

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию КОНЯЕВА Ивана Васильевича «Плазмохимическое травление танталата лития для формирования элементов топологии и микросборки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств

### Актуальность диссертационной работы

Плазмохимия успешно и эффективно применяется для решения научных и технических задач: синтеза новых веществ, модификации поверхности материалов, переработки отходов, и др. Одной из важнейших сфер применения плазмохимии является микроэлектроника, в которой плазмохимические процессы используются для очистки поверхности, травления, напыления покрытий.

Механизмы плазмохимического травления материалов широко исследуются во всем мире. На эффективность и результативность плазмохимического травления неорганических материалов, используемых при производстве приборов твердотельной электроники, влияют состав продуктов реакций в газовой фазе и твердом теле, их активность в отношении травления и пассивации поверхности, анизотропия плазмохимического травления и др.

Важно значение для производства устройств функциональной электроники и микросистемной техники (электронно-оптических модуляторов, пироэлектрических детекторов, пьезоэлектрических преобразователей), благодаря своим физическим свойствам, имеет танталат лития. Для создания на его основе различных приборов выполняется травление локальных участков поверхности с помощью, в основном, жидкостного или ионно-реактивного методов травления. В связи с присущими этим методам недостаткам ведется интенсивный поиск альтернативных

способов травления, которые позволили ли бы получить аналогичные результаты более экономичными или экологически безопасными способами.

В связи с вышеизложенным, диссертация Коняева И.В., которая посвящена экспериментальному исследованию кинетики и механизмов плазмохимического травления танталата лития в плазме на основе фторида серы ( $\text{SF}_6$ ), несомненно, является актуальной.

В работе решались задачи обладающие научной и практической значимостью. Проводилось исследование особенностей процесса взаимодействия  $\text{LiTaO}_3$  с фторсодержащими химически активными частицами (ХАЧ) плазмы. Определялось влияние технологических параметров на скорость плазмохимического травления  $\text{LiTaO}_3$ . Проводился анализ морфологии, элементного и фазового состава поверхности  $\text{LiTaO}_3$  после травления.

Среди наиболее значимых **новых и оригинальных результатов**, можно выделить следующие:

1. На основании комплексного исследования процесса плазмохимического травления поверхности подложек  $\text{LiTaO}_3$  установлены закономерности влияния мощности ВЧ-разряда, давления  $\text{SF}_6$  и температуры на скорость травления. Установлено влияние типа и концентрации газовых примесей  $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ , вводимых в  $\text{SF}_6$ , на скорость плазмохимического травления  $\text{LiTaO}_3$ . Показано, что зависимости скорости травления танталата лития от исследуемых параметров имеют нелинейный характер, что обусловлено многостадийностью процесса.

2. Показано, что травление  $\text{LiTaO}_3$  в низкотемпературной газоразрядной плазме на основе газа  $\text{SF}_6$  является топохимической реакцией, проходящей с образованием пористого  $\text{LiF}$ .

3. Установлено, что процесс плазмохимического травления танталата лития в плазме  $\text{SF}_6$  протекает с индукционным периодом ( $\sim 500$  с) и при температуре подложки более 450 К.

4. Методом АСМ установлено, что увеличение скорости плазмохимического травления при возрастании подводимой мощности не ухудшает шероховатость поверхности вследствие диффузионного ограничения скорости травления  $\text{LiTaO}_3$  через образующийся пористый слой  $\text{LiF}$ .

Представленные в диссертации результаты имеют не только научную, но и важную **практическую значимость**. В результате проведенных экспериментальных работ автор отработал и применил на практике оптимальный режим плазмохимического травления танталата лития в плазме на основе  $\text{SF}_6$  со следующими технологическими параметрами: подводимая мощность - 250 Вт, давления  $\text{SF}_6$  в реакционной камере - 170 Па, температура подложки - 560 К. Применение плазмохимического травления позволило сформировать микроструктуры на подложках танталата лития и получить прототипы канальных титановых волноводов. Скорости полученные с применением данного режима позволяют применять процесс травления для серийного производства приборов на подложках из  $\text{LiTaO}_3$ .

**Достоверность и надежность полученных результатов** обеспечивается всесторонним анализом выполненных ранее исследований по смежным направлениям с темой диссертации, применением в исследованиях апробированных методов диагностики и современного поверенного оборудования, воспроизводимостью результатов исследования.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием большого количества экспериментальных данных, применением современных методов исследования свойств веществ и сопоставлением полученных результатов с устоявшимися теоретическими положениями.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях: по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 1 статью в журнале, индексируемом реферативной базой данных Scopus, 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 7 работ в прочих журналах и

сборниках трудов конференций. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и дает полное представление о ней.

Диссертация Коняева И.В. соответствует паспорту специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертация не лишена некоторых недостатков, в этой связи можно отметить следующие **замечания**:

1. Из обзора плазмохимического травления в первой главе (п. 1.4) не понятно какая форма разряда обсуждается. По тексту встречаются упоминания ВЧ, СВЧ и тлеющего разряда. Автором выбран ВЧ разряд, что обозначено в п. 2.1 при описании характеристик оборудования. Было бы весьма полезно провести сравнение этих форм разряда. Указать преимущества и недостатки.

2. Автор недооценивает вклад ионного потока в процесс плазмохимического травления. Так, на стр. 60 при обсуждении влияния добавок аргона на скорость плазмохимического травления он утверждает, что «При используемом рабочем давлении в вакуумной системе  $P=210$  Па ( $P \gg 10$  Па) энергия образованных ионов мала вследствие малой длины свободного пробега. Таким образом, вклад ионной составляющей в процесс травления возможен лишь через активацию поверхности, так как физическое распыление реализовать при данных условиях невозможно». И далее на той же странице: «Появление твердого продукта реакции (LiF) в процессе травления исключает активное влияние ионов на обрабатываемую поверхность. Таким образом, механизмом, приводящим к активации процесса травления, является повышение скорости генерации химически активных частиц за счет увеличения скорости диссоциации основного газа  $SF_6$  электронным ударом». На стр. 95 утверждается «Плазмохимическое травление танталата лития в гексафториде серы, ввиду отсутствия ярко

выраженной ионной составляющей, исходя из природы газа, является изотропным процессом».

Данные утверждения в целом верны. Однако, следует отметить, что энергия ионов при взаимодействии плазмы ВЧ разряда с поверхностью определяется не только их длиной свободного пробега, но и толщиной нескомпенсированного слоя положительного заряда (СПЗ), который всегда образуется в ВЧ разрядах возле электродов, и от того, является ли он столкновительным или бесстолкновительным (см. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высоочастотный емкостный разряд. Физика. Техника эксперимента. Приложения. - М.: Изд-во МФТИ; Наука - Физматлит, 1995 г.).

Кроме того, необходимо принимать во внимание, что нейтральные химически активные частицы плазмы поступают на поверхность образца в результате диффузии, а ионы дрейфуют в электрическом поле СПЗ. При этом они приобретают энергию, определяемую падением потенциала в СПЗ, которое может достигать нескольких сотен эВ. При такой энергии ионы, во-первых, способствуют распылению поверхностных атомов, диссоциации образующегося на поверхности образца фторида лития, а во-вторых, проникаю в поверхностный слой металлов и сплавов на глубину до 100 нм, и в дальнейшем могут диффундировать на глубину до нескольких мкм (см. например Абдулин И.Ш. и др. Модификация нанослоев в высоочастотной плазме пониженного давления. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007). Оценкой данных эффектов зачастую пренебрегают, в частности, потому что исследование является самостоятельной задачей, которая выходит за рамки диссертации. Можно лишь высказать пожелание автору обратить внимание на них в дальнейших исследованиях.

3. Имеют место терминологические небрежности. Так, на стр. 48 автор описывает «график зависимости скорости травления от времени протекания процесса, который имеет вид нисходящей кривой с наличием максимума» (рис. 3.1). На самом деле этот график демонстрирует немонотонную зависимость с максимумом в определенной точке.

4. На дифрактограмме в главе 4 представлены пики отражающие фазовый состав на поверхности  $\text{LiTaO}_3$  после процесса плазмохимического травления, однако отсутствует подпись ориентации пиков (рис. 4.1). Данные обобщены и представлены ниже в таблице 4.1. Для наглядности стоило нанести обозначения аналогично представленной в автореферате.

Однако данные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации.

На основе изложенного считаю, что диссертация Коняева Ивана Васильевича «Плазмохимическое травление танталата лития для формирования элементов топологии и микросборки» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, по своей актуальности, новизне и практической значимости, не смотря на некоторые недостатки, соответствует критериям установленным Положением о присуждении ученых степеней, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой техническая физики  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский университет  
им. А.Н. Туполева - КАИ»

Гайсин Алмаз Фивзатович

04 апреля 2023 г.

Адрес: 420111, Россия,

г. Казань, ул. К. Маркса 10

тел.: +7 927 418 75 55

e-mail: almaz87@mail.ru

Подпись Гайсин Алмаз Фивзатович  
заверяю. Ученый секретарь  
совета университета

Гайсин Алмаз Фивзатович