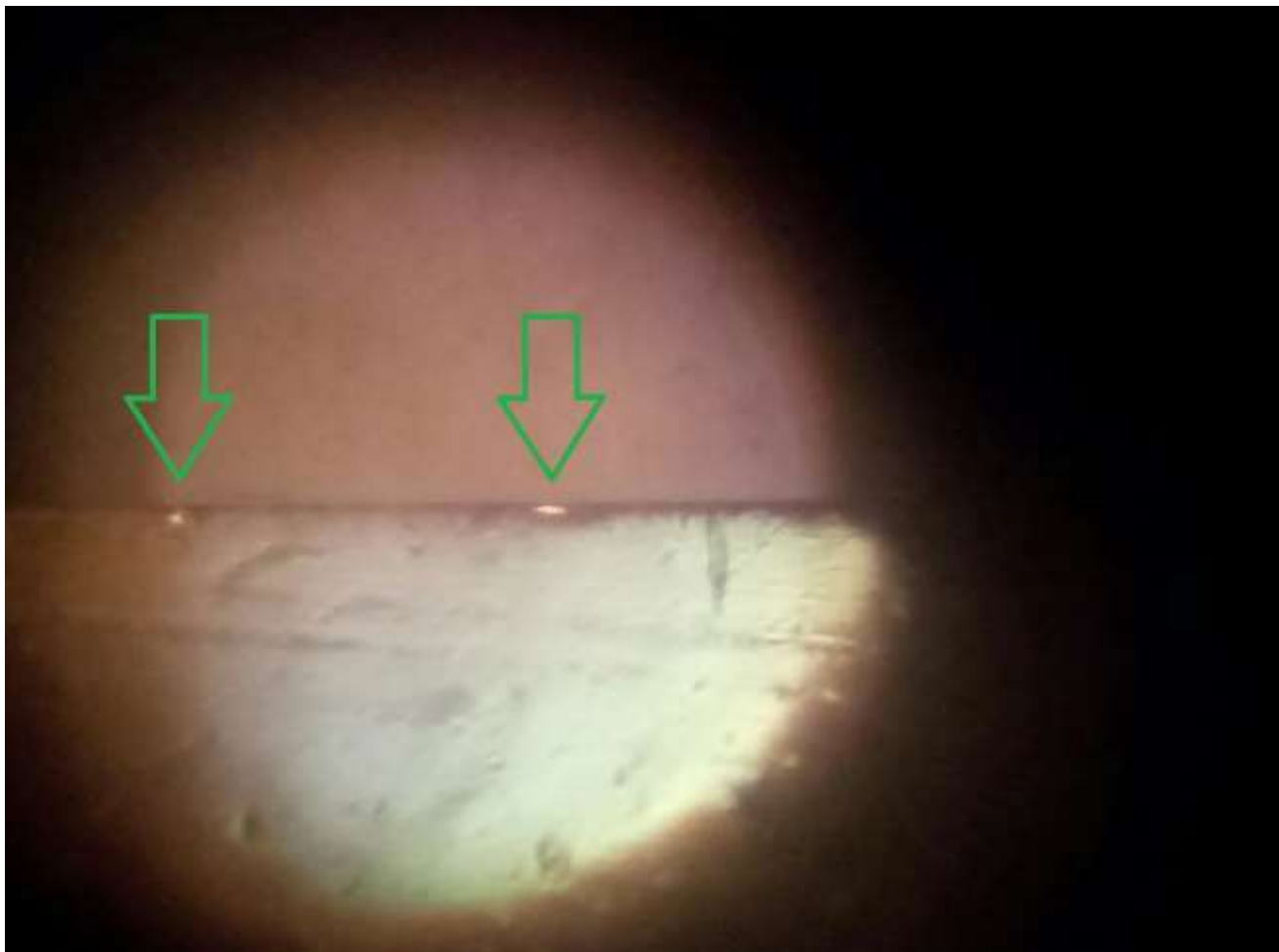


Рисунок 53 — Подсвеченный торец кристалла с получившимися волноводами



Рисунок 54 — Приближенный снимок торца кристалла с волноводами

Для усиления эффекта заглабления и увеличения диаметра волноводов был проведен дополнительный отжиг на воздухе, то есть образец находился в тигеле без смеси бензойной кислоты и нитратов. План проведения дополнительного отжига состоял в следующем:

- 1) Нагрев с 25 до 300 °С в течение 1 часа;
- 2) Поддержание заданной температурной планки в 300 °С в течение 5 часов (процесс дополнительного отжига);
- 3) Контролируемое снижение температуры с 300 до 25 °С в течение 1 часа и более.

Получившийся в итоге график мнемосхемы процесса дополнительного отжига на воздухе изображен на рисунке 55, где зеленым цветом отображаются значения температурной планки, а красным цветом – значения реальной температуры.

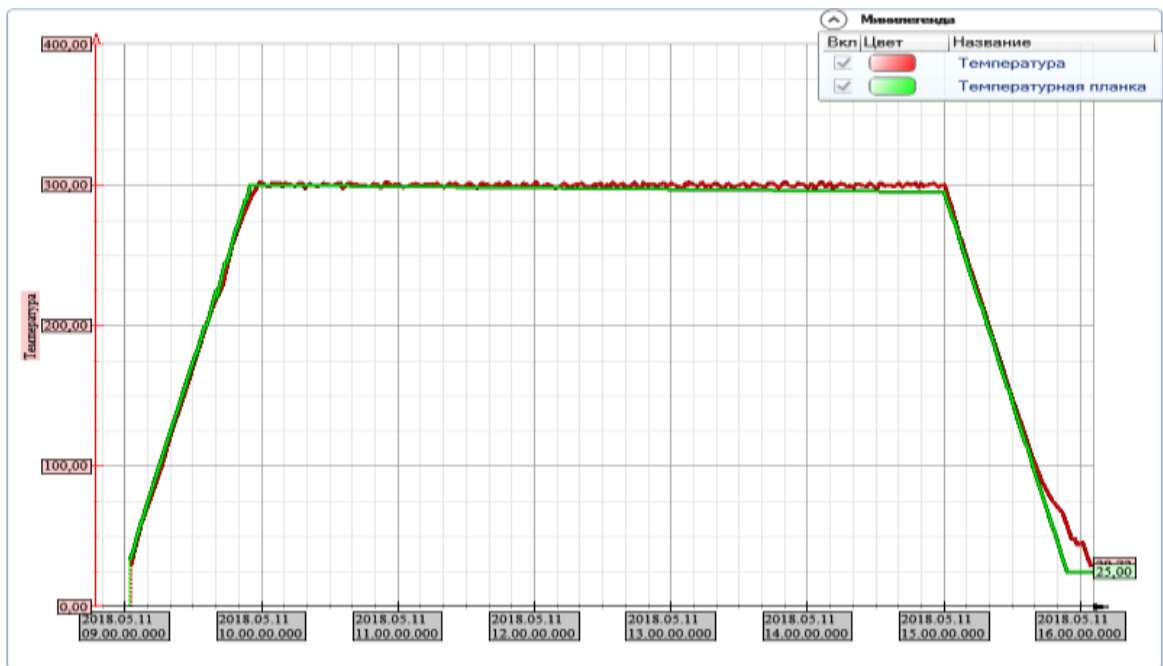


Рисунок 55 — Температурный график дополнительного отжига на воздухе

На рисунке 56 показан торец кристалла с волноводом, после проведения дополнительного отжига на воздухе. Представленное изображение, как уже отмечалось ранее, мы видим в окуляр оптического микроскопа, а волновод на рисунке показан стрелкой.

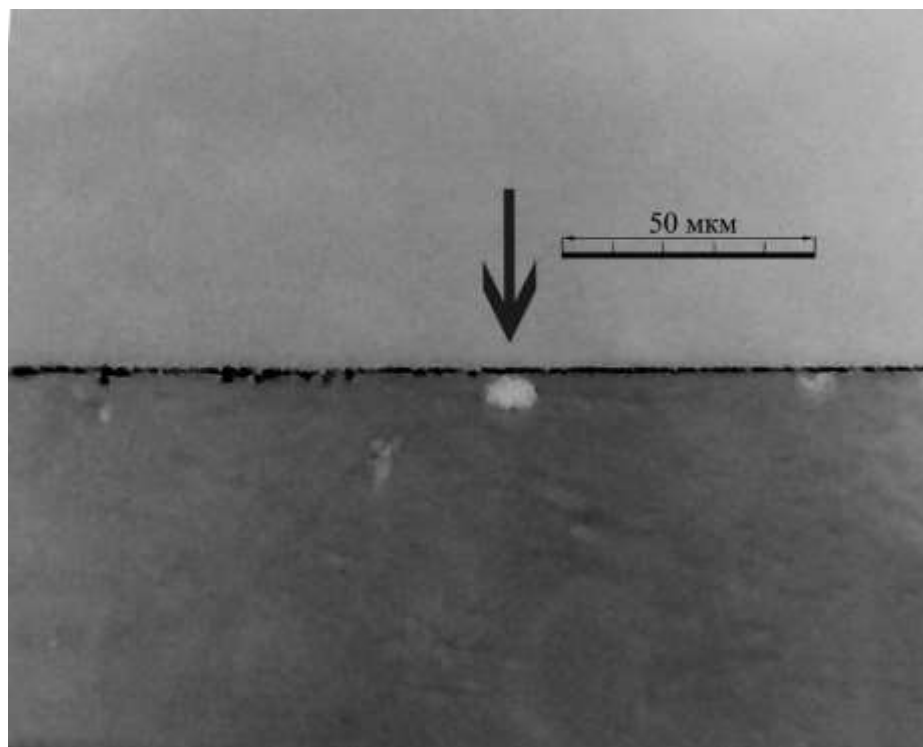


Рисунок 56 — Торец кристалла с волноводами после дополнительного отжига

В результате дополнительного отжига волновода получились более заглубленными в подложку кристалла, а диаметр самих волноводов увеличился до 10 микрон. Также они приняли более округлую форму.

Данные изменения положительным образом влияют на качество волновода, так как такой волновод гораздо проще соединить с одномодовым оптическим волокном. Соединение оптического волокна с волноводом происходит методом склеивания. Клей (иммерсионная жидкость) должен иметь коэффициент преломления, близкий к коэффициенту преломления волокна и волновода. К достоинствам этого метода следует отнести оперативность и отсутствие деформации сердцевин соединяемых оптических волокон. Это способствует тому, что в области стыка обеспечиваются малые потери.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выпускной квалификационной работы состоят в следующем:

Проведен литературный обзор по теме волноводных структур. При рассмотрении различных видов волноводов было выявлено, что волноводы в кристалле могут быть планарные (имеют ограничения только в одном направлении) и канальные (имеют ограничения в двух направлениях). Те же в свою очередь могут быть либо поверхностными, либо заглубленными. Основными преимуществами заглубленных волноводов по сравнению с поверхностными волноводами являются более низкие потери (от 0,2 до 0,5 дБ/см) и возможность эффективного согласования профиля показателя преломления волновода с профилем показателя преломления волокна. Заглубленные волноводы на основе стекол обладают стабильностью параметров, большим диапазоном изменения свойств в результате изменения химического состава подложек или модификатора, устойчивостью к воздействиям внешних факторов и высоким качеством поверхности.

Далее были изучены методы получения заглубленных волноводов в ниобате лития, а в частности, методы электростимулированной диффузии, эффузии, ионной имплантации, твердотельной диффузии (метод диффузии Ti в $LiNbO_3$) и протонно-ионного обмена. В результате изучения был сделан вывод, что метод протонно-ионного обмена имеет ряд преимуществ перед остальными методами, таких как невысокая стоимость, более простая реализация технических операций, и доступность оборудования.

Во время практической работы были экспериментально подобраны технологические режимы изготовления заглубленных волноводов в градиентном ниобате лития, а также изготовлены заглубленные канальные волноводы в заранее подготовленном образце. Выполнение практической части было разделено на несколько этапов. Первым этапом была проведена подготовка оптического образца для дальнейшего опыта. Подготовка

заклучалась в полировке алмазными пастами разной зернистости (начиная с пасты с зернистостью алмазного порошка в 40 микрометров, и заканчивая пастой с зернистостью алмазного порошка в 2 микрометра) плоскостей и граней кристалла ниобата лития. Вторым этапом были подобраны коэффициенты ПИД режима для регулирования температуры протонно-ионного обмена и последующего отжига. Был проведен ряд опытов с различными значениями пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Наименьший интервал времени становления температуры уставки (360 с.) был получен при заводских значениях параметров управления: пропорциональной составляющей – 30, интегральной составляющей – 100, дифференциальной составляющей – 20. Третьим этапом было нанесение на образец алюминиевой маски с прорезями (каждая шириной 7 микрометров) методом фотолитографии, при помощи установки «Heidelberg μ PG 101». Четвертым этапом было составление расписания процесса протонно-ионного обмена в компьютерной программе MasterSCADA компании «ИнСАТ», с целью автоматизации самого процесса. Для этого управляющий компьютер был скоммутирован с ПИД-регулятором ТРМ-101 через преобразователь интерфейсов АС4 при помощи программной технологии OPC-сервер компании «ОВЕН». Пятым этапом был подобран химический состав, необходимый для процесса протонно-ионного обмена. В данный состав входила бензойная кислота ($C_7H_6O_2$) – 50 %, а также смесь нитратов (солей азотной кислоты): KNO_3 – 26 %, $NaNO_3$ – 15 %, $LiNO_3$ – 9 %. Шестым этапом было непосредственно проведение самого протонно-ионного обмена. После чего, были рассмотрены при помощи оптического микроскопа, полученные заглубленные канальные волноводы в подготовленном образце. Седьмым этапом было решено провести дополнительный отжиг кристалла на воздухе с целью усиления эффекта заглубления и увеличения диаметра волноводов. В результате были получены заглубленные канальные волноводы с диаметром самих волноводов 10 микрометров. На этом исследование режимов изготовления, и непосредственно сам процесс получения заглубленных оптических волноводов в градиентом ниобате лития завершен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Салех Б. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Т.1. / Б. Салех, М. Тейх. – М.: Интеллект, 2012. – 760 с.
- 2 Галуцкий В.В. Электронный лабораторный практикум по дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства» / В.В. Галуцкий, Н.В. Киселёв, Е.В. Строганова. – Краснодар: Новация, 2016. – 78 с.
- 3 Галуцкий В.В. Электронный комплекс расчета параметров оптических нелинейных сред / В.В. Галуцкий, Е.В. Строганова. – Краснодар: Новация, 2016. – 80 с.
- 4 Дмитриев В.Г. Прикладная нелинейная оптика / В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 512 с.
- 5 Koechner W. Solid – State Laser Engineering / W. Koechner. – М.: Springer, 2006. – p.747.
- 6 Сосунов А. В. Связь структурных особенностей приповерхностных слоев монокристалла ниобата лития с показателем преломления оптических волноводов / А. В. Сосунов, Р.С. Пономарев, А.Б. Волынцев // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. – М.: НИЯУ «МИФИ», 2016. – С. 109–110.
- 7 Электрооптическая эффективность фазовых модуляторов на основе протонообменных LiNbO_3 волноводов / С. М. Кострицкий, Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров и др. // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. – М.: НИЯУ «МИФИ», 2016. – С. 329–330.
- 8 Пантелей. Е. Исследование волноводов на ниобате лития методом ИК-спектроскопии / Е. Пантелей // X Международный научно-практический конкурс: сб. тр. конф. – Пенза: Наука и Просвещение, 2017. – С. 58–62.
- 9 Кострицкий С. М. Электрооптический переключатель 1x2 на основе канальных волноводов в кристаллах LiNbO_3 / С. М. Кострицкий, Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров // VI Международная конференция по фотонике

и информационной оптике: сб. науч. тр. – М.: НИЯУ «МИФИ», 2017. – С. 342–343.

10 Безпальный А. Д. Оптическое формирование канальных волноводов и планарных дифракционных решеток в фоторефрактивном приповерхностном слое ниобата лития / А. Д. Безпальный, А. О. Верхотуров, В.М. Шандаров // Ученые записки физического факультета Московского Университета. – 2016. – № 5. – С. 1–4.

11 Григорьев В. А. Применение теории оптических волноводов к исследованию и разработке оптических преобразователей для помехоустойчивых систем связи / В. А. Григорьев // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – 2010. – № 1–2. – С. 64–68.

12 Моделирование оптических импульсных сигналов в квантово-криптографических системах связи / В. И. Лойко, О. А. Кулиш, С.Р. Шарифуллин и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского Государственного Аграрного Университета. – 2016. – № 123. – С. 1444–1452.

13 Безпальный А. Д. Канальные волноводы, поточечно индуцированные в фоторефрактивном ниобате лития лазерным излучением / А. Д. Безпальный, В. М. Шандаров, И. В. Шевченко // III Всероссийский научный форум «Наука будущего – наука молодых»: сб. тез. уч. фор., 12–14 сен. 2017 г. – Нижний Новгород, 2017. – С. 184–185.

14 Бородин Ю. В. Низкотемпературное нанолегирование протонированных кристаллов LiNbO_3 одновалентными ионами / Ю. В. Бородин // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – № 1. – С. 109–113.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КубГУ»)

Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Заведующий кафедрой
д-р техн. наук, профессор

_____ Н. А. Яковенко

_____ 2018 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В ГРАДИЕНТНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

Работу выполнил _____ Астафуров Руслан Алексеевич

Направление 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Научный руководитель

канд. физ.-мат. наук, доцент _____ В. В. Галуцкий

Нормоконтролер инженер _____ И. А. Прохорова

Краснодар 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Кубанский государственный университет»
Физико-технический факультет
Кафедра оптоэлектроники

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой  Н. А. Яковенко

« 21 » октября 2017 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу (бакалавр)

Студенту 4 курса ОФО Астафурову Руслану Алексеевичу 8-913-67-14-419
(фамилия, имя, отчество, телефон)

Направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
(код) (наименов.)

Тема выпускной квалификационной работы: *Исследование режимов получения заглубленных оптических волноводов в градиентном ниобате лития*

Научный руководитель: Галуцкий В.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоэлектроники
(фамилия, инициалы, ученым степеням, должность)

<p>1. Цель работы</p> <p><i>Исследовать режимы получения заглубленных оптических волноводов в градиентном ниобате лития</i></p>	
<p>2. Перечень задач для достижения поставленной цели</p> <ol style="list-style-type: none">1. Провести литературный обзор по теме исследования2. Изучить режимы получения заглубленных волноводов в ниобате лития3. Экспериментально подобрать технологические режимы изготовления заглубленных волноводов в градиентном ниобате лития4. Оформить ВКР	<p><i>Сроки выполнения:</i> к 1.12.2017 к 1.02.2018 к 1.04.2018 к 15.05.2018</p>

3. Проблема (или объект или предмет) исследования и основной предполагаемый результат:
Объект исследования – заглубленные волноводы в градиентном ниобате лития.

4. Перечень исходных источников (материалов), рекомендуемых руководителем к использованию:
Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения / Б. Салех, М. Тейх. – М.: Интеллект, 2012
В.В. Газуцкий, Н.В. Киселев, Е.В. Строганова Электронный лабораторный практикум по дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства», Краснодар. «Новация», 2016
В.В. Газуцкий, Е.В. Строганова Электронный комплекс расчета параметров оптических волноводных сред. Краснодар. «Новация», 2016.

5. Дополнительное поле задач.

6. Срок представления ВКР к защите: 20 мая 2018 г.

Название темы и цель работы соответствуют ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.02

Задание выдано « 2 » октября 2017 г.



(подпись научного руководителя)

Задание принято к исполнению « 2 » октября 2017 г.



(подпись студента)

Примечания:

1. Настоящее задание заполняется в двух экземплярах.

2. Настоящее задание прилагается к завершенной ВКР и предоставляется в ГЭК.

3. По «Положение о подготовке и защите ВКР» действующее в КубГУ п.1.5 <http://www.kubgu.ru/sites/default/files/docs/pkr.pdf>

4. Научный руководитель ВКР контролирует все стадии подготовки и написания работы вплоть до ее защиты. В

обязанности научного руководителя ВКР входит:

- помочь студенту в выборе (формулировании) темы ВКР и разработке плана ее выполнения;
- консультирование по подбору литературы и фактического материала;
- контроль за выполнением ВКР в соответствии с индивидуальным планом;
- оценка качества выполнения ВКР в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями (отзыв научного руководителя).

О соблюдении профессиональной этики

За все сведения, изложенные в ВКР, использование фактического материала и другой вспомогательной информации, обоснованность (достоверность) выводов и защищаемых положений автор ВКР несет профессиональную, нравственную и юридическую ответственность.

Ознакомлен « 2 » октября 2017 г.



(подпись студента)

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Кубанский государственный университет»
Физико-технический факультет

Кафедра оптоэлектроники

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

о научно-исследовательской работе студента, выполнившего ВКР

Студент Астафуров Руслан Алексеевич

(ФИО студента)

Направление 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Группа ИТиСС Форма обучения очная

1. Тема ВКР ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ В ГРАДИЕНТНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ

2. Заключение о степени соответствия ВКР теме, утвержденной приказом ректора соответствует

3. Оценка работы студента над ВКР За время выполнения ВКР студент Астафуров Р.А. достиг поставленной цели, успешно решил задачи ВКР и получил важные научные результаты

4. Оценка студента как специалиста: За время выполнения дипломной работы проявил себя как специалист по техническим параметрам и режимам получения заглубленных оптических волноводов, необходимых для изготовления оптических модуляторов и переключателей. За время выполнения ВКР студент Астафуров Р.А. приобрел и повысил уровень освоения компетенций ОК-1-ОК-9, ОПК-1-ОПК-7, ПК-1-ПК-6, ПК-16-ПК-19, ПК-27-ПК-34: при выполнении работы произведен широкий литературный обзор по тематике исследования, проявлена готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, проявлена способность реализовывать программы экспериментальных исследований, включая выбор технических средств и обработку результатов; также за время выполнения ВКР студент Астафуров Р.А. проявил способность по организации работ по практическому использованию и внедрению результатов исследований, что нашло отражение в разработанном программном продукте и выводах выполненной ВКР.

5. Общая характеристика студента: В процессе выполнения дипломной работы проявил свои исследовательские способности и достиг значимых научных результатов. Зарекомендовал себя успешным и самостоятельным студентом, инициатором многих технических решений, использованных при выполнении ВКР

6. Замечания руководителя отсутствуют

7. Заключение и оценка ВКР (соответствует или не соответствует предъявляемым требованиям, оценка: отлично, хорошо, удовлетворительно):

соответствует предъявляемым требованиям, оценка: отлично

8. Заключение (рекомендация) о присвоении квалификации / степени (заслуживает или не заслуживает присвоения квалификации / степени заслуживает присвоения квалификации Бакалавр по направлению 11.03.02

Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Должность, фамилия, имя, отчество, ученое звание, степень руководителя: доцент, доцент кафедры оптоэлектроники, к.-ф.-м.н. Галуцкий В.В.

Подпись руководителя _____

Дата «24» мая 2018г.