

Пермский государственный национальный исследовательский университет

На правах рукописи

Сосунов Алексей Владимирович



**Стабильность интегрально-оптических схем на основе $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ –
волноводов в зависимости от состояния приповерхностного слоя
кристалла ниобата лития**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена на кафедре нанотехнологий и микросистемной техники ФГАОУ ВО Пермского государственного национального исследовательского университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Волынец Анатолий Борисович

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук, доцент,
Кострицкий Сергей Михайлович
Технический директор Зеленоградского отделения ООО НПК «Оптолинк».
2. Доктор технических наук, доцент
Сахабутдинов Айрат Жавдатович
Профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий «Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ».
3. Кандидат технических наук, доцент,
Перин Антон Сергеевич
Доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники».

Защита состоится 30 марта 2022 года в 15.00 на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Стабильность работы интегрально-оптических схем (ИОС) на основе $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводов, являющихся объектом настоящего диссертационного исследования, имеет ключевое значение при их эксплуатации. ИОС на ниобате лития (НЛ) имеют низкие оптические потери, высокую скорость обработки оптического сигнала и широкую оптическую полосу пропускания. Указанные характеристики позволяют широко применять ИОС в телекоммуникационных системах с высокой скоростью передачи данных и волоконно-оптических гироскопах, где необходима внешняя модуляция сигнала. В настоящее время такие системы могут передавать данные со скоростью более 100 Гбит/с. Рост объема данных приводит к необходимости повышения надежности и пропускной способности таких устройств.

Главными недостатками ИОС являются нелинейность передаточной функции и дрейф рабочей точки (РТ), из-за чего для коррекции работы ИОС невозможно применять широко распространенные стандартные ПИД-контроллеры. Возникает необходимость в применении специальных драйверов и поиске методов повышения стабильности РТ в ИОС. Эти недостатки проявляются в течение всего срока службы ИОС и могут приводить к ошибкам при передаче данных. Кроме того, ИОС является дорогостоящей высокотехнологичной продукцией, поэтому экономически целесообразно иметь качественный входной контроль пластин ниобата лития и высокий процент годной продукции.

Исследования стабильности работы ИОС проводились неоднократно, но метода, позволяющего полностью устранить дрейф РТ в ИОС не предложено. Кроме того, анализу подвергались конструкционные факторы, влияющие на дрейф РТ, и совсем не рассматривались внутренние (материальные) параметры НЛ, волноводов и, в конечном счете, ИОС.

$\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводы формируются в приповерхностном слое пластины НЛ с глубиной залегания не более 10 мкм. После шлифовки и полировки пластин НЛ образуется нарушенный приповерхностный слой. Указанные изменения структуры пластин НЛ необходимо рассматривать с микроскопической точки зрения как увеличение числа точечных дефектов и дислокаций в области $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводов, что является важным с точки зрения стабильности работы ИОС. Увеличение числа дислокаций в приповерхностном слое НЛ приводит к росту подвижности ионов H^+ , вносимых в структуру кристалла в ходе формирования волноводов методом протонного обмена (ПО). В связи с этим возникает необходимость в формировании волноводов с учетом нарушенного приповерхностного слоя, а наличие легких путей диффузии в области волноводов может приводить к созданию локальных электрических полей и перераспределению зарядов при изменении температуры или постоянного внешнего напряжения.

Таким образом, настоящая работа направлена на комплексное исследование состояния приповерхностного слоя пластин НЛ, используемых при производстве ИОС, а также на устранение внутренних источников дрейфа РТ на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов для получения высокостабильных ИОС.

Цель работы: выявить закономерности влияния нарушенного приповерхностного слоя пластин НЛ на стабильность работы интегрально-оптической схемы на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов.

Задачи работы:

- Разработать методику исследования структуры, состава и свойств приповерхностного слоя пластин НЛ;
- Исследовать свойства приповерхностного слоя пластин НЛ (состав, шероховатость поверхности, характер скола, внутренние напряжения, механические характеристики);
- Разработать метод восстановления структуры приповерхностного слоя пластин НЛ;
- Исследовать дрейфовые характеристики ИОС на основе НЛ с восстановленной структурой нарушенного приповерхностного слоя;
- Разработать технические решения для входного контроля пластин НЛ и повышения стабильности работы ИОС.

Научная новизна:

1. Впервые установлена и исследована неизвестная ранее особенность строения приповерхностного слоя пластин ниобата лития, состоящая в том, что данный слой, характеризуется повышенной плотностью дефектов, в том числе дислокаций кристаллического строения, имеет четко выраженную границу, отделяющую его от остальной части кристалла, на которой скачком изменяются как структурные параметры, так и физические свойства кристалла.

2. Впервые установлена и исследована взаимосвязь между структурным состоянием приповерхностного слоя пластин ниобата лития и дрейфом рабочей точки интегрально-оптических схем, изготовленных на этих пластинах. Помимо известных внешних факторов, влияющих на стабильность интегрально-оптических схем на основе протонообменных волноводов в ниобате лития, выявлен и исследован дополнительный внутренний (материальный) фактор.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Предложены и апробированы практические рекомендации для входного контроля пластин ниобата лития при производстве интегрально-оптических схем.

2. Предложены и апробированы практические рекомендации для повышения стабильности работы оптических параметров интегрально-оптических схем.

3. Предложены и апробированы методики контроля дрейфовых характеристик интегрально-оптических схем.

Эффективность данных рекомендаций была доказана на опытных образцах интегрально-оптических схем, полученных на действующем производстве в Пермской научно-производственной приборостроительной компании (акт внедрения №15/0-25-а от 12.10.2020 г.).

Основные положения, выносимые на защиту

- оригинальные экспериментальные результаты исследования структуры и свойств приповерхностного слоя пластин НЛ;
- метод термической обработки пластин НЛ с целью уменьшения дефектности их приповерхностного слоя и снижение как кратковременного, так и долговременного дрейфов рабочей точки ИОС на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов;
- практические рекомендации по повышению стабильности работы ИОС на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов.

Личный вклад автора

Все экспериментальные результаты получены при участии автора. Рентгенографические и электронно-микроскопические исследования (в части структурных методов), проведение протонного обмена, восстановление нарушенного приповерхностного слоя кристалла ниобата лития и исследование дрейфовых характеристик интегрально-оптических схем (в части интегрально-оптических методов) проводились автором лично.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается взаимодополняющим применением различных средств современного научно-технического инструментария, статистикой выполненных экспериментов, отсутствием каких-либо противоречий между новыми результатами, полученными лично автором и данными других авторов в тех областях, где эти результаты пересекаются.

Публикации и апробация работы.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 25 печатных работах, из которых 5 статей в журналах, индексируемых в WoS/Scopus, 6 статей в журналах из списка РИНЦ (из них 4 – ВАК), 14 тезисов конференций.

Основные результаты диссертации были доложены на следующих краевых, всероссийских и международных конференциях: краевая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Пермь, 2013, 2016, 2020); 5-я международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2016); международная конференция «СибОптика-2016» (Новосибирск, 2016); 22-я всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Ростов-на-Дону, 2016);

II всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов: фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения (Пермь, 2016); XV российская научная студенческая конференция по физике твердого тела ФТТ-2016 (Томск, 2016); международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2016, 2017); всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2017), X международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2018); всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника-2020» (Красноярск, 2020); 18-я международная научная конференция-школа «Материалы нано-, микро- оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2020), 10-я международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2021).

Исследования, выполнялись при взаимодействии Пермского государственного национального исследовательского университета и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках следующих проектов: «Создание высокотехнологичного производства интегрально-оптических схем на ниобате лития для волоконно-оптических гироскопов и систем мониторинга электрического поля и биопотенциалов», № 13.G25.31.0004. «Разработка и освоение в серийном производстве интегрально-оптических сверхвысокочастотных модуляторов на 40 ГГц», № 188/11-ФЗП1-19.10ок. «Изучение структуры, состава, свойств протонообменных волноводов в ниобате лития для создания интегрально-оптических фазовых модуляторов с низкими оптическими потерями и стабильными характеристиками», № 17-43-590309. «Изучение процессов формирования протонообменных волноводов интегрально-оптических фазовых модуляторов на основе отечественного ниобата лития для создания навигационного оборудования широкого спектра применения», № 20-42-596001. «Совершенствование ионообменных методов формирования оптических волноводов для высокостабильных интегрально-оптических схем», № С-26/848.

Структура работы и объем.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, благодарностей, двух приложений и списка цитированной литературы, включающего 125 наименований. Общий объем диссертации 115 страниц, включая 43 рисунка и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дается общая характеристика работы и ее актуальность.

В **первой главе** приводится описание интегрально-оптических схем: топология, передаточная функция, электрооптический эффект, волноводные моды и возможные источники дрейфа рабочей точки. Кроме того, рассматриваются строение, структура и свойства приповерхностного слоя

пластин НЛ, а также особенности процесса создания $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов.

Из литературного обзора следует ряд важных выводов. Во-первых, дрейфовые процессы в ИОС рассматривались неоднократно, но до сих пор однозначного решения проблемы не было найдено. Во-вторых, влияние непосредственно структуры и свойств приповерхностного слоя НЛ на работоспособность ИОС не исследовалось. В-третьих, структура приповерхностного слоя НЛ может существенно отличаться от структуры остального объема кристалла. В-четвертых, комплексные исследования приповерхностного слоя пластин НЛ ранее не проводились. Кроме того, протонообменные волноводы формируются именно в этом приповерхностном слое НЛ и это необходимо учитывать. Таким образом, первая глава дает информацию, необходимую для понимания оригинальной части работы, обуславливая ее научную и практическую значимость в решении поставленных задач.

Вторая глава содержит описание экспериментальных методов исследования структуры приповерхностного слоя пластин НЛ различных производителей и дрейфовых процессов интегрально-оптических схем.

В настоящей работе были использованы серийно-производимые исходные образцы конгруэнтного состава X-среза НЛ производства Sipat (Китай), Crystal Technology (США) и Фомос-Материалс (Россия), используемые при производстве ИОС.

Для анализа состава, структуры и свойств приповерхностного слоя НЛ использовали следующие методы: оптическая микроскопия и профилометрия, электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия и рентгеноструктурный анализ. Методами оптической микроскопии (Olympus MX-61) и профилометрии (New View 7300) проводили оценку состояния поверхности исходных пластин НЛ. Анализ проводили, сравнивая заявленные паспортные данные исследуемых образцов с полученными экспериментальными результатами по числу царапин, дефектов и шероховатости поверхности.

Исследование приповерхностного слоя пластин НЛ проводили по оригинальной методике. Суть данной методики заключалась в том, что пластины НЛ ломали вручную вдоль проведенной алмазным индентором царапины (рис. 1). Анализ состава, структуры и свойств приповерхностного слоя пластин НЛ после излома (с торца пластины) осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi

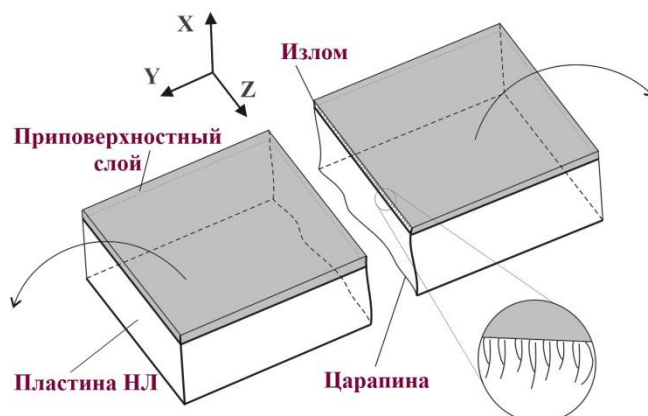


Рис. 1. Схематичное представление процедуры получения поперечного излома пластин НЛ

S3400N и атомно-силового микроскопа Bruker Icon. Исследование структуры исследуемых образцов НЛ после различных стадий обработки (предотжиг, протонный обмен, постобменный отжиг) проводили с помощью дифрактометра ДРОН УМ-1. В качестве монохроматора применялся кристалл бездислокационного Si, дающий отражение от кристаллографической плоскости (111) K_{β} -линии Co-излучения $\lambda=1.62075 \text{ \AA}$.

Интегрально-оптические характеристики ИОС (рис. 2) определяли на различных стадиях их изготовления. С помощью модовой спектроскопии определяли профиль показателя преломления $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводов и их глубину.

Кратковременный дрейф РТ исследовали при приложении напряжения смещения V_{bias} к электродам ИОС (рис. 3). Время кратковременного дрейфа рабочей точки ИОС исследовали при скачкообразном изменении напряжения в диапазоне $\pm 8 \text{ В}$ с шагом 1 В и выдержкой в течение 5 минут после смены знака приложенного напряжения к электродам модулятора от малошумящего источника электрического питания.

Долговременный дрейф РТ оценивали с помощью энергии активации дрейфа РТ. РТ фиксировали при постоянном напряжении 4.5 В , что соответствует линейному участку передаточной функции для всех исследуемых ИОС на длине волны $\lambda=1.55 \text{ мкм}$. Далее, ИОС помещали в печь и нагревали до $50, 70$ и $90 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой в течение 7 часов. На выходе измеряли изменения оптической мощности, соответствующей смещению рабочей точки ИОС.

Третья глава диссертации посвящена исследованию структуры и свойств приповерхностного слоя НЛ и установлению его влияния на дрейфовые характеристики ИОС.

Первая часть: исследование дефектной структуры приповерхностного слоя пластин НЛ.

Поверхность и приповерхностный слой пластин НЛ имеют ключевое значение при производстве элементов ИОС, т.к. на поверхность наносят электроды, а в приповерхностном слое формируют $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводы. В результате изучения поверхности исследуемых пластин НЛ было явно выявлено большое количество разнонаправленных царапин по всей площади поверхности для пластин НЛ производства Sipat (рис. 4), а для пластин НЛ производства Crystal Technology и Фомос незначительное количество локальных точечных дефектов. Шероховатость поверхности в пределах

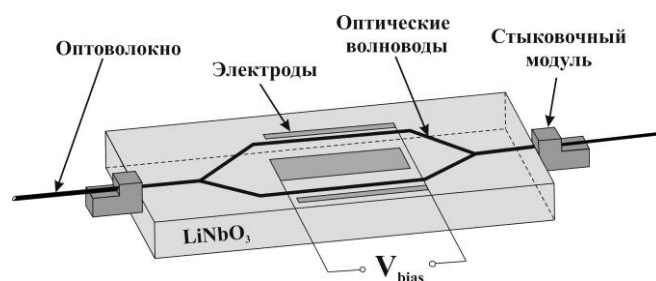


Рис. 2. Схематичное представление ИОС



Рис. 3. Схема измерений дрейфа РТ

погрешности измерений согласуется с заявленными паспортными данными $Ra \leq 0.7$ нм для образцов Фомос и Crystal Technology, а для образцов Sipat превышает данное значение в 5 раз. Таким образом, образцы производства Фомос и Crystal Technology имеют достаточно высокое оптическое качество поверхности по сравнению с образцом производства Sipat, который не соответствует своим паспортным характеристикам. Оптическая микроскопия и профилометрия являются достаточно простыми методами, применимыми для входного контроля пластин НЛ.

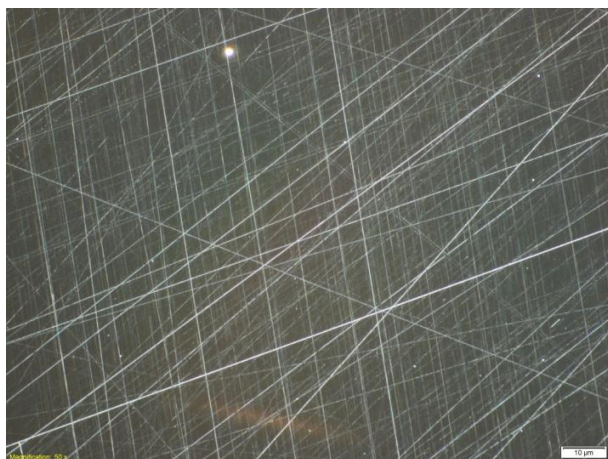


Рис. 4. Поверхность пластин НЛ производства Sipat

Электронно-микроскопические исследования проводили на свежих сколах пластин НЛ (рис. 5). Выбор именно такой методики (рис. 1) обусловлен тем, что свежий скол образца дает дополнительную информацию о состоянии материала, поскольку получается за счет трещины, которая движется в соответствии с минимальными энергозатратами. Из полученных микрофотографий видно, что траектория движения трещины в ходе формирования скола меняется вблизи поверхности исследуемых пластин НЛ, то есть происходит многочисленное дробление единой трещины. Распространение трещины происходит по главному направлению, вдоль определенной кристаллографической плоскости, но из-за столкновения с дефектами и ядрами дислокаций направление трещины претерпевает изменения, которые мы наблюдаем в виде измененного рельефа поверхности скола. Данный эффект обусловлен высокой концентрацией дефектов структуры приповерхностного слоя пластин НЛ, по сравнению с остальной частью материала.

Таким образом, после разрушения исследуемых пластин НЛ наблюдается картина, характеризующая состояние их нарушенного приповерхностного слоя в зависимости от качества резки, шлифовки и полировки. Средняя глубина нарушенного приповерхностного слоя исследуемых пластин составляет порядка 15 мкм (Sipat), а для образцов Crystal Technology и Фомос порядка 10 мкм.

Необходимо отметить, что именно в этом дефектном слое формируются все светопроводящие элементы ИОС, что существенно

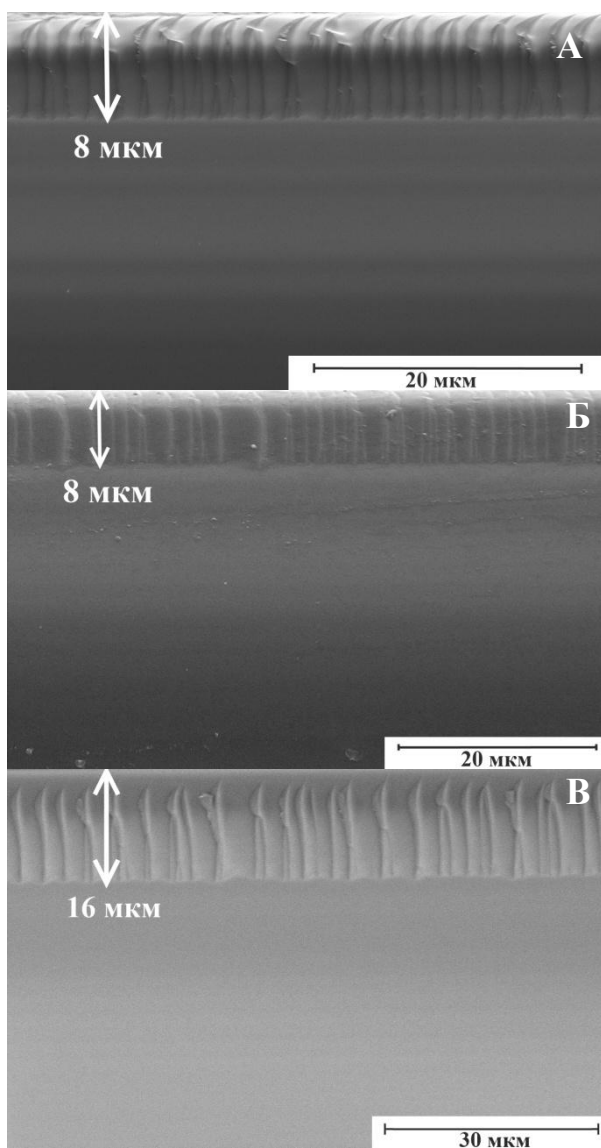


Рис. 5. Поперечное сечение исходных пластин НЛ после излома: Фомос (А), Crystal Technology (Б), Sipat (В).

кристаллов с малой плотностью дислокаций, а текучесть материала возрастает. В области 3, вблизи самой поверхности пластины НЛ, где плотность дислокаций максимальна, происходит упрочнение кристалла, в соответствии с кривой Бочвара-Одинга и текучесть материала уменьшается.

Полученные результаты хорошо согласуются с изменением элементного состава. Наибольшие отклонения в соотношении Nb/O, полученные послойно методом энергодисперсионного анализа для образца Sipat приведены в таблице 1 и наблюдаются именно в приповерхностном слое глубиной до 10 мкм, для которого характерно максимальное размножение дефектов структуры. Оценка величины микронапряжений в приповерхностном слое НЛ, проведенная на основе расчетов уширения дифракционных кривых от двух порядков отражений от плоскостей (110) и (220) НЛ, соответственно показывает существенно повышенные значения для пластин Sipat ($2.4 \cdot 10^{-4}$) по сравнению с пластинами Фомос и Crystal Technology ($1.5 \cdot 10^{-4}$).

изменяет условия их функционирования по сравнению с бездефектными кристаллами.

Происхождение структуры данного приповерхностного слоя имеет деформационную природу, характерную для реальных кристаллов. Свойства данного слоя могут быть качественно описаны с помощью простых кривых, устанавливающих зависимость между плотностью дислокаций ρ и текучестью материала σ (кривая Бочвара-Одинга), представленных на рис. 6 (вставка справа). На рис. 6 приводится анализ механических свойств исследуемых пластин НЛ после излома (с поперечного сечения) с помощью кривой Бочвара-Одинга на примере образца Sipat.

В области 1, что соответствует внутренним (глубинным) слоям НЛ плотность дислокаций минимальна, а предел текучести максимален. С появлением первых дислокаций глубина проникновения индентора резко увеличивается (область – 2), что по кривой Бочвара-Одинга соответствует структуре реальных

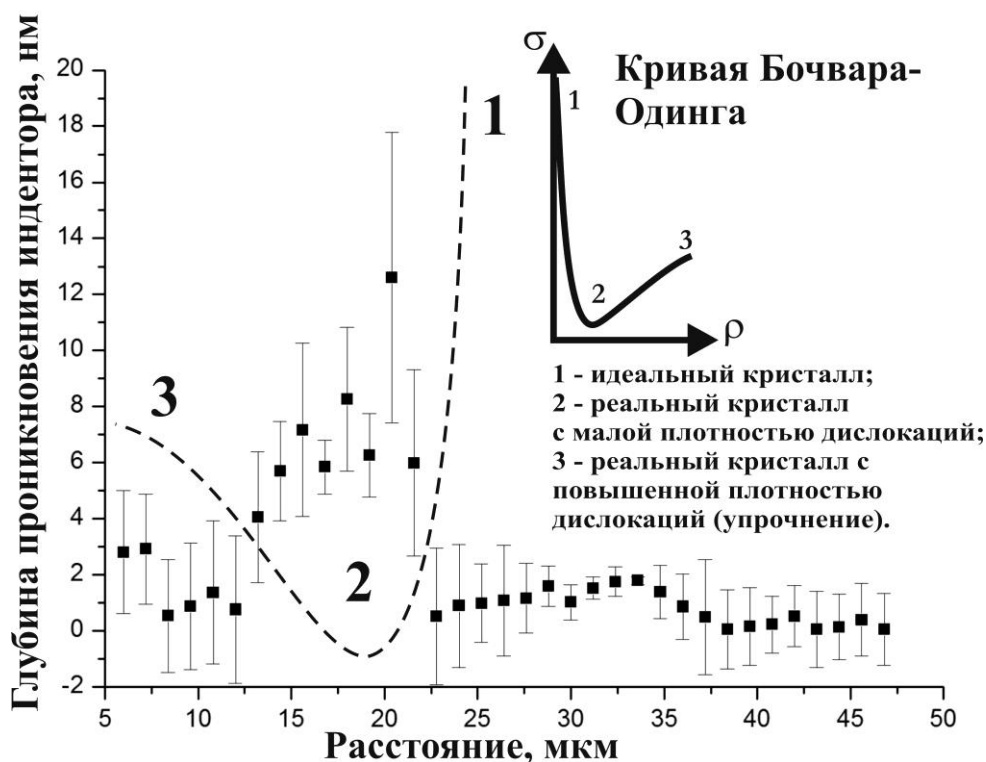


Рис. 6. Механические свойства приповерхностного слоя НЛ

Таблица 1. Соотношение концентрации атомов Nb к атомам кислорода в зависимости от глубины залегания исследованных слоев пластин НЛ

Глубина, мкм	Nb/O, ат. %
0-10	26
11-20	32
21-50	33

Таким образом, все результаты, полученные структурными методами, взаимно дополняют друг друга. Для всех исследуемых образцов характерно наличие неоднородного приповерхностного слоя глубиной 10-15 мкм, характеризующегося повышенной плотностью дефектов, в том числе дислокаций, с максимальным отклонением элементного состава. Сравнительный анализ исследуемых образцов показывает существенно худшие характеристики для образцов Sipat в отличие от образцов Фомос и Crystal Technology, поэтому восстановление нарушенного приповерхностного слоя и исследование дрейфовых характеристик ИОС проводили исключительно на образцах Crystal Technology, результаты исследования которых представлены во второй части.

Вторая часть: исследование дрейфа рабочей точки ИОС при различных внешних условиях на основе НЛ с восстановленной структурой.

Восстановление структуры НЛ производили с помощью гомогенизирующего предотжига пластин с целью снятия внутренних напряжений и снижения дефектности. Гомогенизирующий предотжиг НЛ проводили в воздушной атмосфере в интервале 400-800 °С с шагом в 100 °С.

Данный интервал был выбран из следующих соображений. Ниже 400 °С трудно ожидать серьезных структурных изменений, а выше 800 °С катионная подрешетка НЛ нарушается, а процесс снятия напряжений сопровождается образованием кислородных вакансий. Кроме того, возможна потеря атомов Li. Гомогенизирующий предотжиг проводили со скоростью нагрева 10 °С/мин с последующей выдержкой в течение 180 минут, после чего образцы остывали с печью.

В результате проведения экспериментов по предотжигу пластин НЛ была определена наиболее оптимальная температура восстановления нарушенного приповерхностного слоя, которая составила 500 °С. При данной температуре глубина нарушенного слоя составляет не более 1 мкм и характеризуется наименьшими искажениями кристаллической решетки (рис. 7). При более высоких температурах (выше 500 °С) начинается перестройка структуры кристалла, приводящая к повышению внутренних напряжений кристаллической решетки. Уширение нарушенного приповерхностного слоя в области температур 600-800 °С (рис. 7) находится в пределах разброса значений и может быть связано с его размытием.

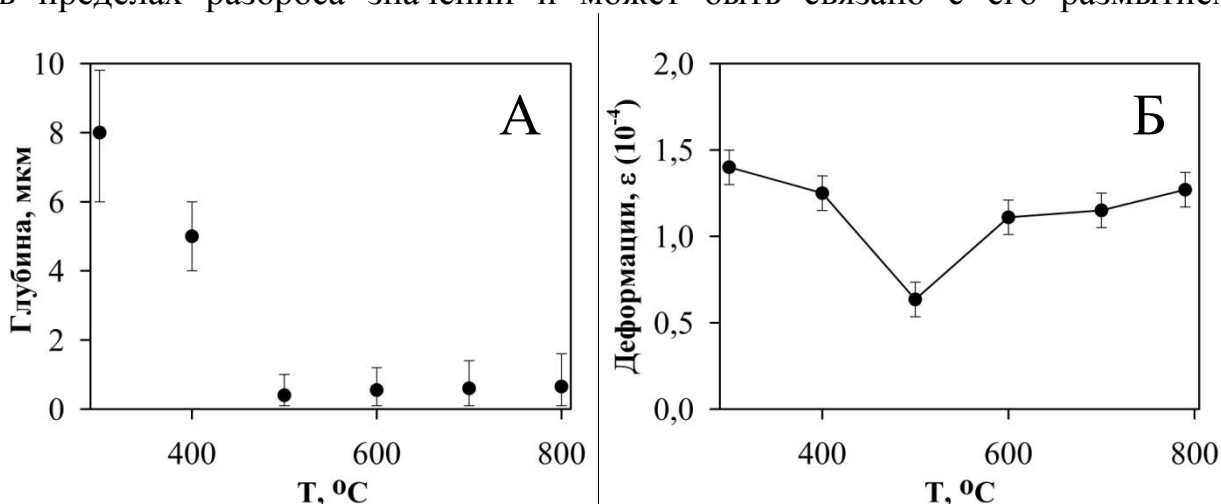


Рис. 7. Зависимость глубины нарушенного приповерхностного слоя (А) и деформации кристаллической решетки НЛ (Б) от температуры предотжига

Профили показателя преломления $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов в зависимости от температуры гомогенизирующего предотжига представлены на рис. 8. Независимо от температуры предотжига профиль показателя преломления протонообменных волноводов остается градиентным, а Δn_e варьируется от 0.02 до 0.03 на глубине от 4.5 до 5.5 мкм, что соответствует одномодовому режиму работы. При этом с повышением температуры предотжига Δn_e на поверхности уменьшается. Это вероятно связано с тем, что концентрация дефектов структуры, куда могут попасть протоны в ходе процесса протонного обмена, уменьшается. Повышение однородности структуры с точки зрения стабильности работы ИОС является принципиально важным, а небольшое уменьшение Δn_e не критично для работоспособности ИОС.

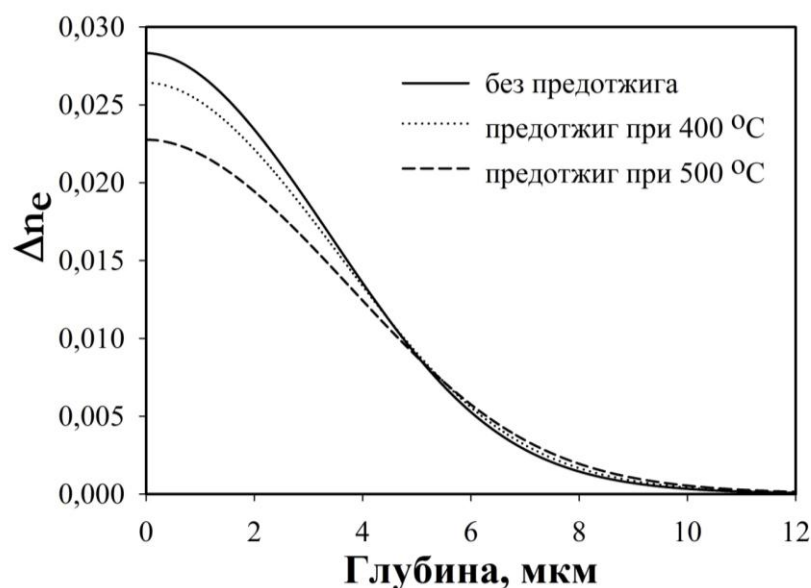


Рис. 8. Профиль Δn_e от температуры гомогенизирующего предотжига НЛ

Таким образом, оптические характеристики планарных протонообменных волноводов согласуются с ранее описанными структурными изменениями кристаллической решетки НЛ в зависимости от температуры гомогенизирующего предотжига.

Дрейф РТ выражается в ее постепенном смещении по передаточной функции от заданного драйвером оптимального положения при постоянных внешних условиях, включая величину электрического напряжения, подаваемого на систему электродов ИОС. В научной литературе дрейф РТ разделяют на кратковременной и долговременный. Долговременный дрейф РТ характеризует процессы, происходящие в кристалле НЛ в диапазоне времени от десятка минут до месяцев и лет, либо в течение всего жизненного цикла работы ИОС. Кратковременной дрейф РТ описывает процессы, происходящие сразу после подачи напряжения на систему электродов ИОС и, прекращающиеся, как правило, в течение нескольких минут после изменения напряжения. Предполагается, что оба вида дрейфа имеют одинаковую природу, связанную с движением заряженных дефектов в кристаллической решетке НЛ.

Исследование кратковременного дрейфа РТ проводили, подавая на электроды ИОС постоянное напряжение и записывая при этом изменение выходной оптической мощности P_{out} . В отсутствие дрейфа P_{out} должна мгновенно стабилизироваться после подачи напряжения V_{bias} на электроды ИОС. Однако измеряемое значение P_{out} менялось в течение некоторого времени после подачи напряжения (рис. 9). Время, за которое P_{out} выходит на изначальное значение (разница менее 1 %) после двукратного ($- \rightarrow + \rightarrow -$) переключения полярности напряжения является, в нашем случае, характеристикой ИОС, показывающей, насколько быстро происходит подавление дрейфа РТ. Подавление дрейфа РТ на основе восстановленного НЛ проходит более чем в 2 раза быстрее по сравнению с контрольными

образцами 116 ± 22 и 286 ± 37 с. Такая существенная разница во времени дрейфа РТ может быть обусловлена только более однородной структурой вследствие восстановления нарушенного приповерхностного слоя пластин НЛ. Тогда при приложении напряжения V_{bias} заряженным дефектам гораздо труднее передвигаться, создавая при этом локальные электрические поля в области $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводов, приводя к изменению показателя преломления и дрейфу РТ.

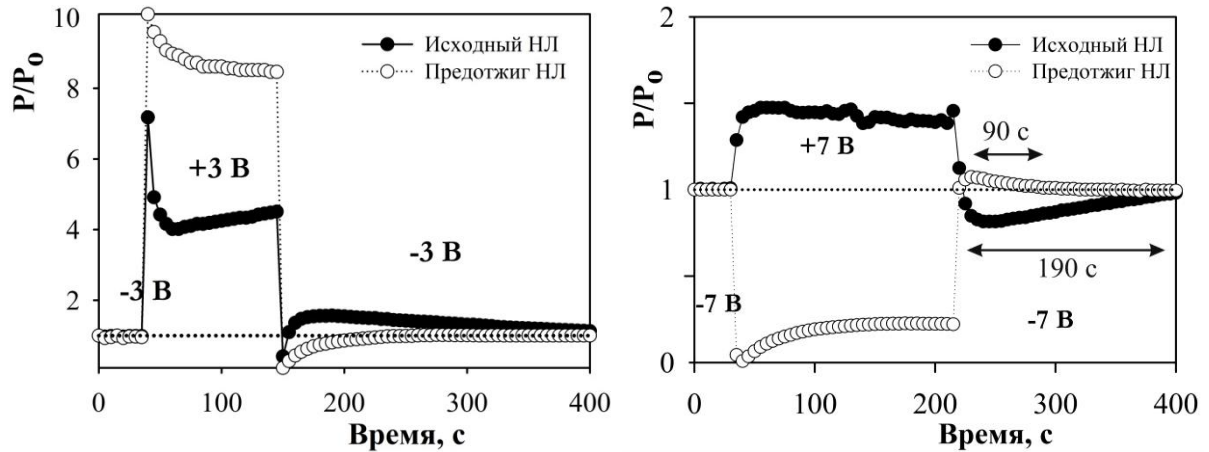


Рис. 9. Графики кратковременного дрейфа РТ при ± 3 В и ± 7 В

Долговременный дрейф анализировали на основе расчетов энергии активации E_a дрейфа РТ. Экспериментально обнаружено, что при изменении температуры РТ смещается и в течение определенного времени выходит в новое равновесное состояние. В этом случае значение P_{out} можно представить в виде степенной функции:

$$P_{out}(t)/P_0 = A_0 \cdot t^n, \quad (1)$$

где t – время, P_0 – выходная оптическая мощность при V_0 , A_0 и n – коэффициенты дрейфа РТ. В то же самое время, P_{out} зависит от температуры:

$$P_{out}(t, T)/P_0 = (B_0(T) \cdot t)^n, \quad (2)$$

где T – температура, $B_0(T) \sim e^{-E_a/kT}$ – константа скорости дрейфа РТ, пропорциональная функции Аррениуса.

Уравнение (1) не отражает полностью физический смысл явления дрейфа РТ, а выражает экспериментально наблюдаемый профиль изменения P_{out} , который можно использовать для сравнительного анализа энергии активации дрейфа РТ для ИОС до и после восстановления структуры НЛ. На рис. 10 показаны графики Аррениуса, рассчитанные для исследуемых ИОС. E_a на экспериментальных образцах ИОС после восстановления структуры нарушенного приповерхностного слоя НЛ составила 1.5 эВ, что в два раза превышает значение E_a для контрольных образцов ИОС без применения гомогенизирующего предотжига, $E_a=0.8$ эВ. Полученные результаты говорят о том, что для перевода системы в неравновесное состояние необходимо приложить энергии в два раза больше в случае использования пластин, подвергнутых предварительному отжигу. Это происходит за счет меньшего количества заряженных дефектов и дислокаций в области канальных $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ -волноводов и приповерхностного слоя НЛ.

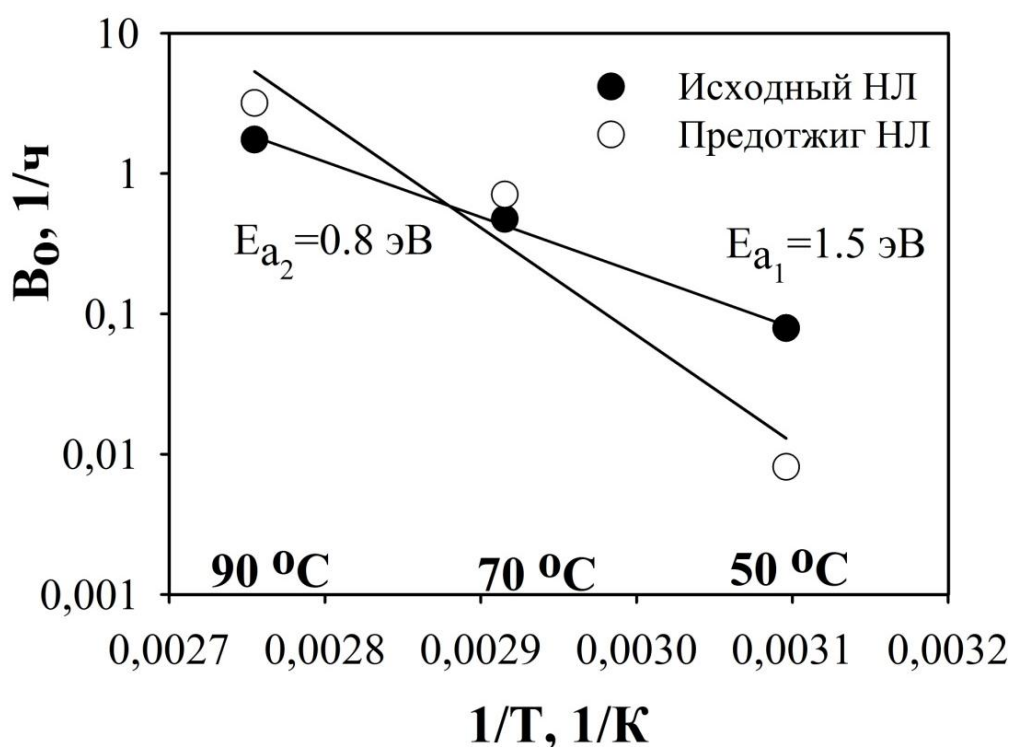


Рис. 10. Графики Аррениуса

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выявлено и исследовано особое структурное состояние пластин ниобата лития в виде четко ограниченного и обособленного приповерхностного слоя, содержащего высокую плотность дефектов, в том числе дислокаций кристаллического строения, сформированного в процессе их резки, шлифовки и полировки; именно в этом приповерхностном слое располагаются волноводные слои ИОС и именно дефектное состояние этого слоя ухудшает рабочие характеристики ИОС.

2. Установлен оптимальный режим гомогенизирующего предотжига для наиболее эффективного восстановления нарушенного приповерхностного слоя пластин ниобата лития и формирования в нем более стабильных, как по кратковременному, так и долговременному дрейфам рабочей точки ИОС на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов.

3. Предложены практические рекомендации по входному контролю качества исходных пластин НЛ, повышению стабильности, получаемых на их основе ИОС и методам контроля оптических характеристик данных интегрально-оптических схем при серийном их производстве в Пермской научно-производственной приборостроительной компании (акт внедрения №15/0-25-а от 12.10.2020 г.).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных WoS/Scopus:

1. Sosunov A.V., Ponomarev R.S., Mushinsky S.S., Minkin A.M., Volyntsev A.B. Influence of lithium niobate sublayer structure to refractive index of optical waveguides // *Ferroelectrics*. 2016. Vol. 494 (1). P. 131-137.
2. Sosunov A.V., Ponomarev R.S., Yuriev A.B., Volyntsev A.B. Effect of the structure and mechanical properties of the near-surface layer of lithium niobate single crystals on the manufacture of integrated optic circuits // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2017. Vol. 53. № 1. P. 82-87.
3. Sosunov A.V., Ponomarev R.S., Yuriev V.A., Tsiberkin K.B., Volyntsev A.B. Features of structure and mechanical properties LiNbO_3 // *Ferroelectrics*. 2017. Vol. 506 (1). P. 24-31.
4. Sosunov A., Ponomarev R., Semenova O., Petukhov I., Volyntsev A. Effect of pre-annealing of lithium niobate on the structure and optical characteristics of proton-exchanged waveguides // *Optical Materials*. 2019. Vol. 88. P. 176-180.
5. Sosunov A.V., Ponomarev R.S., Mushinsky S.S., Volyntsev A.B., Mololkin A.A. and Maléjacq V. Effect of the Structure of the Lithium Niobate Surface Layer on the Characteristics of Optical Waveguides // *Crystallography Reports*. 2020. Vol. 65. №. 5. P. 786-791.

Статьи в журналах, индексируемых в базе данных РИНЦ:

1. Сосунов А.В., Пономарев Р.С., А.А. Журавлев, Мушинский С.С. Подавление дрейфа рабочей точки интегрально-оптических схем на основе ниобата лития // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2021. № 2. С. 5-13 **(ВАК)**.
2. Сосунов А.В., Пономарев Р.С., Мушинский С.С., Волынцев А.Б. Мололкин А.А., Малежак В. Влияние структуры приповерхностного слоя ниобата лития на характеристики оптических волноводов // *Кристаллография*. 2020. Т. 65. № 5. С. 818-823 **(ВАК)**.
3. Сосунов А.В., Пономарев Р.С., Юрьев А.Б., Волынцев А.Б. Влияние структуры и механических свойств приповерхностного слоя монокристалла ниобата лития на процесс производства интегрально-оптических схем // *Автоматрия*. 2017. Т. 53. №1. С. 100-106 **(ВАК)**.
4. Семенова О. Р., Сосунов А. В., Чуракова А. И. Моделирование кривых дифракционного отражения от протонообменных слоев монокристалла ниобата лития // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020. № 4. С. 17-28 **(ВАК)**.
5. Сосунов А.В., Мушинский С.С., Пономарев Р.С., Волынцев А.Б., Галуцкий В.В., Шмаргилов С.А. Оценка применимости кристаллов ниобата лития Z-среза с заданным распределением примесей для изготовления протонообменных волноводов // *Вестник Пермского университета. Серия Физика*. Вып. 2. 2017. С. 69-73.
6. Сосунов А.В., Пономарев Р.С., Бачурихин В.П., Волынцев А.Б., Шитоев И.Д., Мушинский С.С. Структурные особенности поверхностных слоев монокристалла ниобата лития // *Вестник Пермского университета. Сер. Физика*. Вып. 1(26). 2014. С. 5-8.