

Зау Пхо Аунг

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА НИТРИДЕ
АЛЮМИНИЯ ПРИ НАНЕСЕНИИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМОЙ С ГОРЯЧЕЙ МИШЕНЬЮ

Специальность 05.27.06 – Технологии и оборудование для производства полу-
проводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Колесник Леонид Леонидович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Васильева Татьяна Михайловна
доктор технических наук, профессор
департамента химии федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Смоланов Николай Александрович
кандидат физико-математических наук, доцент
Института физики и химии Национального
исследовательского Мордовского государственного
университета имени Н. П. Огарева.

Ведущая организация:

Акционерное общество
Научно-исследовательский институт
точного машиностроения (АО «НИИТМ»)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212. 141. 18 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.
Телефон для справок +7-499-267-09-63.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.141.18
кандидат технических наук, доцент



Мешков С. А.

Актуальность темы исследования. Силовые электронные модули, и электровакуумные приборы содержат в конструкции элементы соединений металл-керамика. К таким соединениям предъявляются жесткие требования по адгезионной прочности и устойчивости к перепадам температур. Керамические детали устройств, как минимум, выполняют:

- функции несущего элемента конструкции;
- электрическую изоляцию токоведущих цепей друг от друга;
- отвод тепла, выделяемого на элементах конструкции.

Основными причинами отказов керамических узлов являются разрушения соединений с металлом, вызванные термомеханическим напряжением, ударными и вибрационными воздействиями, а также усталостными процессами.

Адгезионная прочность покрытия на керамике зависит от многих факторов: материала подложки, материала пленки, технологии получения покрытия и др. В процессе эксплуатации керамические детали подвергаются тепловым и механическим нагрузкам, в том числе вибрации. Химическая и термомеханическая несовместимость материалов подложки и покрытия приводит к отслоению токопроводящих дорожек, разрушению покрытия, перегреву электронных компонентов модуля и др.

Проблемы адгезионной прочности металлических покрытий на керамике в достаточной мере решены для таких материалов, как оксид алюминия и оксид бериллия. Однако, переход на керамику из нитрида алюминия снова поставил задачу достижения высоких показателей адгезионной прочности металлических покрытий.

Адгезия в месте соединения металл-керамика является проблемой для нитрида алюминия, необходимо наносить подслой металла, который хорошо активируется с керамикой. Для этого используют титан, хром, тантал и другие металлы, размещая их между проводящим слоем и подложкой.

На данный момент для металлизации токопроводящих слоев используются различные методы толсто пленочных технологий, такие как DBC технология, АМВ – технология, холодное газодинамическое напыление. Переход на тонко пленочные технологии, такие как термическое испарение и магнетронное распыление, позволят снизить процент брака, повысить качество соединений и избежать недостатков, присущих толсто пленочным технологиям.

До настоящего времени не решены проблемы высокой прочности соединения металл-керамика при металлизации нитрида алюминия методами тонко пленочных технологий. Поэтому данная работа посвящена исследованию методов тонко пленочных технологий применительно к формированию токопроводящих слоев меди и подслоя титана на подложках, выполненных из нитрида алюминия.

Вопросами тонких пленок, металлизации и адгезии занимались Панфилов Ю.В., Марахтанов М. К., Одинокое В.В., Флюренцев С., Непочатов Ю., Егоршев В.К. Исследованиями магнетронных распылительных систем с горячей и жидкой мишенью занимаются Шаповалов В.И., Блейхер В.П., Юрьева А.В., Сиделёв Д.В. Однако до настоящего времени нет работ, посвященных вопросам

повышения адгезии при использовании магнетронных распылительных систем с горячей мишенью.

Цель работы

Создание научных основ металлизации нитрида алюминия для достижения максимальной адгезионной прочности получаемых покрытий с одновременным повышением энергетической эффективности процесса.

Задачи исследований

1. На основе анализа исследований в области металлизации керамики определить перспективные методы, пригодные для металлизации подложек, изготовленных из нитрида алюминия.
2. Провести модернизацию лабораторной установки с целью исследований процесса металлизации керамических подложек, изготовленных из нитрида алюминия.
3. Разработать физическую модель, описывающую тепловые процессы, происходящие при работе магнетронной распылительной системы с горячей мишенью, с целью выявления зависимости энергетической эффективности магнетронной распылительной системы от режимов ее работы.
4. Выявить зависимости скорости осаждения и адгезионной прочности получаемых покрытий, а также энергетической эффективности магнетронной распылительной системы от режимов ее работы.

Научная новизна работы

1. Разработана физическая модель, описывающая баланс тепловых потоков, возникающих на катоде магнетронной распылительной системы при ее работе в режиме горячей мишени, позволяющая определять энергетическую эффективность процесса распыления в зависимости от режимов работы.
2. На примере магнетронной распылительной системы с мишенью диаметром 75 мм установлено, что разогрев титановой мишени за счет ионной бомбардировки и искусственного снижения теплоотвода от мишени позволяет повысить энергетическую эффективность процесса распыления в полтора раза, с 11% до 15%.
3. На примере магнетронной распылительной системы с мишенью диаметром 75 мм установлено, что при работе в режиме горячей мишени с повышением мощности разряда рост энергетической эффективности процесса распыления с 11% до 15% сопровождается одновременным ростом скорости нанесения покрытий с 135 до 390 нм/с и адгезионной прочности с 13 до 68 МПа.

Практическая ценность диссертационной работы

1. На базе лабораторной установки для отработки технологии получения многослойных покрытий в едином вакуумном цикле разработан и введен в

эксплуатацию стенд, позволяющий исследовать тепловые и энергетические процессы, происходящие во время работы магнетронной распылительной системы. Стенд используется для выполнения научно-исследовательских работ студентов и при проведении лабораторных работ при подготовке бакалавров по направлениям «Электроника и нанoeлектроника» и «Нанoeинженерия».

2. На основе физической модели, описывающей баланс тепловых потоков, возникающих на катоде магнетронной распылительной системы, работающей в режиме горячей мишени, разработана методика определения энергетической эффективности магнетронной распылительной системы, работающей в таком режиме.

3. Получены значения параметров технологических режимов, позволяющие достичь адгезионной прочности соединений металл-керамика не хуже 70 МПа для проводящих покрытий меди на подложках нитрида алюминия.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в работе проанализированы механизмы нанесения покрытий при использовании магнетронной распылительной системы с горячей мишенью и проведены экспериментальные исследования, выполненные по плану полного факторного эксперимента. Результаты экспериментальных исследований обработаны методами дисперсионного анализа.

Для анализа технологических параметров и характеристик полученных покрытий применялся широкий перечень метрологического оборудования, позволяющий оценить и измерить температуру, давление ток и напряжение разряда при нанесении покрытий, адгезионные свойства покрытий.

Адгезионные характеристики покрытий измерялись методами сетчатых надрезов и методом отрыва.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждается согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств измерений и стандартных методик проведения исследования, а также методов статистической обработки данных.

На защиту выносятся

1. Физическая модель тепловых потоков, протекающих в магнетронной распылительной системе с горячей мишенью, в частности уравнения теплового баланса на мишени.

2. Результаты исследований тепловых потоков и энергетической эффективности магнетронной распылительной системы с горячей мишенью и их зависимости от технологических режимов формирования покрытий.

3. Технологические режимы получения покрытий, обеспечивающие адгезионную прочность покрытий меди на нитриде алюминия не хуже 70 МПа.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана, (г. Москва, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.), на 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.), на 26-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), на XXVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (г. Судак, 2019 г.).

Внедрение результатов работы

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы в учебном процессе кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Результаты работы используются при разработке технологических процессов металлизации керамических подложек модулей силовой электроники, а также керамических элементов узлов электровакуумных приборов, выпускаемых АО «Плутон», что подтверждается актом внедрения.

Стенд для исследования тепловых процессов, протекающих при работе магнетронной распылительной системы с горячей мишенью, разработанный на базе лабораторной установки, целесообразно использовать в исследовательских лабораториях высших учебных заведений и научно-исследовательских центров.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 2 научные статьи в журналах из списка, рекомендуемого ВАК РФ, 3 научные статьи в журналах, входящих в систему цитирования SCOPUS и 3 доклада на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора методов металлизации; выявлении требований к соединениям металл-керамика; разработке, монтажу и наладке стенда для исследования тепловых процессов, происходящих при работе магнетронной распылительной системы с горячей мишенью; разработке физической модели, описывающей тепловые потоки, возникающие при работе магнетронной распылительной системы с горячей мишенью; проведении работ по отработке технологии и исследованию полученных образцов; обработке экспериментальных данных и выдаче рекомендаций по использованию результатов работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы и приложения. Работа представлена на 106 страницах, содержит 55 иллюстраций и 16 таблиц. Список литературы включает 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена цель работы, основные задачи, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность полученных результатов, информация об апробации работы и проведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе приведен анализ материалов керамических подложек, используемых для формирования токопроводящего покрытия с точки зрения требований характеристик, таких как: механическая прочность, теплопроводность и коэффициент термического расширения. Определены основные свойства керамических подложек. Сделан анализ существующих методов металлизации керамики, используемых в настоящее время. Рассмотрены основные преимущества и недостатки этих методов. Проведен анализ перспективных методов металлизации на основе тонкопленочных технологий для получения покрытий на керамических деталях различного назначения. Определены основные преимущества и недостатки этих методов.

Во второй главе описано основное оборудование, использовавшееся для проведения экспериментальных исследований.

Для формирования покрытий использовалась лабораторная установка, позволяющая проводить отработку и исследование технологии формирования многослойных покрытий на керамике в едином вакуумном цикле. Основным преимуществом установки является возможность формирования адгезионного подслоя титана и проводящего слоя без разгерметизации объема вакуумной камеры и контакта изделия с атмосферой, в едином вакуумном цикле. Подслой титана может формироваться с использованием магнетронной распылительной системы, а проводящий слой с помощью магнетронной распылительной системы или термического испарителя. Система откачки позволяет получать в технологическом объеме полностью безмаслянный вакуум, что является важным условием для достижения высокой адгезионной прочности покрытий.

Подложкодержатель для размещения исследуемых образцов выполнен таким образом, что исследуемые образцы могут вводиться в технологическую зону каждого из источников. Схема размещения образцов и подложкодержателя относительно технологических источников представлена на Рис.1. Магнетронная распылительная система установлена таким образом, что расстояние от поверхности катода до подложки составляет 60 мм. Расстояние от спирали термического испарителя до подложки составляет также 60 мм.

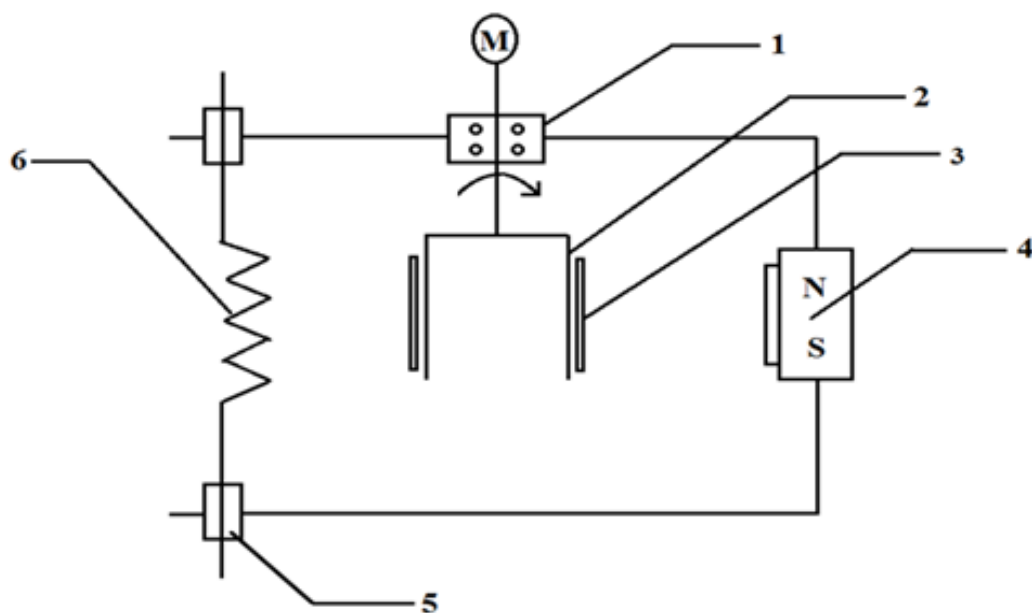


Рис. 1. Схема расположения технологических источников относительно подложкодержателя

1 – Ввод вращения, 2 – Подложкодержатель, 3 – Подложка, 4 – Магнетронная распылительная система, 5 – Токоввод, 6 – Термический испаритель

Особенностью используемой магнетронной распылительной системой является возможность нанесения покрытий с горячей мишенью. В процессе работы магнетронной распылительной системы температура катода повышается за счет воздействия ионной бомбардировки и излучения плазмы. Как правило, узел магнетронной распылительной системы охлаждают для предотвращения его разрушения. Если при этом снизить отвод тепла от мишени, то можно добиться такого режима работы магнетронной распылительной системы, что мишень будет нагреваться до значительных температур, а в магнитной системе будет поддерживаться тепловой режим, необходимый для сохранения работоспособности магнитов.

Энергия, поступающая из области разряда на мишень, расходуется на нагрев мишени и ее распыление. Тепловая энергия распределяется с поверхности мишени за счет кинетической энергии атомов осаждаемого материала, энергии, выделяемой при конденсации и кристаллизации, кинетической энергии нейтральных и отраженных от мишени атомов рабочего газа, энергии вторичных электронов с мишени, разрядного излучения и излучения от нагретой поверхности мишени.

Для исследования тепловых процессов, проходящих в магнетронной распылительной системе во время ее работы, был разработан и собран экспериментальный стенд, позволяющий контролировать тепловые потоки во время работы магнетронной распылительной системы. Температура на входе и выходе охлаждающего контура магнетронной распылительной системой контролируется с помощью терморезистивных датчиков. Температура стенок камеры и поверхности подложки измеряется с помощью термопарных преобразователей.

Схема экспериментального стенда для контроля тепловых параметров представлена на Рис. 2.

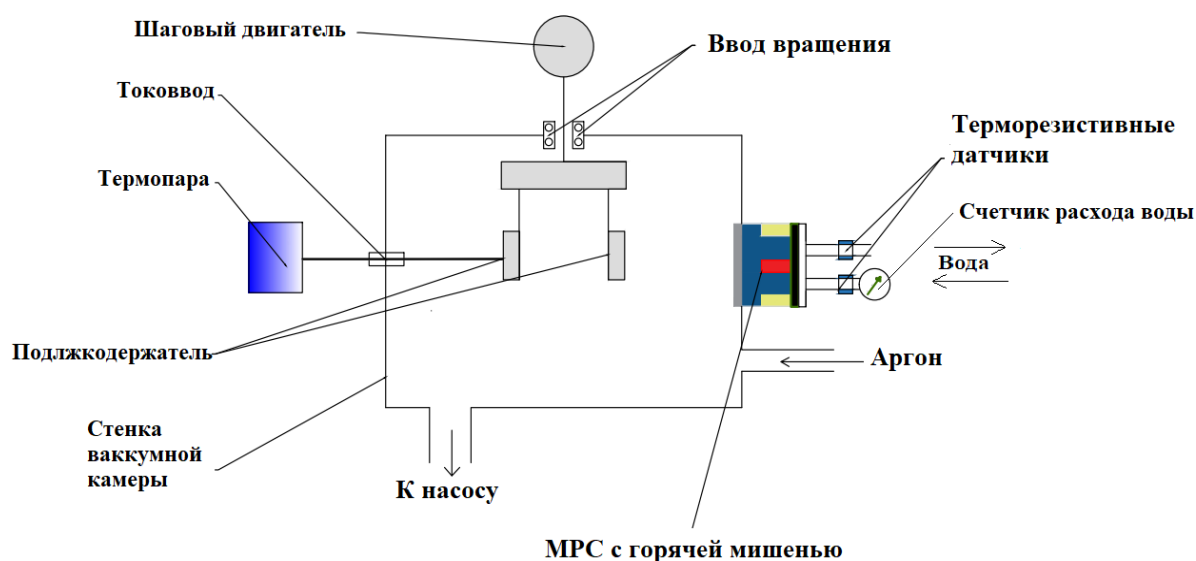


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования тепловыделения магнетронной распылительной системы с горячей мишенью

Установка оснащена источником питания магнетронной распылительной системы, имеющим возможность стабилизации параметров разряда по току, напряжению или мощности. Источник может работать в режиме постоянного тока и в импульсном режиме с частотой импульсов до 100 кГц и коэффициентом заполнения импульсов от 10 до 100 %.

Для контроля толщины покрытий использовался профилометр TR220. Прибор позволяет строить изображение реального профиля поверхности. При формировании покрытия использовалась маска, позволяющая затенять подложку и получать ступеньку наносимого материала относительно поверхности подложки. Перепад высот между уровнями поверхности покрытия и подложки характеризует толщину покрытия, которая была сформирована на образце.

Адгезионная прочность формируемых покрытий определялась методом испытаний на отрыв с использованием разрывной машины.

Третья глава посвящена разработке физической модели баланса энергетических потоков, возникающих в процессе работы магнетронной распылительной системы с горячей мишенью. Основной целью разработки модели являлось определение энергетической эффективности магнетронной распылительной системы, а также влияния эффективности на характеристики получаемых покрытий. Под энергетической эффективностью магнетронной распылительной системы понимается отношение энергии, затрачиваемой непосредственно на распыление мишени к общему количеству энергии, подаваемой на магнетронную распылительную систему.

Для стабилизации температурного режима работы магнетрона на катодном узле составлено уравнение баланса энергии:

$$\sum_i^n P_i = \sum_i^n Q_i, \quad (1)$$

где P_i – потоки энергии, поступающие на катод (мишень), а Q_i – потоки энергии, отводимые с катода (мишени).

Поток энергии, поступающий на мишень из области плазменного разряда, складывается из следующих компонентов: энергия ионов, ускоренных в темном катодном пространстве; энергия, передаваемая из плазменного облака нейтральными частицами; излучение плазмы; энергия электронов; энергия, выделяемая за счет прохождения электрических токов. Согласно модели, основным источником притока энергии на катодном узле является ионная составляющая тока разряда, остальными же компонентами при построении физической модели можно пренебречь.

Мощность, поступающая на мишень из области разряда через ионный ток, может быть рассчитана по зависимости:

$$P_i = 0,6 U_d \cdot 0,95 I_d = 0,57 P_d, \quad (2)$$

где, I_d – ток разряда, P_d – мощность разряда, P_i – мощность ионного тока.

Расход энергии с поверхности мишени идет в нескольких направлениях: энергия, уносимая отраженными частицами; энергия теплового излучения с поверхности мишени; энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона; энергия, уносимая с поверхности мишени распыленными атомами.

Уравнение баланса энергии на катодном узле магнетронной распылительной системы в стационарном температурном режиме можно описать следующим выражением:

$$P_i = Q_{\text{отр}} + Q_{\text{рас}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл}}, \quad (3)$$

где, $Q_{\text{рас}}$ – энергия, уносимая распыленными частицами; $Q_{\text{отр}}$ – энергия, уносимая отраженными ионами; $Q_{\text{изл}}$ – энергия, уносимая излучением от нагретой поверхности мишени; $Q_{\text{охл}}$ – энергия, отводимая системой охлаждения магнетрона.

Энергетическая эффективность распыления рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{Q_{\text{рас}}}{P_d} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Для определения значений энергетической эффективности используемой магнетронной распылительной системы в разных режимах работы были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых измерялась температура подложки, температура охлаждающей жидкости на входе и выходе охлаждающего контура магнетрона, а также фиксировались параметры мощности разряда. Таким образом, измерялись $Q_{\text{охл}}$, $Q_{\text{изл}}$, а $Q_{\text{рас}}$ рассчитывался на основании измеренных параметров технологического процесса.

Подложка площадью 500 мм² и толщиной 1 мм была закреплена на расстоянии 60 мм от поверхности мишени магнетрона до подложки, материал мишени – титан. Время распыления составляло 300 секунд. По результатам экспе-

риментов были определены зависимости мощностей потоков энергии, расходуемых с поверхности мишени от мощности разряда. Эти зависимости представлены на Рис. 3.

Было установлено, что тепловой поток системы охлаждения $Q_{\text{охл}}$ и тепловой поток излучения от поверхности мишени $Q_{\text{изл}}$ линейно зависят от мощности разряда. Поток энергии, уносимой распыленными частицами, увеличивается с повышением мощности разряда нелинейно.

Одновременно с оценкой энергетической эффективности распыления в зависимости от мощности разряда проводились измерения скорости осаждения покрытия. Обнаружено, что для используемого диапазона мощности разряда от 700 Вт до 1300 Вт одновременно с линейным ростом скорости осаждения происходит нелинейное увеличение энергетической эффективности. Графики, иллюстрирующие выявленные зависимости представлены на Рис. 3 и 4.

Было предположено, что энергетическая эффективность процесса распыления увеличивается по нелинейной зависимости при увеличении мощности разряда по следующим причинам.

Поступающая энергия расходуется на распыление, излучение и охлаждение. Схема расходования энергии показана на Рис. 3. Так как теплоотвод от мишени искусственно снижен, то мишень нагревается до значительных температур, близких к температуре плавления. Причем температура мишени тем выше, чем выше мощность разряда.

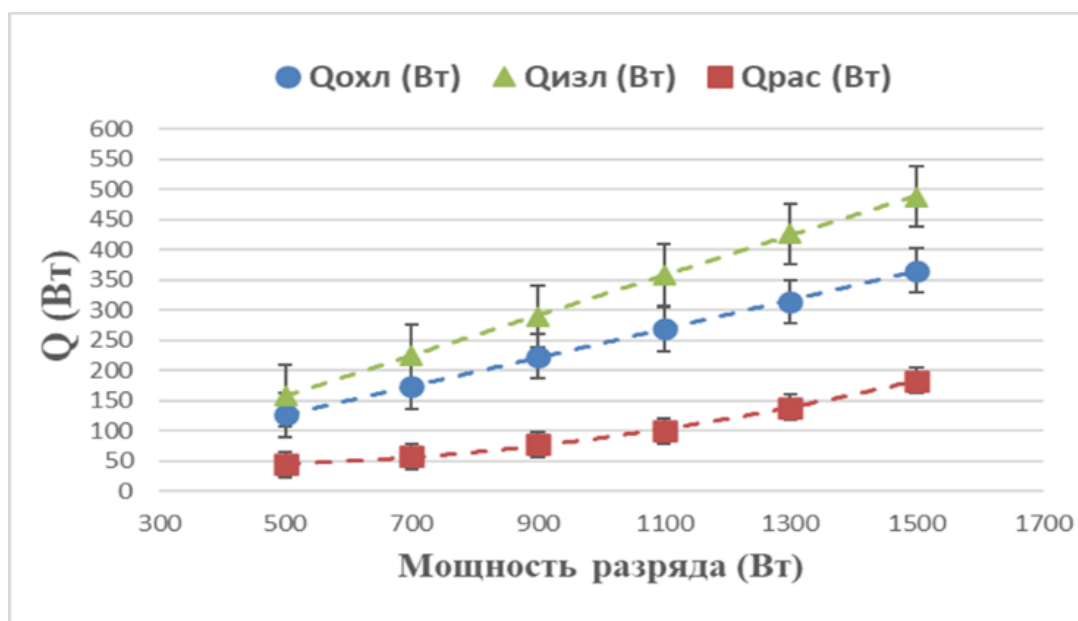


Рис. 3. Зависимость потоков энергии, расходуемых с поверхности мишени от мощности разряда

При росте температуры мишени одновременно происходит, как минимум, два процесса: ослабевают межмолекулярные связи материала мишени, что приводит к увеличению коэффициента распыления; увеличивается термоэлектронная эмиссия с поверхности мишени, что увеличивает количество электронов в области плазменного разряда и повышает плотность ионного тока за счет усиления ионизации. Если температура мишени приближается к температуре

плавления, то к процессам распыления добавляются процессы испарения материала мишени. Одновременное действие этих факторов приводит к тому, что количество энергии, требуемой для распыления одной молекулы мишени, снижается.

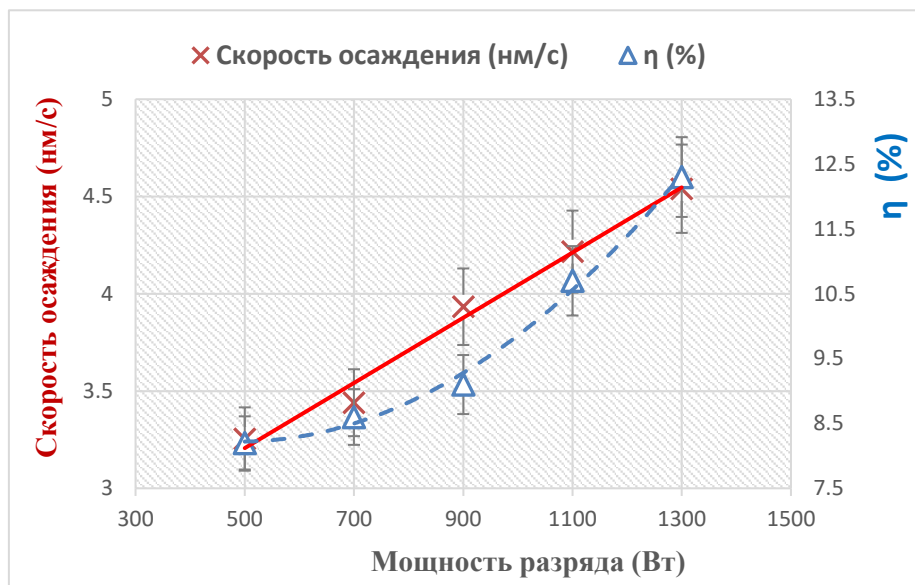


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения покрытия и энергетической эффективности от мощности разряда

Схема, показывающая расход энергии, необходимой для удаления одного атома при работе магнетрона в режиме горячей мишени представлена на Рис. 5.

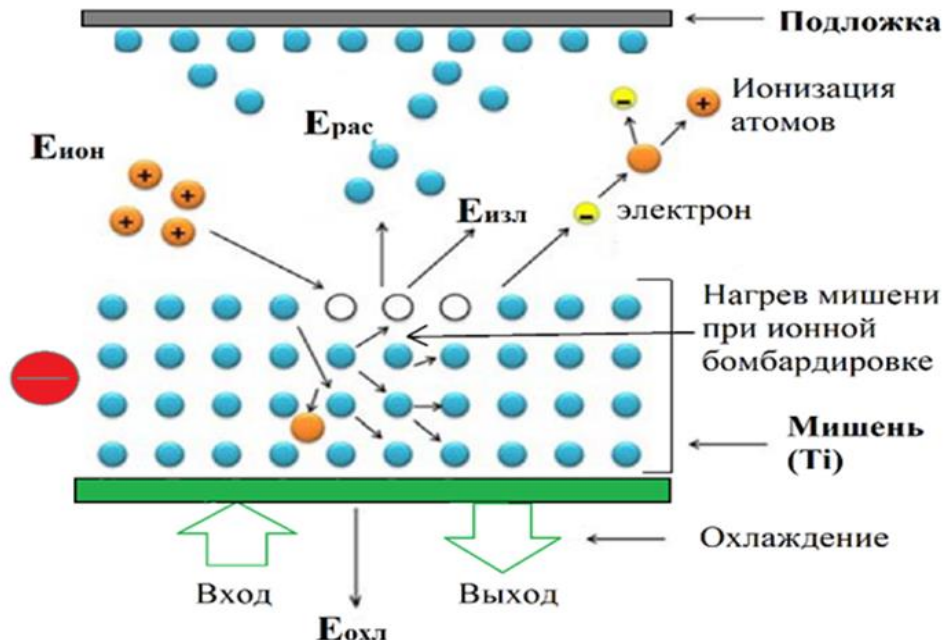


Рис. 5. Энергия разряда, расходуемая на удаление одного атома при работе магнетрона МРС с горячей мишенью

Четвертая глава посвящена исследованию влияния режимов нанесения покрытий на их адгезионную прочность. В качестве подложек во всех экспери-

ментах использовались шлифованные пластины из нитрида алюминия с шероховатостью поверхности 0,4 мкм.

Перед началом экспериментов диапазоны варьирования параметров технологического режима определялись путем тестовых нанесений покрытий. В ходе этих тестов были определены границы режимов, при которых возможна работа технологического источника и качество получаемых покрытий удовлетворяет минимальным требованиям по результатам визуального контроля. Эксперименты проводились в диапазоне мощностей разряда от 500 до 1300 Вт.

В ходе экспериментальных исследований адгезионная прочность покрытий оценивалась качественно, по методу сетчатых надрезов, и количественно, методом отрыва.

Первая серия исследований проводилась при работе магнетронной распылительной системы в режиме постоянного тока. Формирование адгезионного подслоя проводилось в течение 7 минут при различных значениях мощности разряда. Так как время нанесения было фиксировано, то увеличение толщины слоя покрытия говорит об увеличении скорости его осаждения.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что при увеличении мощности разряда с ростом скорости нанесения адгезионного подслоя титана одновременно увеличивается адгезионная прочность проводящего покрытия. Увеличение мощности разряда с 500 до 1300 Вт приводит к росту адгезионной прочности с 11 МПа при толщине адгезионного подслоя 920 нм до 23 МПа при толщине адгезионного подслоя 1,36 мкм. Результаты измерения адгезионной прочности представлены на Рис. 6.

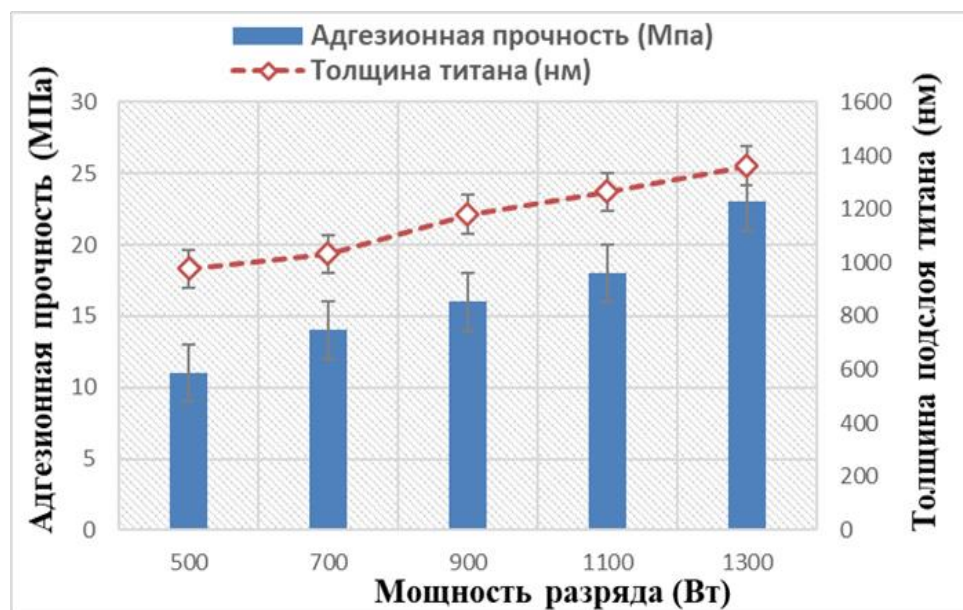


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности и толщины адгезионного подслоя титана от мощности разряда при нанесении покрытий в режиме постоянного тока

Вторая серия экспериментов была направлена на исследование адгезионной прочности покрытий при формировании адгезионного подслоя в импульсном режиме работы источника питания магнетронной распылительной систе-

мы. В ходе исследований при фиксированной мощности источника питания варьировались такие параметры, как частота и коэффициент заполнения импульсов. Частота импульсов варьировалась в диапазоне от 20 до 100 кГц, а коэффициент заполнения импульсов от 60% до 80%. По результатам экспериментов, как и в первой серии, установлено, что адгезионная прочность покрытий возрастает с ростом скорости осаждения адгезионного подслоя. Наилучшие значения адгезионной прочности показали образцы, полученные при частоте 100 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 80%. Скорость осаждения адгезионного подслоя составила в диапазоне от 210 нм/мин, адгезионная прочность от 13 до 14 МПа. Результаты измерения адгезионной прочности представлены на Рис. 7.

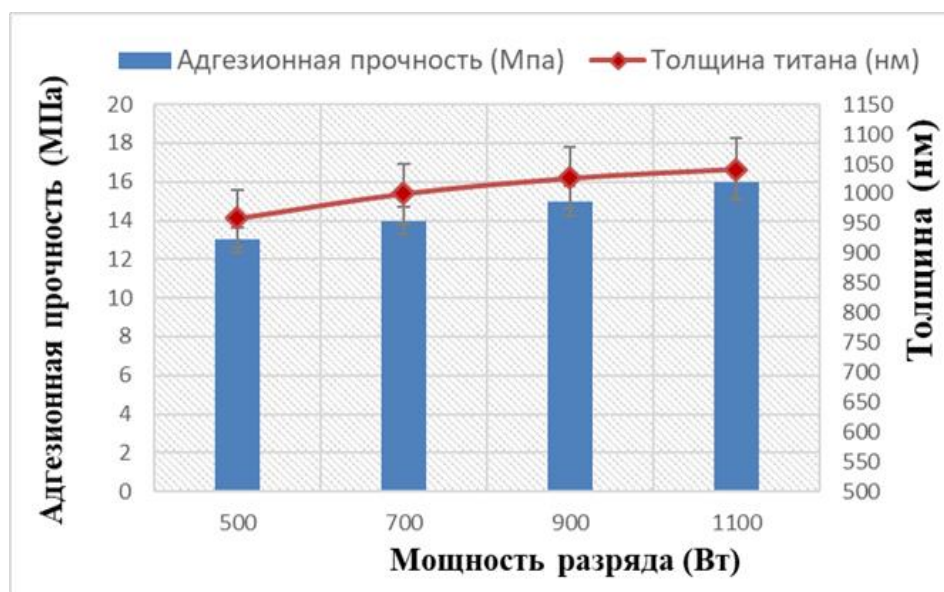


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности и толщины адгезионного подслоя титана от мощности разряда при нанесении покрытий в импульсном режиме, при частоте 100 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 80 %.

Полученные значения оказались меньше значений, полученных при режиме постоянного тока. Поэтому дальнейшие исследования проводились для случая формирования адгезионного подслоя в режиме постоянного тока.

В качестве варьируемых параметров использовались значения величины подачи плазмообразующего газа (аргона) и остаточного давления в камере. Подача газа обеспечивалась с помощью регулятора расхода газа, а остаточное давление в камере обеспечивалось за счет управляемой заслонки, которая позволяет диафрагмировать проходное сечение фланца откачки и, таким образом, управлять скоростью откачки. Сочетание этих двух способов регулирования позволило отдельно управлять как парциальным давлением рабочего газа, так и абсолютным давлением в камере. Нанесение покрытий выполнялось при фиксированной мощности разряда 1100 Вт. Подача газа варьировалась в диапазоне от 30 до 50 стандартных кубических сантиметров в минуту, а давление в камере от 3 до 5 Па.

Было установлено, что с увеличением подачи газа и давления в камере растет как скорость нанесения покрытий, так энергетическая эффективность

магнетронной распылительной системы. В случае подачи газа в количестве 50 сссм и уставке давления в 5 Па скорость нанесения и энергетическая эффективность магнетронной распылительной системы достигают значений 390 нм/с и 15% соответственно. Зависимость скорости нанесения и энергетической эффективности от подачи газа и давления представлена на Рис. 8.

Полученные образцы также были исследованы на показатель адгезии методом отрыва. Установлено, что с повышением подачи газа и давления в камере растет как скорость осаждения, так и адгезионная прочности получаемых покрытий. Результаты исследования покрытий представлены на Рис. 9. Лучшие образцы, полученные при подаче газа 50 сссм и давлении 5 Па показали адгезионную прочность 68 МПа. Результаты измерения адгезионной прочности представлены на Рис. 9.

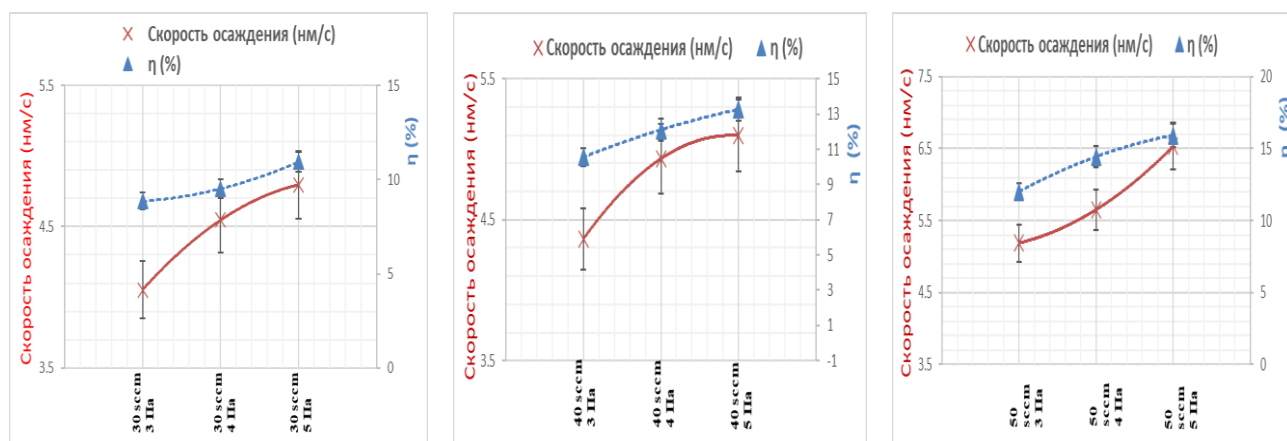


Рис. 8. Зависимость скорости осаждения и энергетической эффективности распыления от подачи газа и давления в вакуумной камере

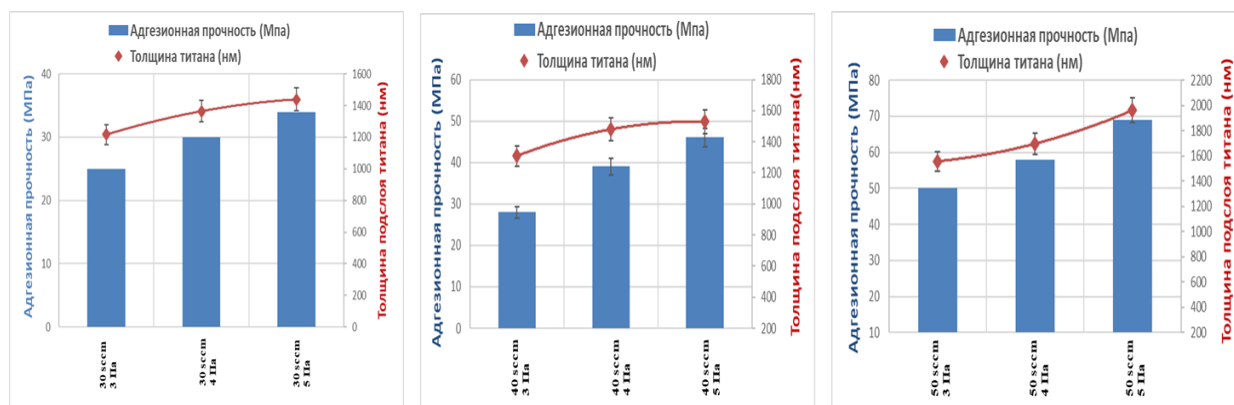


Рис. 9. Зависимость адгезионной прочности и толщины адгезионного подслоя титана от подачи газа и давления в вакуумной камере

Результаты измерений адгезионной прочности полученных покрытий позволяют говорить о том, что использование магнетронной распылительной системы с горячей мишенью и управление парциальным давлением рабочего газа позволяют одновременно добиться повышения энергетической эффективности процесса нанесения, высоких скоростей нанесения и высокой адгезионной прочности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработанный стенд может быть использован при проведении исследований энергетической эффективности процессов магнетронного распыления. Использование разработанной физической модели, описывающей баланс энергии на мишени магнетронной распылительной системы при ее работе в режиме горячей мишени, позволяет определять энергетическую эффективность процесса распыления.

2. Разработана физическая модель, описывающая баланс тепловых потоков, возникающих на катоде магнетронной распылительной системы при ее работе в режиме горячей мишени, позволяющая определять энергетическую эффективность процесса распыления в зависимости от режимов работы.

3. Определено, что использование магнетронной распылительной системы с уменьшенным теплоотводом от мишени приводит к разогреву мишени до температур, близких к температуре плавления материала мишени. Такой разогрев приводит к увеличению энергетической эффективности процесса распыления, росту скорости осаждения покрытия и повышению его адгезионной прочности.

4. При формировании адгезионного подслоя магнетронной распылительной системой с горячей мишенью предпочтительным режимом работы источника питания магнетрона является режим постоянного тока. Использование такого режима позволяет получить адгезионную прочность до 22 МПа, что в полтора раза больше адгезионной прочности, получаемой при работе источника питания в импульсном режиме.

5. Повышение парциального давления рабочего газа при сохранении мощности разряда приводит к дополнительному повышению энергетической эффективности процесса распыления. Например, используемой в работе установке были получены значения энергетической эффективности 15%, скорости осаждения покрытия 390 нм/мин, адгезионной прочности покрытия меди с подслоем титана на нитриде алюминия до 70 МПа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. L L Kolesnik, T S Zhuleva, P O Predtechenskiy, Myo Kyaw Hlaing, Zaw Phyo Aung. Processing of metallization technology aluminum oxide ceramics for electro-vacuum devices elements and power electronics devices / Journal of Physics: Conference Series, Volume 872, conference 1 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/872/1/012018>. (0,17 п.л/ 0,08 п.л)

2. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг. Повышение адгезии токопроводящих покрытий на керамических подложках оксида алюминия // Наноиндустрия. Научно-технический журнал. 2018, Том 11 № 3-4 (83) С. 232-236. (0,3 п.л/ 0,12 п.л)

3. L L Kolesnik, Myo Kyaw Hlaing, Zaw Phyo Aung. Influence of the technological development on the adhesion increment of metallic thin film coatings to ceramic substrates of aluminum oxide / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 387, conference 1 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/387/1/012037>. (0,31 п.л/ 0,12 п.л)
4. V V Tlyavlin, P B Petukhov, Zaw Phyo Aung, L L Kolesnik. Estimation of the influence of the parameters of magnetron sputtering processes on its energy efficiency / Journal of Physics: Conference Series, Volume 1313, conference 1 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1313/1/012053>
5. Колесник Л.Л., Мьо Ч.Х., Зау П.А. Исследование режимов формирования металлических покрытий на керамических подложках // Наноиндустрия. Научно-технический журнал. 2020, Том 13 № S2 С. 177-187. DOI: [10.22184/1993-8578.2020.13.2s.177.187](https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.2s.177.187)
6. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг. Возможность использования ионных кластеров для обработки поверхности // Вакуумная техника, материалы и технология. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции, Москва, 2016. С. 28-33. (0,34 п.л/ 0,15 п.л)
7. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг. Лабораторная установка для исследования свойств ионных кластеров // Вакуумная наука и техника. Материалы XXIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, (12-16 сентября) 2016. С. 111-115. (0,25 п.л/ 0,1 п.л)
8. Отработка технологии металлизации керамических подложек двумя методами / Зау Пхо Аунг [и др.] // Вакуумная техника, материалы и технология. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции, Москва, (11-13 апреля) 2017. С. 109-112. (0,29 п.л/ 0,1 п.л)
9. Отработка технологии металлизации алюмооксидной керамики для элементов электровакуумных приборов и устройств силовой электроники / Зау Пхо Аунг [и др.] // Вакуумная техника и технологии – 2017: Труды 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. / Под. ред. д-ра техн. наук А.А. Лисенкова. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 208-210. (0,16 п.л/ 0,07 п.л)
10. Повышение адгезии токопроводящих покрытий на подложках оксида алюминия / Зау Пхо Аунг [и др.] // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов XXIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. - Крым, (16-23 сентября) 2017. С. 176-179. (0,2 п.л/ 0,07 п.л)
11. Влияние технологического развития на повышение адгезионной прочности металлических тонкопленочных покрытий на керамические подложки оксида алюминия / Зау Пхо Аунг [и др.] // Вакуумная наука и техника. Материалы XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, (15-22 сентября) 2018. С. 138-144. (0,31 п.л/ 0,09 п.л)

12. Оценка влияния параметров процесса магнетронного распыления на его энергетическую эффективность / Зау Пхо Аунг [и др.] // Вакуумная техника и технологии – 2019: Труды 26-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. (18–20 июня) 2019 г. / под ред. Д. К. Кострина и С. А. Марцынюкова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 141-145. (0,2 п.л/ 0,07 п.л)