

На правах рукописи



Коняев Иван Васильевич

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ ДЛЯ
ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПОЛОГИИ И МИКРОСБОРКИ**

Специальность

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: **Бормонтов Евгений Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Желтухин Виктор Семенович**, доктор
физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры плазмохимических и
нанотехнологий высокомолекулярных
материалов Казанского национального
исследовательского технологического
университета

Пронин Игорь Александрович, доктор
технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Нано- и микроэлектроника»
ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южный
федеральный университет»

Защита диссертации состоится «26» апреля 2023 г. в 16⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <http://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «21» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стогней Олег Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При разработке планарной технологии производства первыми были освоены методы жидкостного травления для формирования элементов полупроводниковых приборов. С развитием технологии были разработаны методы плазменной обработки. Долгое время доминировала технология ионно-плазменного травления, использующая физическое распыление твердых тел ионами инертных газов. Плазмохимическое травление основано на химическом взаимодействии частиц плазмы, а ионная составляющая выполняет вспомогательную функцию активации протекания химических процессов. Сравнение литературных данных по кинетике ионно-плазменного травления с экспериментальными данными плазмохимического травления показывает повышение эффективности применения процесса ПХТ, приводящего к росту скорости травления более чем в 2 раза. Производительность процесса играет важную роль при массовом изготовлении современных устройств функциональной электроники и микросистемной техники. В данном контексте исследование механизмов влияния технологических параметров на кинетику плазмохимического травления (ПХТ) является актуальной задачей для разработки оптимального режима формирования микроструктур на поверхности танталата лития (LiTaO_3). Понимание физико-химических закономерностей и механизмов технологического процесса является основной задачей на этапе подготовки к сборочному процессу конкретных приборов.

Выбор танталата лития в качестве объекта исследования обусловлен широкими возможностями его применения при производстве ряда приборов в различных областях твердотельной электроники, микросистемной техники, оптоэлектроники, таких как пироэлектрические детекторы, электрооптические модуляторы, пьезоэлектрические преобразователи, оптические каналные волноводы, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Для промышленного применения важно всесторонне исследовать закономерности и особенности применения плазмохимического травления для формирования элементов топологии на подложках танталата лития. Во-первых, необходимо иметь детальное представление о скорости плазмохимического травления, получаемое на основании данных о влиянии технологических параметров обработки (подводимая мощность, давление, газовые добавки, температура в реакционно-разрядной камере). Во-вторых, важными характеристиками являются шероховатость получаемой поверхности, наличие загрязнений и степень радиационных повреждений и примесных дефектов, вносимых плазменной обработкой. Качество поверхности, получаемой после травления, влияет на равномерность нанесения металлических и диэлектрических покрытий, адгезионные свойства контактирующих материалов и качество проводимых сборочных операций. Выявление закономерностей определяет актуальность проведения комплексных исследований кинетики

плазмохимического травления подложек танталата лития, создания элементов топологии, напыления металлических слоев и микросборки для достижения необходимого качества технологических операций.

Целью работы является установление закономерностей влияния температуры, мощности, давления и газовых добавок на скорость плазмохимического травления LiTaO_3 в плазме SF_6 и отработка режимов сборочного производства на подложках танталата лития с вытравленной топологией микроструктур. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование особенностей процесса взаимодействия LiTaO_3 с фторсодержащими химически активными частицами (ХАЧ) плазмы.
2. Определение влияния физических и химических факторов на скорость плазмохимического травления LiTaO_3 .
3. Анализ морфологии, элементного и фазового состава поверхности LiTaO_3 после травления.
4. Разработка технологических подходов повышения эффективности процесса плазмохимического травления.
5. Отработка режимов микросборки на поверхности LiTaO_3 .

Научная новизна работы

1. На основании комплексного исследования процесса плазмохимического травления поверхности подложек LiTaO_3 установлены закономерности влияния мощности ВЧ-разряда, давления SF_6 и температуры на скорость травления. Установлено влияние типа и концентрации газовых добавок Ar , N_2 и N_2O , вводимых в SF_6 , на скорость плазмохимического травления LiTaO_3 . Показано, что зависимости скорости травления танталата лития от исследуемых параметров имеют нелинейный характер, что обусловлено многостадийностью процесса.

2. Показано, что травление LiTaO_3 в низкотемпературной газоразрядной плазме на основе газа SF_6 является топохимической реакцией, проходящей с образованием пористого LiF .

3. Установлено, что процесс плазмохимического травления танталата лития в плазме SF_6 протекает с индукционным периодом (~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 LiTaO_3 через образующийся пористый слой LiF .

Практическая значимость работы

1. Определён оптимальный режим плазмохимического травления танталата лития при подводимой мощности 250 Вт, давлении SF_6 в реакционной камере 170 Па и температуре подложки 560 К, позволяющий использовать данный процесс для средне- и широкомасштабного производства приборов на подложках из LiTaO_3 .

2. Получены прототипы различных микроструктур и канальных титановых волноводов с применением методов фотолитографии и плазмохимического травления LiTaO_3 .

3. Экспериментально разработан способ ультразвуковой микросварки Al контактных площадок диаметром 50 мкм с применением процесса плазмохимического травления поверхности LiTaO_3 в SF_6 , позволяющий обеспечить прочность сварного соединения 23-25 гс с перспективой использования в серийном производстве приборов на подложках из LiTaO_3 .

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что зависимости скорости плазмохимического травления поверхности LiTaO_3 от технологических параметров (подводимая к ВЧ-разряду мощность, температура подложки, давление SF_6) имеют нелинейный вид. В интервале мощности от 100 до 250 Вт и температуры от 500 до 560 К наблюдается рост скорости ПХТ танталата лития; повышение рабочего давления в диапазоне от 170 Па до 290 Па снижает скорость процесса травления.

2. ПХТ LiTaO_3 в низкотемпературной газоразрядной плазме на основе газа SF_6 является топохимическим процессом, протекающим с индукционным периодом. В результате химических реакции в процессе травления образуется пористый твердый слой фторида лития, ограничивающий суммарную скорость процесса травления диффузионным торможением.

3. Показано, что плазмохимическое травление в атмосфере SF_6 обеспечивает шероховатость поверхности подложек из LiTaO_3 не более 50 нм при глубине травления 5 мкм, что позволяет использовать данный процесс для производства приборов микросистемной техники и функциональной электроники.

4. Определен оптимальный режим плазмохимического травления во фторсодержащей плазме поверхности подложек из LiTaO_3 (подводимая мощность 250 Вт, давление SF_6 170 Па и температура подложки 560 К), позволяющий получать микроструктуры, канальные титановые волноводы и алюминиевые контактные площадки для ультразвуковой микросварки с прочностью сварного соединения 23-25 гс.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного производственного и аттестованного измерительного оборудования, воспроизводимостью результатов и непротиворечивостью известным физическо-химическим закономерностям.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях, в том числе: XIV, XV и XVII Российских ежегодных конференциях научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2017, 2018 и 2020); Международной конференции «Физика.СПб/2021» (Санкт-Петербург, 2021).

Личный вклад автора состоит в постановке и организации экспериментов, обработке и анализе полученных результатов. Постановка цели и задач,

согласование и корректировка исследований, составление выводов выполнялись автором совместно с научным руководителем. Основные результаты исследований получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Обсуждение полученных результатов и подготовка публикаций проводилась совместно с научным руководителем.

Публикации по теме диссертации

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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 41 рисунок, 5 таблиц и список литературы, который содержит 117 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов, количестве публикаций и структуре работы.

В первой главе рассмотрены физико-химические свойства LiTaO_3 . На основе литературных данных представлен обзор современного состояния исследований по травлению танталата лития в плазме, рассмотрены конструкции приборов на подложках LiTaO_3 , проанализирована специфика процесса плазмохимического травления, проведена оценка преимуществ и недостатков метода ПХТ.

Во второй главе описаны методики исследований и используемое технологическое и измерительное оборудование. Эксперименты по плазменной обработке проводились на установке Corial D 250. Для определения скорости травления применялся гравиметрический метод. Взвешивание образцов до и после процесса травления проводилось с точностью 10^{-4} г. Магнетронное напыление металлов выполнялось на установке Оратория-5. Для ультразвуковой разварки контактных площадок применялась полуавтоматическая установка Delvotec 5630. Эксперименты по определению фазового состава продуктов травления проводились на дифрактометре ДРОН 4-07. Исследование морфологии поверхности до и после плазмохимического травления проводилось методом АСМ на SOLVER P47 Pro и методом РЭМ на микроскопе JEOL JSM-6610A.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследований скорости процесса плазмохимического травления танталата лития в SF_6 и в смесях на его основе. Проанализировано влияние основных параметров плазменной системы: мощности разряда, давления в камере, температуры.

В процессе плазмохимического травления танталата лития в плазме на основе SF_6 происходит образование маскирующей пленки из твердых продуктов реакции. Установлено, что график зависимости скорости травления от времени имеет вид, характерный для реакции взаимодействия газоразрядной плазмы с поверхностью твердого тела, в результате которой образуется хотя бы один твердый продукт. На начальном этапе ПХТ скорость травления возрастает, проходит через максимум и затем плавно снижается. При этом процесс плазмохимического травления протекает на границе раздела твердых фаз (LiF-LiTaO_3). Таким образом, можно сделать вывод о том, что травление LiTaO_3 во фторсодержащей плазме является топохимической реакцией.

Подводимая мощность выступает в качестве основного параметра, влияющего на энергетические характеристики плазмы (температура электронов и ионов, концентрация частиц в плазме). На основании экспериментальных данных можно сделать вывод о нелинейном росте скорости травления с увеличением подводимой мощности, который объясняется увеличением энергии ионного потока, стимулирующего диссоциацию адсорбированных на поверхности фторсодержащих частиц с образованием радикалов фтора (рис. 1). Следует также учитывать, что процесс травления проходил в не термостатических условиях, ввиду чего происходил косвенный нагрев образцов с ростом мощности.

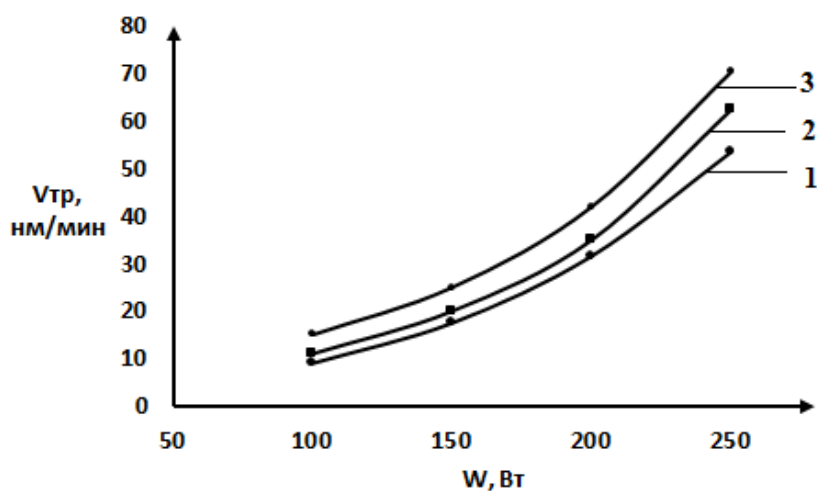


Рис. 1. Влияние подводимой мощности на скорость травления LiTaO_3 :
1 – $P=210$ Па, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин; 2 – $P=190$ Па, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин;
3 – $P=170$ Па, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин

Еще одним важным технологическим параметром, существенно влияющим на скорости физико-химических процессов в плазме, является давление газа в реакционно-разрядной камере.

При росте давления происходит увеличение концентрации частиц в плазме и на первый план начинают выступать процессы потерь энергии электронами вследствие их соударений с атомами или молекулами плазмообразующего газа за счет уменьшения длины свободного пробега (увеличения частоты столкновений). Потери энергии за счет соударений не позволяют электронам приобрести энергию необходимую для диссоциации и ионизации плазмообразующего газа, что приводит к снижению концентрации ХАЧ.

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные влияния давления на скорость плазмохимического травления танталата лития в плазме газа SF_6 . Используемая геометрии реактора и значения мощности не позволяют добиться рабочих давлений ниже 170 Па из-за неустойчивости плазмы. В исследуемом диапазоне от 170 до 290 Па наблюдается нисходящая кривая, демонстрирующая снижение скорости травления вследствие уменьшения концентрации ХАЧ.

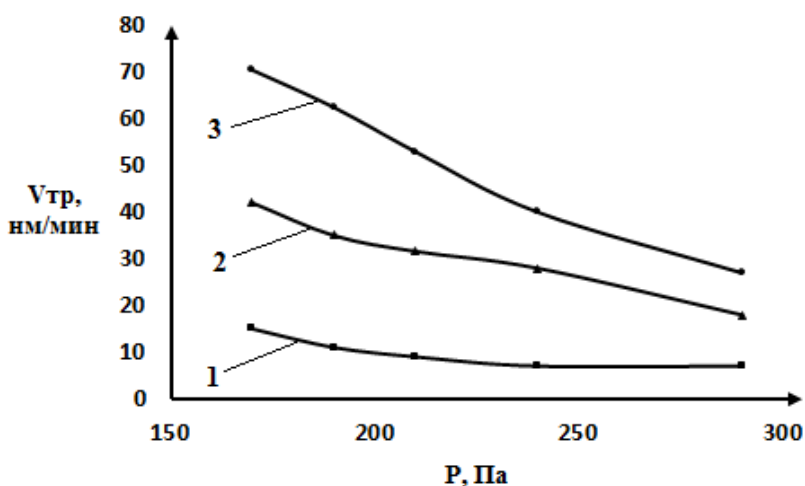


Рис. 2. Влияние давления в РПК на скорость травления LiTaO_3 в плазме SF_6 :
 1 – $W=100$ Вт, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин; 2 – $W=200$ Вт, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин;
 3 – $W=250$ Вт, $T=280^\circ\text{C}$, $t=20$ мин

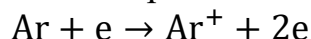
Добавки химически активных или инертных газов в основной рабочий газ приводят к изменению в плазме распределения электронов по энергиям. Это влияет на процессы диссоциации молекул рабочего газа, так как скорость диссоциации является функцией энергии электронов.

На рисунке 3 приведено сопоставление скоростей травления танталата лития в зависимости от объемных долей аргона, азота и закиси азота в смеси с рабочим газом SF_6 .

Анализируя полученные результаты, можно сказать о наиболее существенном влиянии аргона. Наблюдается наличие максимума при его объемной доле 40 %, с соответствующим увеличением скорости травления на 30%.

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 ХАЧ за счет увеличения скорости диссоциации основного газа SF_6 электронным ударом. Основным механизмом генерации электронов является ионизация атомов аргона с потенциалом ионизации 15,76 эВ:



В качестве дополнительного канала генерации электронов выступает ионизация при передаче энергии метастабильными атомами аргона:



где Ar^* - возбужденный атом аргона, B – атом или молекула с потенциалом ионизации ниже, чем энергия возбужденного состояния атома аргона.

Добавка азота также приводит к увеличению скорости травления на 20% при объемной доле 30%. Механизм, приводящий к подобной зависимости аналогичен аргоновой добавке.

При добавлении N_2O наблюдалось лишь устойчивое снижение скорости травления $LiTaO_3$ с увеличением объемной доли закиси азота. Это объясняется тем, что помимо положительных и отрицательных ионов среди продуктов реакций образуются добавки, такие как NO , снижающие эффективность газовой смеси.

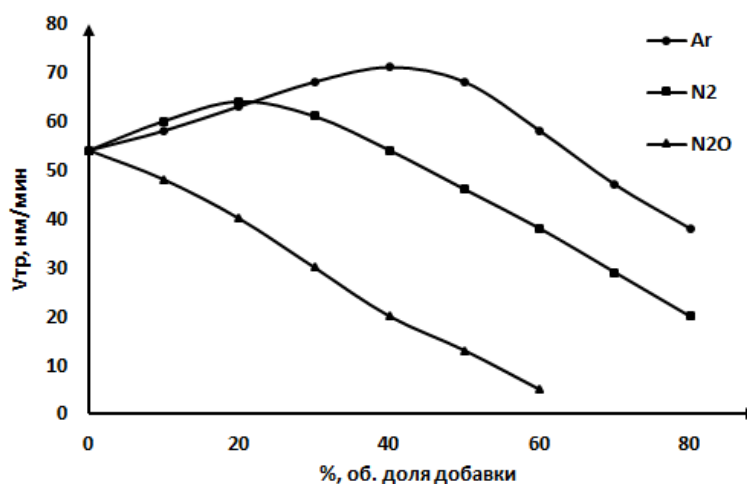


Рис. 3. Влияние газовых добавок на скорость травления $LiTaO_3$ в плазме SF_6 :
 $T=280^\circ C$, $P=210$ Па, $W=250$ Вт

На рисунках 4 и 5 представлены результаты исследования влияния температуры на скорость плазмохимического травления танталата лития. Из характера зависимости скорости травления от температуры видно, что реакция начинается после достижения пороговой температуры ($T_{пор.}$). Для данного процесса травления она находится в диапазоне 450÷500 К. На основании полученных данных можно судить о том, что основной проблемой проведения процессов плазмохимического травления $LiTaO_3$ в плазме SF_6 является низкая летучесть продуктов реакции, оказывающая влияние на величину пороговой температуры. Фторид лития имеет температуру кипения 1949 К (при нормальных условиях) и формирует на поверхности маскирующий слой, снижающий скорость травления.

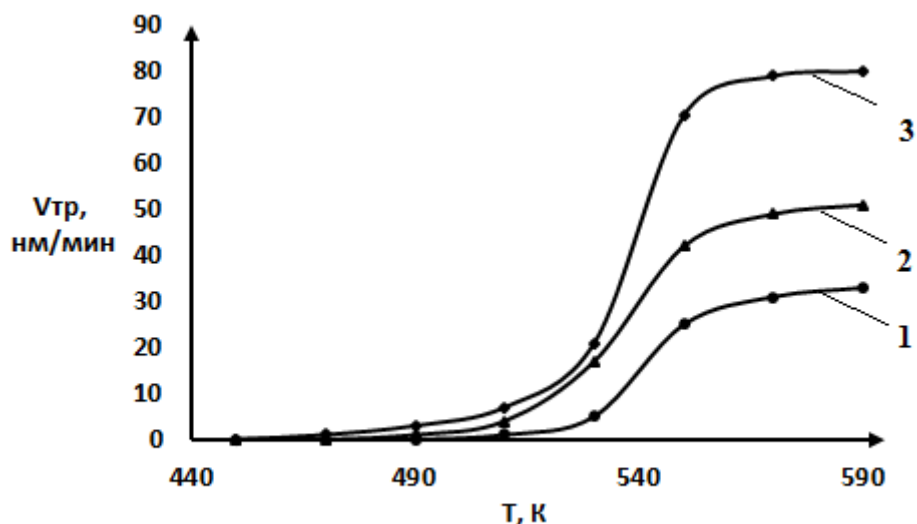


Рис. 4. Влияние температуры на скорость травления LiTaO_3 в плазме SF_6 :
 1 – $W=100$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин; 2 – $W=200$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин;
 3 – $W=250$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин

Скорость травления растет экспоненциально в интервале температур от 500 до 560 К. На процесс травления оказывает влияние изменение балансного соотношения между скоростями адсорбции химических реагентов и десорбции продуктов реакции травления. Также стоит учитывать увеличение скорости химической реакции с ростом температуры. Последующее повышение температуры ($T > 560$ К) приводит к отклонению кинетики травления от экспоненциального закона, что приводит к смене области протекания процесса с кинетической на диффузионную. При этом лимитирующими стадиями становятся не адсорбционно-десорбционные процессы и скорость химических реакций, а диффузионные перемещения химически активных частиц.

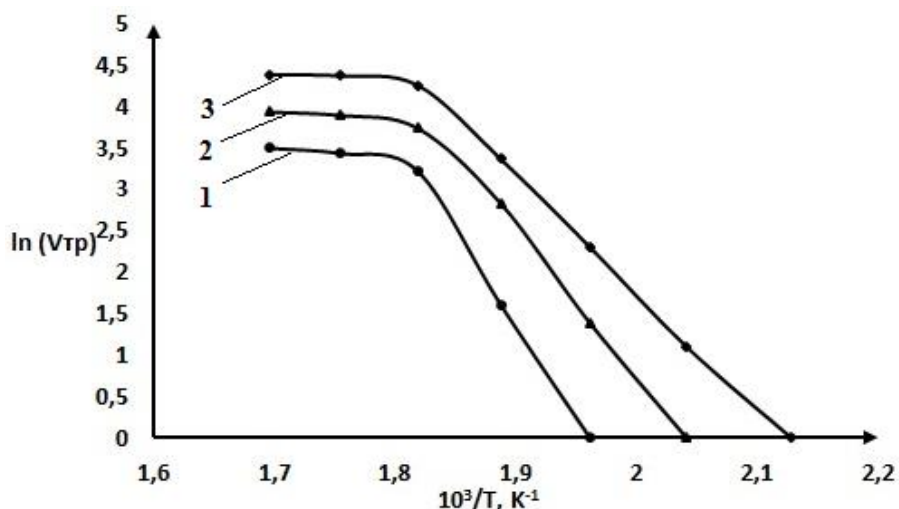


Рис. 5. Зависимость скорости травления LiTaO_3 от температуры в полулогарифмических координатах: 1 – $W=100$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин; 2 – $W=200$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин; 3 – $W=250$ Вт, $P=170$ Па, $t=20$ мин

Энергия активации относится к фундаментальным характеристикам химического процесса. На рис. 5 представлены температурные зависимости скорости травления в полулогарифмических координатах, по которым, исходя из уравнения Аррениуса, по формуле:

$$E_a = R \frac{\ln V_2 - \ln V_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}},$$

где $R=8,314459$ Дж/(моль·К), рассчитана эффективная энергия активации реакции. В диапазоне температур $500 \div 560$ К она составила порядка 100 кДж/моль для использованных в эксперименте режимов обработки.

В четвертой главе приводится анализ экспериментальных результатов, посвященных исследованию элементного и фазового состава продуктов реакции с объяснением механизма их образования и построением обобщенной физико-химической модели процесса плазмохимического травления танталата лития. Методика идентификации элементного и фазового состава продуктов травления, а также анализ морфологии поверхности до и после процесса дают возможность количественного и качественного описания, а в совокупности с данными о кинетических особенностях травления танталата лития формируют полноценную картину этого процесса.

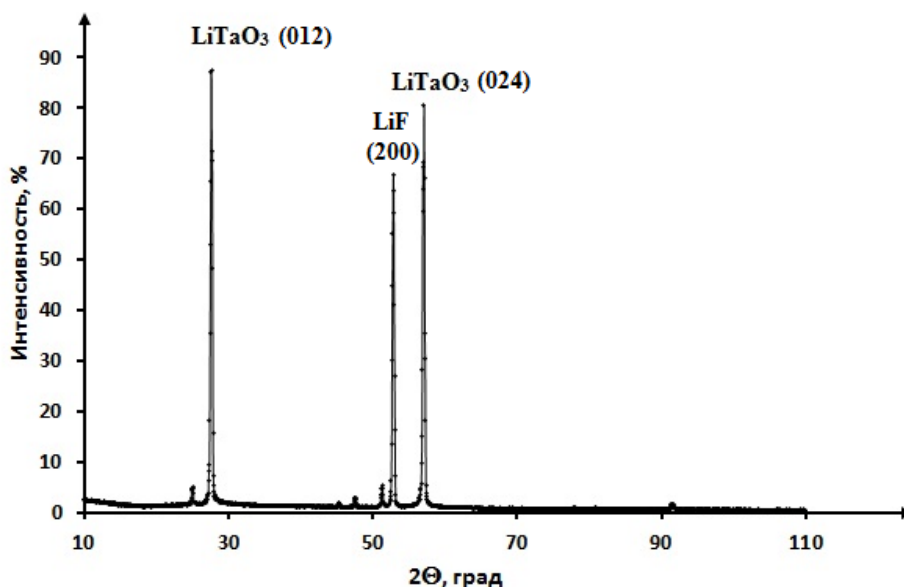


Рис. 6. Дифрактограмма, отражающая фазовый состав на поверхности LiTaO_3 после процесса плазмохимического травления

В экспериментах по исследованию кинетики плазмохимического травления танталата лития выявлено образование твердого продукта реакции. На рисунке 6 представлена дифрактограмма, отражающая фазовый состав поверхности после проведения процесса плазмохимического травления. Рентгеноструктурные исследования проводились на установке ДРОН 4-07 в монохроматизированном $\text{CoK}\alpha$ -излучении. Исследование проводилось при напряжении на рентгеновской

трубке 29 кВ и анодном токе 26 мА. Анализ интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводился в непрерывном режиме сканирования со скоростью вращения детектора 1 град/мин. Шаг сканирования составлял 0,05°. Для определения фазового состава использовалась стандартная картотека The International Centre for diffraction Data (ICDD), PDF release 2012. Сравнение и анализ экспериментальных данных с данными из картотеки ICDD показали наличие кристаллической фазы фторида лития с ориентацией (200) и незначительные пики иных фаз, состав которых идентифицировать не удалось.

Анализ морфологии поверхности после процесса травления на глубину 1 мкм, 2 мкм и 5 мкм, проведенный на атомно-силовом микроскопе SOLVER P47, показал, что показатель R_a (среднее арифметическое отклонение профиля) возрастает относительно неперотравленных полированных образцов до значений 10,8 нм, 20,9 нм и 48,7 нм, соответственно. Данные результаты можно считать приемлемыми для технологии производства приборов микросистемной техники и функциональной электроники. На рисунке 7 (а) представлено АСМ-изображение поверхности полированного образца после травления на глубину 5 мкм и профиль поверхности 7(б).

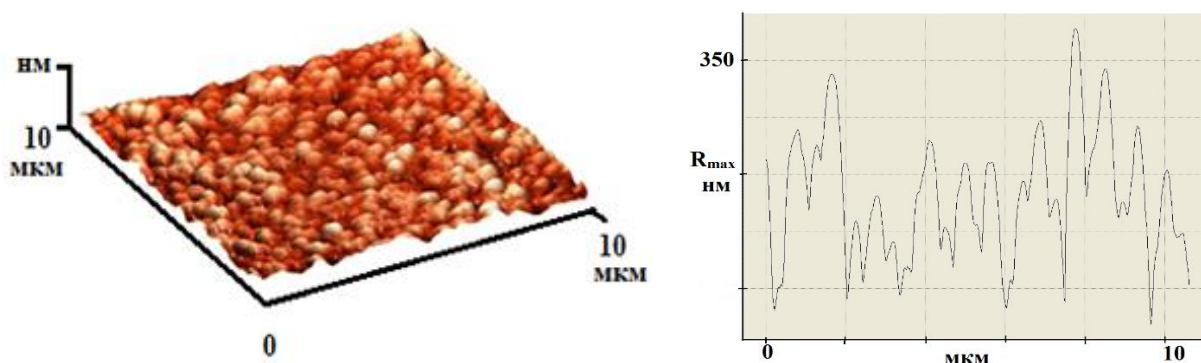


Рис. 7. (а) АСМ-изображение поверхности LiTaO_3 после травления на глубину 5 мкм; (б) профиль поверхности LiTaO_3 после травления

Увеличение подводимой мощности приводит к росту энергии ионов, бомбардирующих поверхность в процессе травления. Для анализа качества поверхности и наличия привносимых дефектов проводилось сканирование на АСМ после травления на глубину 2 мкм при мощностях разряда 100 Вт, 200 Вт и 250 Вт. Сводные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры шероховатости LiTaO_3 после ПХТ при мощности 100Вт, 200 Вт и 250 Вт

W, Вт	R_{\max} , нм	R_z , нм	R_g , нм	R_a , нм
100	214	110	23,3	20,4
200	215	116	24,3	21,2
250	212	106	23,7	20,9

В таблице приведены параметры: W – мощность разряда; R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам; R_g – среднеквадратичное отклонение шероховатости, R_a – среднее арифметическое отклонение профиля.

На основании анализа данных таблицы можно сделать вывод о том, что увеличение подводимой мощности не ухудшает качество поверхности после травления LiTaO_3 , так как происходит защитное маскирование пленкой LiF .

В пятой главе представлены результаты практического применения процесса плазмохимического травления при формировании элементов топологии на поверхности LiTaO_3 .

Для формирования маскирующего покрытия применялась технология прямой фотолитографии с последующим жидкостным травлением. В качестве маски в экспериментах использовался алюминий толщиной 0,5 мкм, так как хорошо известна устойчивость данного металла при травлении во фторсодержащей плазме.

Плазмохимическое травление танталата лития в SF_6 вследствие отсутствия ярко выраженной ионной составляющей, исходя из природы газа, является изотропным процессом. Формирование профиля травления глубиной в несколько микрон характеризуется существенным подтравом за счет наличия горизонтальной составляющей скорости травления. Таким образом, приемлемых результатов удалось достичь при глубине травления до 2 мкм. Как показали эксперименты, в исследуемых режимах работы с использованием алюминиевой маски селективность к танталату лития составляет более 20:1.

Технология с предварительным вытравливанием профиля в подложке с последующим заполнением металлом используется при формировании канальных волноводов. Основными преимуществами канальных волноводов, изготовленных по такой технологии, являются низкие потери за счет возможности более эффективного согласования показателей преломления волновода и подложки.

На рисунке 8 представлена схема технологического процесса формирования титановых волноводов в подложке LiTaO_3 . Структура волновода была получена с применением плазмохимического травления танталата лития через предварительно нанесенную методом магнетронного распыления алюминиевую маску. Далее на центрифуге наносится слой позитивного фоторезиста марки Microposit S1813 G2 SP15 и вскрываются области для жидкостного травления Al . Фоторезистивная маска удаляется в кислородной плазме. На установке Sorial D250 в плазме SF_6 вытравливаются полости в танталате лития. Затем маска Al и твердый продукт реакции (LiF) удаляются в ортофосфорной кислоте с последующей отмывкой в деионизованной воде. Напыление Ti проводится в инертной среде Ar при давлении 0,5 Па. Для создания заполненных металлом полостей необходимо сделать повторную фотолитографию с использованием негативного фоторезиста марки ФН-11С. После травления Ti вне каналов, негативный фоторезист снимается в форсане, затем пластина отмывается в изопропиловом спирте и деионизованной воде. Для улучшения адгезионных

свойств на границе металл/подложка проводится отжиг в инертной среде N_2 при $T=400\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

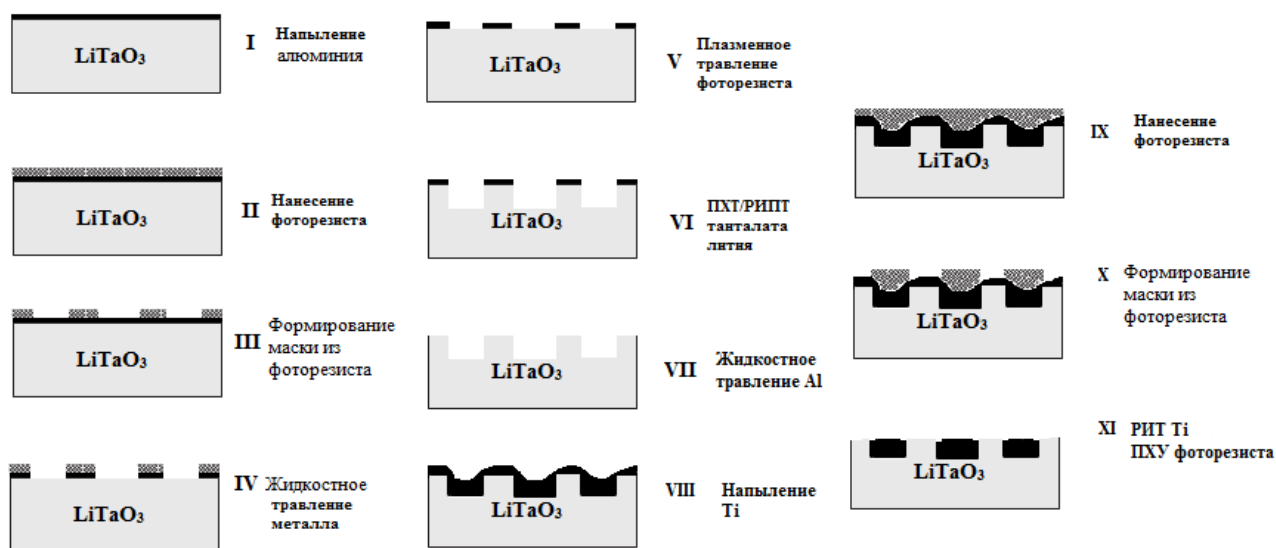


Рис. 8. Схема формирования канального оптического волновода на подложках $LiTaO_3$

На рисунке 9 (а, б) представлены профили полученных структур Ti волновода. Как показал анализ на растровом электронном микроскопе, титан, нанесенный методом магнетронного напыления, имеет хорошую адгезию к танталату лития. Однако, как видно на рисунке 9 (а), жидкостное травление металла через маску из негативного фоторезиста приводит к «затраву» по краям элементов. Это связано со сложностью совмещения маски из фоторезиста и элементов вытравленного профиля в $LiTaO_3$ и изотропностью травления.

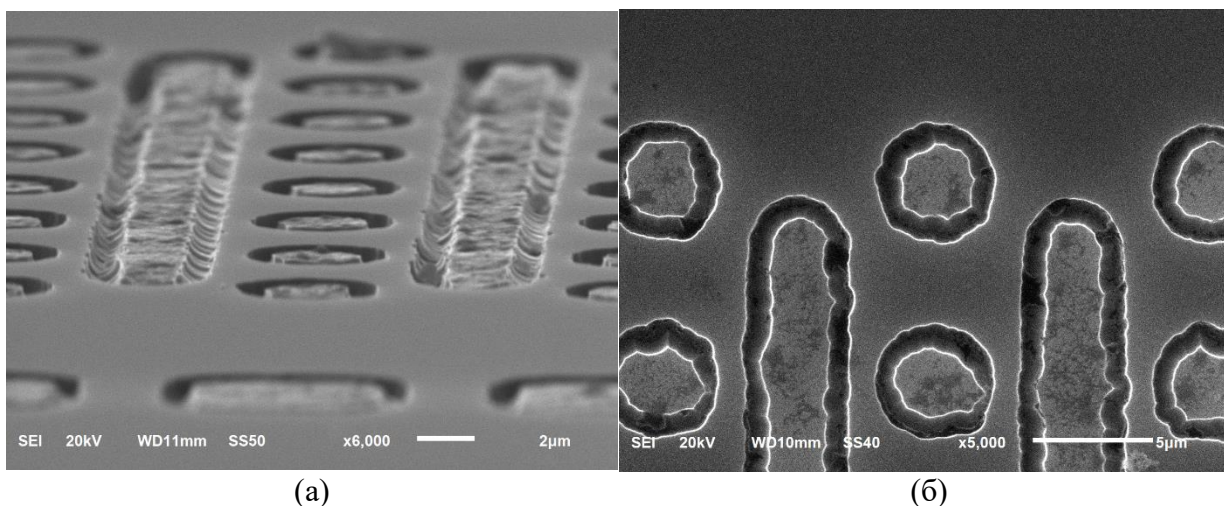


Рис. 9. РЭМ-изображение тестовых структур с Ti волноводами: а) профиль под углом б) вид сверху

Контактные площадки (КП) получали методом тонкопленочной технологии магнетронного нанесения алюминия. Формирование контактных площадок для

разварки выводов включает операции напыления металла, фотолитографии и жидкостного травления для создания локальных металлизированных областей.

Для отработки режимов микросборки проводится поочередное соединение КП различных размеров на полуавтоматической установке микросварки Delvotec 5630 с помощью Al проволоки марки АК0,9ПМ-50 диаметром 50 мкм.

Поверхностные загрязнения и структура алюминиевой пленки существенным образом влияют на адгезию соединительного провода и его надежность. Наибольшее влияние оказывают адсорбированные атомы фтора, органические загрязнения, а также окисление алюминия. Одной из методик удаления является обработка поверхности в плазме SF_6/O_2 . При ультразвуковой микросварке алюминиевой проволокой соединение осуществляется методом «клин-клин» за счет возбуждения ультразвуковых колебаний и одновременном приложении давления. При этом основными факторами являются амплитуда колебаний рабочего торца инструмента, усилие на сжатие элементов сварки и время протекания процесса. Оптимальный режим проведения микросварки при комнатной температуре был реализован при параметрах: мощность 80 у.е, резонансная частота около 60 кГц, усилие нажатия 60 г, время 40 мс. На рисунке 10 продемонстрирован вариант соединения площадок петель, также видны тестовые исследования разварки в других режимах, не позволившие добиться устойчивого соединения.

Анализ результатов микросварных соединений КП показал хорошие результаты. При разварке необходимо контролировать проволоку на прочность. Для этого проводят тестирование петли на отрыв. Прочность определялась натяжением проволоки до разрушения. Полученное значение для используемой проволоки составило 23-25 гс. Анализ места разрыва локализован на шейке сварной точки, что указывает на формирование надежного сварного соединения проволоки и контактной площадки на подложке $LiTaO_3$.

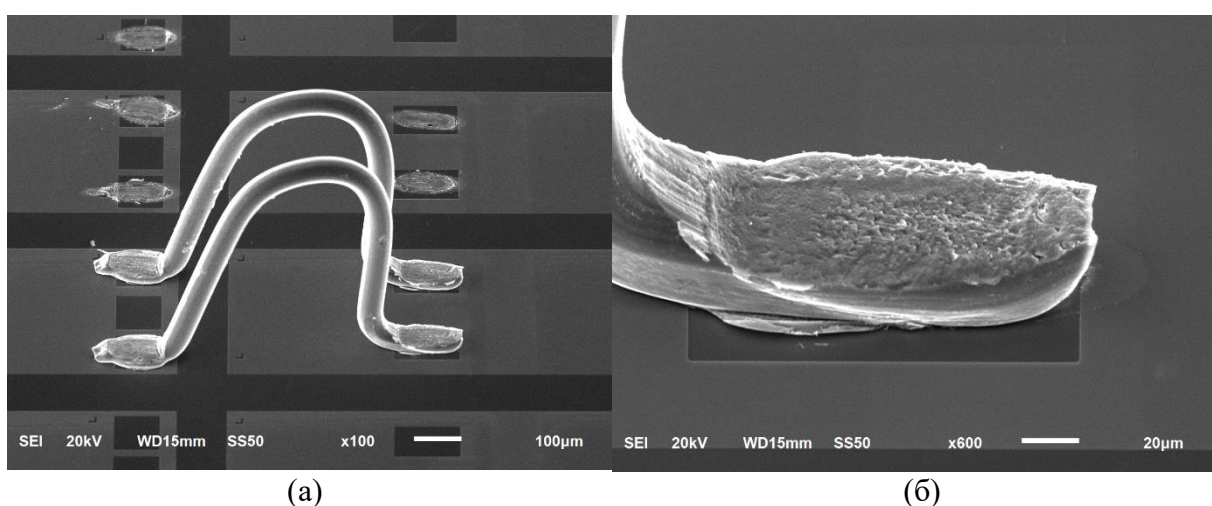


Рис. 10. Ультразвуковая сварка КП алюминиевой проволокой $d=50$ мкм: а) «клин-клин» соединение контактных площадок; б) место микросварного соединения

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Процесс плазмохимического травления танталата лития в плазме SF_6 протекает с образованием твердого пористого продукта реакции LiF . После формирования сплошного слоя процесс идет на границе раздела твердых фаз $\text{LiTaO}_3\text{-LiF}$ и его скорость ограничена диффузией через слой LiF .

2. Установлены закономерности изменения скорости травления с увеличением подводимой мощности от 100 до 250 Вт: наблюдается нелинейный рост скорости ПХТ танталата лития, связанный с увеличением энергии ионного потока, стимулирующего диссоциацию адсорбированных на поверхности фторсодержащих частиц с образованием радикалов фтора.

3. Установлено, что увеличение температуры приводит к росту скорости ПХТ танталата лития: в интервале температур от 500 К до 560 К наблюдается экспоненциальный рост, скорость химической реакции выступает в качестве лимитирующей стадии процесса. При $T > 560$ К происходит отклонение от экспоненциального закона характеризующееся сменой области протекания с кинетической на диффузионную.

4. Установлено, что повышение рабочего давления в диапазоне от 170 Па до 290 Па снижает скорость травления танталата лития: увеличение концентрации частиц в плазме приводит к потерям электронами энергии вследствие роста частоты соударений. Потери за счет соударений не позволяют электронам приобрести энергию необходимую для диссоциации и ионизации плазмообразующего газа, что приводит к снижению концентрации химически активных частиц.

5. Установлено, что процесс плазмохимического травления танталата лития в SF_6 является пороговым, что определяется летучестью продуктов реакции. Экспериментально определена пороговая температура начала процесса травления $T_{\text{пор}} = 475 \pm 25$ К.

6. Контролируемое введение газовых примесей аргона с объемной долей 40% и азота с объемной долей 30% приводит к увеличению скорости травления на 30% и 20%, соответственно. Повышение скорости травления связано с увеличением концентрации фторсодержащих радикалов за счет увеличения скорости диссоциации газа SF_6 электронным ударом, который обусловлен увеличением концентрации электронов при ионизации атомов аргона и азота.

7. Методом АСМ установлено, что с ростом ВЧ-мощности от 100 до 250 Вт, среднее значение шероховатости поверхности полированных образцов танталата лития после ПХТ не ухудшается, так как скорость реакции ограничена диффузией через пористый слой фторида лития, формируемого в процессе травления.

8. Получены прототипы канальных титановых волноводов, алюминиевые контактные площадки и отработана технология ультразвуковой микросварки на подложках из LiTaO_3 .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Коняев И.В. Особенности кинетики травления ниобата и танталата лития во фторсодержащей плазме / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, Е.А. Сизаск // Вестник ВГТУ. – 2017. – Т. 13. – №3. – С. 123-127.

2. Коняев И.В. Влияние газовых добавок Ar, N₂ и N₂O на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, И.И. Бородкин // Вестник ВГТУ. – 2018. – Т. 14. – № 3. – С. 150-155.

3. Коняев И. В. Влияние давления и температуры на кинетику травления LiTaO₃ во фторсодержащей плазме / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов // Вестник ВГТУ. – 2018. – Т. 14. – № 5. – С. 160-164.

4. Коняев И. В. Технологические особенности формирования рельефа на пластинах монокристаллического LiTaO₃ в плазме на основе SF₆ / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, И.И. Бородкин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 3. – С. 40-43.

5. Konyaev I. V. Specific features of the formation of optical waveguides, contact pads and electrical interconnections on lithium tantalate substrates / I.V. Konyaev, I.I. Borodkin, E.N. Bormontov // Journal of Physics: Conference Series. –2021. – Vol. 2103. – 012185. Doi:10.1088/1742-6596/2103/1/012185.

Статьи и материалы конференций:

6. Коняев И. В. Влияние мощности и давления на кинетику плазменного травления ниобата и танталата лития / И. В. Коняев // Сборник трудов XIV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – 2017. – С. 345-346.

7. Коняев И. В. Влияние плазменной обработки танталата лития на морфологию поверхности / И. В. Коняев, Е. А. Сизаск // Твердотельная электроника, микроэлектроника и нанoeлектроника: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ. – 2017. – № 16. – С. 56-60.

8. Коняев И.В. Влияние газовой добавки аргона на кинетику и морфологию поверхности танталата лития при травлении во фторсодержащей плазме / И. В. Коняев // Сборник трудов XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – 2018. – С. 355-356.

9. Анализ морфологии фторида лития в процессе плазмохимического травления LiTaO₃ / И. В. Коняев, И. И. Бородкин, Е. А. Сизаск [и др.] // Твердотельная электроника, микроэлектроника и нанoeлектроника: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ. – 2018. – №17. – С.110-115.

10. Коняев И.В. Сложности размерной обработки танталата лития при травлении в плазме на основе SF₆ // Сборник трудов XVII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – 2020. – С. 203-205.

11. Коняев, И.В. Структура и механизм образования пленки LiF при плазмохимическом травлении LiTaO₃ / И.В. Коняев, В.А. Буслов, И.И. Бородкин, Л.Н. Владимирова, О.Г. Викин // Твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ. – 2020. – № 19. – С. 18-22.

12. Коняев И.В. Конструктивно-технологические особенности формирования металлических волноводов, контактных площадок и сварных соединений на подложках LiTaO₃ / И.В. Коняев, И.И. Бородкин, Е.Н. Бормонтов // Тезисы докладов международной конференции Физика.СПб. Санкт-Петербург, 2021. С. 348-349.

Подписано в печать 14.02.2023 г.
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов
Усл. печ.л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84