

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.358.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № 01

решение диссертационного совета от 14 ноября 2024 г., протокол № 3

О присуждении Козлову Андрею Андреевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме» по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния принята к защите 28 августа 2024 г., протокол заседания № 2, диссертационным советом № 24.2.358.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: 614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Диссертационный совет создан приказом Минобрнауки России №2134/нк от 27 ноября 2023 г.

Соискатель, Козлов Андрей Андреевич, 10 марта 1994 г. рождения. Окончил «Пермский государственный национальный исследовательский университет» с присвоением квалификации «магистр» по направлению подготовки 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

С 2020 по 2024 г. обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия». Присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

В настоящее время работает ведущим инженером-исследователем в НИИ радиофотоники и оптоэлектроники ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь).

Диссертация выполнена на кафедре «Нанотехнологии и микросистемная техника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель – Волынцев Анатолий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий и

микросистемной техники ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Официальные оппоненты:

Шур Владимир Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Филиппов Иван Андреевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела разработок и исследований микро- и наносистем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (г. Москва).

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) в своем положительном отзыве, утвержденном и.о. проректора по научной работе и инновациям, доктором технических наук, доцентом Медовником Александром Владимировичем, подготовленным и подписанным профессором кафедры физической электроники, профессором, д.т.н., Смирновым Серафимом Всеволодовичем и и.о. заведующего кафедрой физической электроники, к.т.н., Кулиничем Иваном Владимировичем, указала, что Диссертационная работа «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме» является законченной квалификационной работой и представляет собой актуальное исследование, направленное на развитие представлений о физико-химических особенностях протекания процесса реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме.

Основные научные положения, содержащиеся в работе и научных журналах, отражают положения, выносимые на защиту. Автореферат отражает содержание диссертации, а выводы автора являются обоснованными.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (физико-математические науки):

- п. 1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.

- п. 2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности.

- п. 4. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.

- п. 6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

- п. 7. Теоретические расчеты и экспериментальные измерения электронной зонной структуры, динамики решётки и кристаллической структуры твердых тел.

Диссертационная работа Козлова Андрея Андреевича на тему «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 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.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

- в изданиях из перечня рекомендованных ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния:

1. Козлов А.А., Салгаева У.О., Журавлев В.А., Волынцев А.Б. Исследование кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме // Вестник Пермского университета. Физика. – 2024. – №. 1. – С. 56-71.

2. Козлов А.А., Салгаева У.О., Петухов И.В., Журавлев В.А., Волынцев А.Б. Исследование процесса вторичной конденсации LiF в ходе реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме // Вестник Пермского университета. Физика. – 2024. – №. 2. – С. 33-55

- в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus:

3. M. E. Belokrylov, A. A. Kozlov, P.V. Karnaushkin, Y. A. Konstantinov, R. S. Ponomarev, and A. T. Turov Improving the Selected Stages of Integrated-Optic Chip Structure Formation and Its Interfacing with Optical Fibers // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. – 2022. – V.11. – N.3. – P. 167-174

4. A. Kozlov, D. Moskalev, U. Salgaeva, A. Bulatova, V. Krishtop, A. Volyntsev and A. Syuy Reactive Ion Etching of X-Cut $LiNbO_3$ in an ICP/TCP System for the Fabrication of an Optical Ridge Waveguide // Applied Sciences. — 2023. — V. 13. — №. 4. — P. 2097

- в других изданиях:

5. Козлов А.А., Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Криштоп В.В., Петухов И.В., Волынцев А.Б. Критические скорости реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме // Материалы Всероссийской конференции с международным участием Невская фотоника-2023 (9-13 октября 2023 г.). – Санкт-Петербург, 2023. – С.38-39

6. Козлов А.А., Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Петухов И.В., Волынцев А.Б. Физико-химические особенности реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития для формирования канальных волноводов фотонных интегральных схем // Материалы 26-й Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (24-26 октября 2023 г.), – Ульяновск, 2023. – С.221-223

7. Козлов А.А., Москалев Д.Н., Журавлев В.А., Салгаева У.О., Криштоп В.В., Волынцев А.Б. Профиль скорости ионного травления тонкопленочного ниобата лития по глубине // Материалы международной конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ (24-26 января 2024 г) – Москва, 2024. – С. 485-486

8. М. Белокрылов, А. Козлов, Ю. Константинов. Особенности плазмохимического травления ниобата лития для создания интегрально-оптических модуляторов с гребенчатыми волноводами // Первая миля. – 2021. – № 8. – С. 62-67.

9. Козлов А.А., Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Журавлев В.А., Ключков А.Ю., Криштоп В.В., Петухов И.В., Волынцев А.Б. Анизотропное реактивное ионное травление тонкопленочного ниобата лития для формирования профиля канального волновода // Фотон-экспресс. – 2023. – №. 6 (190). – С. 107-108.

Основные положения диссертационной работы и результаты исследований обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Optical reflectometry, metrology and sensing» (г. Пермь, 2020 г.); Семинаре по теоретической физике (рук., д.ф.-м.н. В.А. Демин, Пермь, 2021 г.); Международной конференция IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (Эрлагол, 2023 г.); IX Всероссийской Диановской конференции по волоконной оптике (ВКВО 2023) (г. Пермь, 2023 г.); Всероссийской научной конференции с

международным участием "Невская фотоника" (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); 26-ой Всероссийской молодёжной научной конференции «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2023 г.); XIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (НИЯУ МИФИ, г. Москва, 2024 г.).

В работах, опубликованных соискателем ученой степени, в которых изложены основные научные результаты диссертации, недостоверных сведений, заимствований материалов или отдельных результатов без указания ссылок не выявлено.

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов, все положительные. Среди них 6 отзывов с замечаниями:

1. *Косолобов Сергей Сергеевич, доцент центра инженерной физики некоммерческой организации ВО «Сколковский институт науки и технологий», д.ф.-м.н.:*

- на странице 11 автор утверждает, что рост и слияние островков LiF могут быть описаны с применением модели кристаллизации Колмогорова-Ерофеева-Аврами. На основании ссылки [7] на работу (Дубровский В.Г., Цырлин Г.Э., ФТП 2005 т. 39, №11. с 1312), в которой приводятся данные о величине поверхностной плотности зародышей при росте из газовой фазы, автор делает вывод, что дислокации вносят относительно малый вклад в процесс зародышеобразования островков LiF. Однако, в цитируемой работе [7] эта оценка приведена для модельной системы с весьма определенными параметрами и условиями (температура, скорость осаждения, энергия активации диффузии, режим конденсации и пр.), соответствующими типичному процессу молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs. Из текста автореферата остается не ясным, почему эта оценка подходит для рассматриваемой системы на основе тонкопленочного ниобата лития.

- в автореферате присутствуют опечатки и неточности формулировок, затрудняющие понимание того, что хотел сказать автор. Например, на странице 13 приводится фраза «Экстраполяция зависимости процентного содержания SF₆...приводит к сдвигу процентных содержаний SF₆...» (авторская орфография сохранена). Текст автореферата изобилует аббревиатурами и сокращениями. На странице 19 приведено сокращение «ИО» без расшифровки, что, по-видимому, является опечаткой.

- в автореферате на странице 19 утверждается, что в рамках пятой главы представлены результаты определения влияния параметров процесса наклон боковой стенки волновода, и что модификация структуры НЛ методом ПО также оказывает влияние на геометрию волновода и позволяет успешно формировать волноводы с углом наклона боковой стенки. Было бы неплохо в автореферате привести численные данные по величине этого важного для интегральной фотоники параметра.

- В конце автореферата приведен список публикаций диссертанта. Однако, нумерация ссылок на литературу и на собственные работы автора одинаковая. При чтении автореферата это затрудняет понимание, на какую именно работу ссылается автор. Было бы лучше, если бы автор изменил написание номеров для собственных работ, например, добавив символ «А» (А1, А2, А3).

2. *Сахабутдинов Айрат Жавдатович, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ», профессор, д.т.н.:*

- можно обратить внимание на то, что некоторые моменты, связанные с влиянием различных видов плазм на специфические подложки, могли бы быть рассмотрены более подробно, а вопросы долговечности модифицированных материалов остались открытыми для дальнейших исследований.

3. *Осипов Артем Арменакович, заведующий научно-исследовательской лабораторией ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», к.т.н.:*

- На рис. 1 представлено схематичное изображение установки, на которой проводились процессы реактивного ионного травления ниобата лития, на схеме отмечено, что генерация плазмы осуществлялась путем подачи мощности на индуктор через согласующее устройство от высокочастотного генератора, аналогичным образом формировалось напряжение смещения на подложкодержателе. Однако, в тексте указано, что генерация плазмы осуществляется с помощью СВЧ генераторов. Таким образом, остается неясным, плазма генерировалась за счёт ВЧ генераторов, или предварительный поджиг осуществлялся с помощью СВЧ генератора, а поддержание разряда происходило за счёт ВЧ генераторов, либо схема некорректная, и генерация плазмы осуществлялась с помощью СВЧ генераторов?

- Кроме того, автор работы указывает, что энергия ионов Ag в диапазоне рабочих мощностей не превышает 250 эВ. Остается непонятным, каким образом проводилось измерение энергии ионов?

4. *Котляр Константин Павлович, научный сотрудник Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета им. Ж.И. Алфёрова РАН, к.ф.-м.н.:*

- В работе делается выбор в пользу травления во фторсодержащей газовой смеси на основе большей безопасности, однако травление во хлорсодержащей плазме тоже важный и широко распространённый элемент технологии полупроводников. Например, травление III-N материалов - проводится в смеси газов BCl_3/Cl_2 .

5. *Бабинов Никита Андреевич, генеральный директор ООО «НИИ Инжиниринг»:*

- не рассмотрено влияние исследуемых параметров технологического процесса, таких как давление и мощность разряда на параметры потока частиц, воздействующих на образец в процессе реактивного ионного травления.

б. Пикуль Ольга Юрьевна, доцент кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», к.ф.-м.н:

- В работе приводятся экспериментальные результаты, описывающие связь между плотностью дислокаций в ниобате лития и длительностью индукционного периода вторичной конденсации LiF, при этом в работе почти не уделяется внимание вопросу влияния дислокационной структуры тонкопленочного ниобата лития на второй параметр кинетики РИТ – скорость травления. Изменяется ли скорость РИТ тонкопленочного ниобата лития в сравнение с объемным на одинаковых режимах обработки?

- Автор не дает пояснений относительно выбора температур протонного обмена, который применяется для модификации тонкой пленки ниобата лития.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается общностью тематики исследования: *ФГАОУ ВО ТУСУР* является одним из ведущих университетов России в области фундаментальных исследований и разработки технологий производства устройств ВЧ- и СВЧ-электроники; *В.Я. Шур* является признанным и известным специалистом в области изучения структуры и физических свойств ниобата лития, в том числе тонкопленочного ниобата лития; *И.А. Филиппов* – ведущий специалист в области плазмохимического и ионного травления микро- и наноструктур для устройств микроэлектроники и фотоники. Официальные оппоненты и ведущая организация имеют широкую известность, высокую научную компетентность, значительные достижения в данной области науки и способны определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан экспериментальный метод определения длительности индукционного периода вторичной конденсации нелетучего продукта реакции, образующегося в ходе реактивного ионного травления, заключающийся в непосредственном микроскопическом анализе поверхности обрабатываемого в плазме образца, дополненном анализом значения функции-невязки спектрального рефлектометра, что позволило значительно снизить систематическую погрешность определения момента окончания индукционного периода вторичной конденсации;

проведены экспериментальные исследования влияния параметров процесса реактивного ионного травления и дефектов кристаллической структуры тонкопленочного ниобата лития на протекание явления вторичной

конденсации продукта реакции LiF, образующегося в ходе реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме;

выявлена связь между степенью дефектности кристаллической решетки ниобата лития и длительностью индукционного периода вторичной конденсации нелетучего продукта реакции LiF, образующегося в ходе обработки во фторсодержащей плазме. Экспериментально установлено, что увеличение плотности дислокаций в тонкопленочном ниобате лития на три порядка, являющееся особенностью технологии его изготовления Smart Cut, по сравнению с объемным ниобатом лития приводит к значительному сокращению длительности индукционного периода вторичной конденсации LiF (с 12 мин до 2 мин на заданном режиме реактивного ионного травления).

обоснована принципиальная возможность контролируемого увеличения длительности индукционного периода вторичной конденсации нелетучего продукта реакции LiF при обработке тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме, заключающаяся в предварительной модификации кристаллической структуры приповерхностного слоя тонкой пленки ниобата лития методом протонного обмена в расплаве бензойной кислоты;

доказано, что процесс реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития в плазме газовой смеси SF_6/Ar является неклассической топохимической реакцией, которая сопровождается явлением вторичной конденсации нелетучего продукта реакции LiF из газовой фазы на обрабатываемую поверхность ниобата лития по механизму островкового зародышеобразования. Регуляция степени пересыщения газовой фазы LiF над обрабатываемой подложкой тонкопленочного ниобата лития путем изменения параметров процесса реактивного ионного травления (давление процесса, соотношение SF_6/Ar , мощности на источниках плазмы) позволяет управлять процессом вторичной конденсации вплоть до достижения условия отсутствия вторичной конденсации при скоростях реактивного ионного травления ниже критических.

Теоретическая значимость исследования определяется тем, что предложенное в работе модельное представление процесса вторичной конденсации нелетучих продуктов реакции в ходе реактивного ионного травления описывает универсальные закономерности, которые присущи целому классу материалов, которые образуют нелетучие продукты реакции в ходе плазменной обработки в заданной газовой среде.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. **Разработан** и внедряется в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» технологический процесс реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития, который имеет большое

практическое значение для производства интегрально-оптических многофункциональных схем. Настоящие схемы применяются как базовый элемент, позволяющий уменьшить габариты оптической части миниатюрного резонансного оптического гироскопа.

2. Оценены и выявлены диапазоны допустимых параметров процесса реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития в газовой смеси SF_6/Ar , позволяющие обеспечить высокую повторяемость и контролируемость физико-химического процесса с достижением поверхностей оптического качества.

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается использованием большой и репрезентативной выборки образцов и режимов; использованием калиброванных и поверенных средств измерения; согласием результатов как на количественном, так и на качественном уровне с опубликованными ранее в научных изданиях работами других авторов в тех диапазонах значений, где они перекрываются.

Личный вклад соискателя состоит в следующем: соискатель лично разработал модель описания процесса реактивного ионного травления тонкопленочного НЛ в плазме газовой смеси SF_6/Ar . Все процессы подготовки и обработки образцов методом реактивного ионного травления осуществлялись самостоятельно. В ходе выполнения работы соискатель разработал экспериментальную методику детектирования момента окончания индукционного периода вторичной конденсации LiF.

Исследование химического и элементного состава, морфологии поверхности после травления, скоростей травления оптическими методами производилось соискателем самостоятельно или при непосредственном его участии. Обработка полученных экспериментальных данных и их физическая интерпретация также были произведены самостоятельно.

В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания:

- Допущение о скорости РИТ в модельном представлении постулирует, что описание процесса адсорбции химически активных частиц на поверхности кристалла ниобата лития происходит на основе модели мономолекулярной адсорбции Ленгмюра. Однако, достаточные основания для этого не приведены.

- Автором практически не рассматривается влияние такого важного технологического параметра как температура образца во время процесса травления. Так как используемое оборудование не имеет поддува гелия под обрабатываемую подложку для эффективной термостабилизации с охлаждаемым столом-держателем подложек, влияние разогрева от плазмы

может существенно изменить кинетику протекания всех реакций травления, в том числе повлиять на изменение длительности индукционного периода ТХР.

Соискатель А.А. Козлов ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями редакционного и стилистического характера и привел собственную аргументацию в отношении высказанных замечаний.

На заседании 14 ноября 2024 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, экспериментальное и теоретическое научное обоснование физико-химических особенностей кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития в плазме газовой смеси SF_6/Ar , имеющей существенное значение для разработки промышленной технологии плазменной обработки тонкопленочного ниобата лития для производства устройств фотоники и микроэлектроники, присудить Козлову Андрею Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 9 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки), участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 9; против – нет; недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета 24.2.358.03, доктор физико-математических наук, профессор Демин Виталий Анатольевич

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.358.03, кандидат технических наук Сосунов Алексей Владимирович



14 ноября 2024 г .