

## ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по результатам предварительного рассмотрения диссертации

*Козлова Андрея Андреевича,*

на тему «**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 в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Экспертная комиссия в составе:

**Председателя комиссии**, доктора физико-математических наук, профессора Спивака Л.В., **членов комиссии** – доктора физико-математических наук, профессора Русакова С.В, доктора физико-математических наук Лебедева А.В. рассмотрела диссертацию Козлова Андрея Андреевича «Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме» и пришла к следующему заключению:

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и посвящена изучению процессов, происходящих при обработке тонкопленочного ниобата лития (НЛ) во фторсодержащей плазме. Плазменная обработка тонкопленочного НЛ является ключевой технологической операцией при изготовлении фотонных интегральных схем (ФИС). Наиболее перспективным типом такой обработки является реактивное ионное травление (РИТ), в ходе которого поверхность материала подвергается одновременному воздействию ускоренных ионов плазмы и химически активных частиц. В ходе РИТ тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме происходит образование нелетучего продукта реакции – фторида лития, неконтролируемая конденсация которого на обрабатываемой поверхности приводит к деградации характеристик оптических волноводов ФИС. Протекание процесса вторичной конденсации фторида лития характеризуется наличием индукционного периода, длительность которого может зависеть от различных факторов – таких как параметры процесса плазменной обработки, а также дефектность кристаллической структуры тонкопленочного НЛ. Последнее является следствием того, что травление тонкопленочного НЛ с образованием нелетучего продукта реакции может характеризоваться как топохимическая реакция.

Актуальность данного исследования определяется тем, что поведение тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме остается слабо изученным с физической точки зрения и на сегодняшний день остается много вопросов по управлению процессами его плазменной обработки. В работе подробно исследованы механизмы вторичной конденсации фторида лития на обрабатываемой поверхности тонкопленочного НЛ, в частности, экспериментально показана связь длительности индукционного периода и скорости РИТ, также показана возможность контроля процесса вторичной конденсации при помощи предварительной модификации тонкопленочного НЛ методом протонного обмена.

2. Диссертация обладает внутренним единством, полнотой и последовательностью изложения.

3. В диссертации приведены следующие новые результаты:
- Впервые предложено физико-математическое модельное представление процесса РИТ тонкопленочного ниобата лития в плазме газовой смеси  $SF_6/Ar$ , характеризующее взаимодействие частиц плазмы с поверхностью  $LiNbO_3$  как неклассическую топохимическую реакцию, сопровождающуюся явлением вторичной конденсации  $LiF$  из газовой фазы на поверхности  $LiNbO_3$  по механизму островкового зародышеобразования Фольмера-Вебера. В работе представлено экспериментальное подтверждение большинству положений модельного представления. Основные результаты опубликованы в работах [1-3, 7, 8]
  - В работе впервые предложено усовершенствование микроскопического метода определения длительности индукционного периода конденсации нелетучих продуктов реакции в ходе РИТ, в результате которого *ex-situ* микроскопический анализ поверхности образца был дополнен анализом значения функции-невязки спектрального рефлектометра, что позволило значительно снизить систематическую погрешность определения момента окончания индукционного периода. Результаты опубликованы в работах [1, 2].
  - В работе впервые произведено экспериментальное изучение влияния параметров процесса РИТ (давления, мощностей источников плазмы, состава газовой среды) на скорости травления тонкопленочного НЛ. Впервые был установлен факт наличия сдвига оптимального процентного содержания  $SF_6$  в бинарной газовой смеси  $SF_6/Ar$ , соответствующего максимуму скорости РИТ тонкопленочного НЛ в область более высоких процентных содержаний  $SF_6$  с ростом давления процесса при неизменном суммарном потоке. В работе дано объяснение механизма данной особенности на основе наличия динамического баланса актов адсорбции/десорбции химически активных частиц на поверхности кристалла НЛ в ходе травления. Полученные экспериментальные данные не противоречат результатам других авторов в тех областях, в которых они пересекаются. Основные результаты опубликованы в работах [1, 3-7].
  - Впервые получены экспериментальные данные о дефектности кристаллической структуры тонкопленочного НЛ, изготовленного методом управляемого скола (SmartCut). Методом ямок травления продемонстрировано увеличение плотности дислокаций на исходной поверхности тонкопленочного НЛ на три порядка по сравнению с подложками объемного НЛ. Было показано, что данный факт находится в экспериментальном согласии с результатами сравнения дифракционных кривых качания объемного и тонкопленочного НЛ. Результаты сравнения кристаллических структур дифракционными методами согласуются с результатами других авторов. Количественное сравнение плотностей дислокаций в данной работе приведено впервые. Основные результаты опубликованы в работе [2].
  - Проведено исследование влияния плотности дислокаций на длительность индукционного периода вторичной конденсации  $LiF$  в ходе РИТ. В работе впервые показано, что РИТ тонкопленочного НЛ во фторсодержащей плазме характеризуется значительно более короткими индукционными периодами вторичной конденсации, что обосновывается более высокой плотностью потенциальных центров зародышеобразования (выходов дислокаций на поверхности). Основные результаты опубликованы в работе [2].

- Произведено экспериментальное изучение влияния предварительного протонного обмена в тонкопленочном НЛ на продолжительность индукционного периода вторичной конденсации LiF. На основе модельного представления высказано предположение, а затем подтверждено экспериментально, что уменьшение концентрации Li в кристаллической решетке твердого раствора  $H_xLi_{1-x}NbO_3$  после процесса протонного обмена приводит к увеличению длительности индукционного периода вторичной конденсации LiF. Основные результаты опубликованы в работах [2, 9].

Полученные результаты применяются при освоении технологии производства ФИС на тонкопленочном НЛ в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» и позволяют обеспечивать повторяемость и контролируемость технологического процесса травления тонкопленочного НЛ как базового этапа производства ФИС.

Универсальность механизмов, на которых базируется модельное представление, предложенное в работе Козловым А.А., потенциально позволяет применять полученные знания и результаты для описания процессов РИТ целого класса материалов, которые в плазме галогенсодержащих газов образуют продукты реакции, не способные спонтанно и самопроизвольно десорбироваться с обрабатываемой поверхности. Таким образом, результаты настоящей диссертационной работы могут найти применение в полупроводниковой электронике, интегральной оптике и других областях, где существует технологическая задача плазменного травления материалов, образующих нелетучие продукты реакции в ходе обработки.

Основные результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в 16 работах, в том числе 5 работ опубликовано в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 4 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в Scopus и WoS:

1. Козлов А.А., Салгаева У.О., Журавлев В.А., Вольинцев 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., Вольинцев 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
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. – No. 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
5. D. Moskalev, A. Kozlov, U. Salgaeva, V. Krishtop and A. Volyntsev Applicability of the Effective Index Method for the Simulation of X-Cut  $LiNbO_3$  Waveguides // Applied Sciences. – 2023. — V. 13. — № 11. – P. 6374
6. D. Moskalev, A. Kozlov, U.Salgaeva, V. Krishtop, A. V. Perminov and V.

- Venediktov A Semi-Analytical Method for the S-Parameter Calculations of an NxM Multimode Interference Coupler // Photonics — MDPI, 2023. — V. 10. — № 11. — P. 1260.
7. 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.
  8. Козлов А.А., Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Журавлев В.А., Ключков А.Ю., Криштоп В.В., Петухов И.В., Вольнцев А.Б. Анизотропное реактивное ионное травление тонкопленочного ниобата лития для формирования профиля канального волновода // Фотон-экспресс. — 2023. — № 6 (190). — С. 107-108.
  9. Салгаева У.О., Мушинский С.С., Козлов А.А., Москалев Д.Н., Татаринцев А.А., Петухов И.В., Вольнцев А.Б. Исследование  $\text{H:LiNbO}_3$  волноводов методом сканирующей электронной микроскопии // Фотон-экспресс. — 2023. — № 6 (190). — С. 373-374.

Диссертация соответствует требованиям пп. 11, 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842

Приведенные в работе ссылки на работы других авторов выполнены корректно, список литературы оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ. Диссертация соответствует требованиям п. 14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842.

На основании вышеизложенного заключаем, что:

1. Рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему.
2. Тема и содержание рецензируемой диссертации **соответствуют** научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.
3. Требования к публикации основных научных результатов диссертации **соблюдены**.
4. Использование в диссертации заимствованного материала без ссылки на автора или источник заимствования, а также недостоверных сведений не выявлено.

Диссертационная работа Козлова Андрея Андреевича на тему «**Физико-химические особенности кинетики реактивного ионного травления тонкопленочного ниобата лития во фторсодержащей плазме**» рекомендована к принятию к защите в диссертационном совете 24.2.358.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Председатель комиссии:

профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники ПГНИУ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор Спивак Лев Волькович

"Я, Л.В. Спивак, даю согласие на включение своих персональных данных в

документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку".



/ Спивак Л.В.

Члены комиссии:

заведующий кафедрой прикладной математики и информатики ПГНИУ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор Русаков Сергей Владимирович

"Я, С.В. Русаков, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку".



/ Русаков С.В.

старший научный сотрудник лаборатории «Динамики дисперсных систем»  
ИМСС УрО РАН

доктор физико-математических наук,  
Лебедев Александр Владимирович

"Я, А.В. Лебедев, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку".



/ Лебедев А.В.

«09» августа 2024 года