

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»  
(ТУСУР)**

пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050  
тел: (382 2) 510-530  
факс: (382 2) 513-262, 526-365  
e-mail: office@tusur.ru  
http:// www.tusur.ru

ОКПО 02069326, ОГРН 1027000867068,  
ИНН 7021000043, КПП 701701001

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. проректора по научной  
работе и инновациям ФГАОУ  
ВО «Томский государственный  
университет систем управления  
и радиоэлектроники», доктор  
технических наук, доцент,  
Медовник Александр  
Владимирович

« 14 » 10 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» о диссертации **Козлова Андрея Андреевича «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Ниобат лития является одной из наиболее перспективных материальных платформ, применяемых в производстве фотонных интегральных схем (ФИС) для модуляции оптического излучения, квантовых вычислений, сенсорики и телекоммуникаций. В последнее десятилетие формируется новое направление исследований – тонкопленочный ниобат лития, который позволяет за счет высокого контраста показателя преломления производить более компактные и ФИС, а также дает возможность расширить спектр базовых волноводных элементов, которые могут изготавливаться на его основе (например, кольцевые резонаторы, AWG и др.).

Диссертационная работа Козлова А.А. посвящена изучению технологического аспекта формирования волноводов ФИС на тонкопленочном ниобате лития. Волноводные структуры на тонкопленочном ниобате лития формируются при помощи технологий плазменного травления.

В то же время, широко известна проблема переосаждения нелетучих продуктов реакции, формирующихся в ходе плазмохимической обработки ниобата лития. Переосаждение LiF на обрабатываемой поверхности приводит к таким проблемам, как повышение шероховатости поверхности (и как результат – рост оптических потерь в волноводах), невозможность достижения

угла наклона боковых стенок волноводов близкого к вертикальному, что может ухудшать оптические свойства волноводов (в частности, приводит к деградации параметров поляризационно-чувствительных элементов). Таким образом, изучение кинетики реактивного ионного травления (РИТ) как одного из наиболее перспективных методов плазменной обработки ниобата лития представляет значительный интерес, а **актуальность темы диссертации А.А. Козлова не вызывает сомнений.**

### **Научная новизна работы**

Среди всех пунктов, отмеченных диссертантом в работе как научная новизна стоит выделить следующие, наиболее значимые с прикладной точки зрения:

1. Выполнено комплексное изучение влияние параметров процесса РИТ и дефектов кристаллической структуры тонкопленочного ниобата на явление вторичной конденсации LiF, образующегося в ходе травления во фторсодержащей плазме;
2. Подтверждено экспериментально влияние протонного обмена на продолжительность индукционного периода вторичной конденсации LiF в ходе РИТ ниобата лития во фторсодержащей плазме;

### **Практическая и теоретическая значимость работы**

Диссертация развивает теоретическое представление процесса реактивного ионного травления и фокусируется на изучении вопроса пересадки нелетучих продуктов реакции в ходе процесса. Данная особенность характеризует не только процесс травления ниобата лития во фторной плазме, но и других материальных платформ, применяемых в микроэлектронике (например,  $Al_2O_3$ ). Результаты исследования расширяют и дополняют уже имеющиеся представления об особенностях пересадки продуктов реакции и позволяют на практике отрабатывать режимы плазменной обработки, при которых на поверхности не происходит пересадки продуктов реакции. Это позволяет значительно улучшить повторяемость и воспроизводимость технологических процессов травления, которые сопровождаются образованием нелетучих продуктов реакции.

### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Результаты диссертационного исследования Козлова А.А., научные положения и выводы являются обоснованными, не противоречат существующим научным представлениям физики конденсированного состояния и материаловедения. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием апробированных и широко применяемых

научным сообществом методик, повторяемостью результатов, а в ряде случаев и сопоставлением с результатами других авторов.

### **Оценка содержания и оформления диссертации**

Диссертация изложена на 144 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения, приложения и списка литературы, состоящих из 148 наименований.

**Во введении** приведено обоснование актуальности настоящей работы, приведены последние достижения в данной области исследования, формулируются цель и задачи исследования, ее теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, данные по апробации работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** дает общую информацию о применении тонкопленочного ниобата лития в интегральной оптике, а также дает подробное описание технологии изготовления подложек тонкопленочного ниобата – SmartCut. Во второй части главы рассматриваются последние достижения в области плазменного травления объемного и тонкопленочного ниобата лития, а также рассматривается возможность применения концепции топохимических реакций при рассмотрении процесса реактивного ионного травления ниобата лития.

**Во второй главе** рассматриваются используемые в диссертационной работе «классические» экспериментальные методы исследования структуры и состояния поверхности твердого тела (например, рентгеноструктурный анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и др.)

**В третьей главе** показаны оригинальные методики исследований особенностей кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития. Приводится описание методик исследования дефектов кристаллической структуры тонкопленочного ниобата лития – модифицированного метода ямок травления в парах, а также методики исследования пространственного распределения дислокаций в пленке ниобата лития методом ионного травления.

Также третья глава содержит описание одной из основных исследовательских методик данной диссертации – методики определения длительности индукционного периода вторичной конденсации LiF.

**В четвертой главе** выстраивается модельное представление процесса реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме и результаты экспериментальной проверки его положений. В рамках четвертой главы приводятся основные результаты экспериментальных исследований, в частности впервые показаны результаты изучения дефектов кристаллической структуры тонкопленочного ниобата лития (дислокационной структуры, которая формируется в ходе изготовления подложек), а также экспериментально демонстрируется влияние повышенной дефектности пленок на протекание процесса реактивного ионного травления.

Особенно стоит отметить результаты экспериментальных исследований влияния предварительного протонного обмена в ниобате лития на кинетику процесса вторичной конденсации продукта реакции LiF.

**В пятой главе** приводятся результаты практического применения результатов исследования для формирования профиля канальных волноводов на тонкопленочном ниобате лития.

**В заключении** сформулированы основные выводы, которые логически следуют из анализа представленных в работе результатов.

Стоит отметить, что текст диссертационной работы обладает внутренней связностью, а все выводы и положения выстроены логично и обоснованно. Диссертация написана ясным языком с использованием устоявшейся терминологии. Полученные результаты хорошо апробированы и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Замечания по работе**

Диссертационная работа производит положительное впечатление, однако стоит выделить некоторые замечания по работе:

1. В рамках пятого защищаемого положения идет речь о влиянии протонного обмена на кинетику реактивного ионного травления. Известно, что в ходе протонного обмена происходит накопление остаточных напряжений с последующей релаксацией структуры. В работе не показано влияние релаксации остаточных напряжений на скорость травления в плазме. Происходит ли изменение скорости травления с течением времени?

2. В работе не объяснена причина, по которой был установлен минимальный интервал детектирования индукционного периода – 30 с? Почему не пробовали 5, 10, 20 с?

3. На графиках на рис. 57-58 приводится сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой, даваемой модельным представлением. Однако, не приведены оценки уровня значимости, насколько достоверной является приведенная модель?

4. В работе на рис. 56а показаны «лунки», которые образуются на поверхности тонкопленочного ниобата лития в ходе реактивного ионного травления при образовании LiF. Однако, не описана причина, по которой данные «лунки» имеют эллиптическую форму? Что являлось причиной анизотропии?

5. При построении модельного представления кристалл ниобата лития рассматривался в модели твердых шаров, однако не указана причина, по которой не учитывался тип среза используемой подложки? (X-срез, Z-срез).

6. Существует ряд замечаний по стилю оформления и написания работы. Например, текст работы содержит много длинных по структуре сложноподчиненных предложений, что значительно усложняет восприятие

информации. Также в работе содержится некоторое число мелких опечаток, жаргонизмов и фраз, которые не соответствуют научному стилю написания работы. Так на стр. 107 автором используется фраза «концентрация водорода в кристаллической решетке НЛ имеет некий профиль, характерный...».

Указанные недостатки не умаляют общего положительного впечатления о диссертационной работе, выполненной на высоком уровне и представляющей завершённое научное исследование.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов и выводов диссертационного исследования**

Результаты диссертационного исследования могут находить применение при разработке технологии производства устройств фотоники и оптоэлектроники на тонкопленочном ниобате лития. Основное направление применений тонкопленочного ниобата лития на данный момент – это производство компактных СВЧ модуляторов с частотами от 100 ГГц (коммерчески доступные варианты, реализуемые компаниями из КНР) и выше с высокой энергоэффективностью модуляции. Подложки тонкопленочного ниобата лития характеризуются высокой стоимостью – ~ 500 т.р. за 1 подложку диаметром 4 дюйма. Таким образом, результаты работы Козлова А.А., нацеленные на повышение управляемости и повторяемости технологического процесса плазменного травления тонкопленочного ниобата лития, обладают особенной практической ценностью и позволяют снижать затраты на цикл разработки и последующего производства новых устройств.

### **Заключение**

Следует сделать вывод, что диссертационная работа А.А. Козлова выполнена на высоком научном уровне, содержит новые и практически значимые результаты. Диссертационная работа Козлова Андрея Андреевича на тему «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме» полностью соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 25.01.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 11 октября 2024 г.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором кафедры физической электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Смирновым Серафимом Всеволодовичем.

## Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Адрес организации: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Телефон: +7 (3822) 51-05-30

Почта: [office@tusur.ru](mailto:office@tusur.ru)

Официальный сайт в сети Интернет: <https://tusur.ru/ru>

Профессор кафедры физической электроники,  
профессор, д.т.н.,

Смирнов Серафим Всеволодович

[serafim.v.smirnov@tusur.ru](mailto:serafim.v.smirnov@tusur.ru)



И.о. заведующего кафедры физической электроники,  
к.т.н.,

Кулинич Иван Владимирович,

[kulinich@tusur.ru](mailto:kulinich@tusur.ru)



Подписи Смирнова С.В. и Кулинича И.В. удостоверяю:

*Ученый секретарь  
совета ТУСУРа  
Брокопчук С.В. Е. Гур*

