

На правах рукописи

Мьо Чжо Хлаинг

**Повышение адгезии покрытий
при металлизации керамических подложек**

Специальность: 05.27.06 –
«Технология и оборудование для производства полупроводников, ма-
териалов и приборов электронной техники»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
Кандидата технических наук



Москва – 2018 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: кандидат технических наук
Колесник Леонид Леонидович

Официальные оппоненты: **Елинсон Вера Матвеевна**,
доктор технических наук, профессор,
«Московский авиационный институт», кафедра
«Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии»
Смоланов Николай Александрович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
«Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», кафедра «Физика твердого тела»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество Научно-исследовательский институт точного машиностроения (ОАО «НИИТМ»)

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5 стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212. 141. 18.

Автореферат разослан «__» _____ года.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Д 212. 141.18

к т. н., доцент



Мешков С. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Силовые электронные модули применяются в областях техники, связанных с необходимостью передачи сильноточных сигналов. Типовыми областями применения таких модулей являются системы навигации летательных аппаратов, элементы коммутации силовых схем и другие высоконагруженные соединения. Центральным узлом модуля является керамическая подложка, на которой формируют токопроводящие дорожки и монтируют электронные компоненты. Готовую подложку часто называют коммутационной платой.

Подложка выполняет две основные функции:

1. Является диэлектрической основой печатной схемы, формируемой на одной или двух сторонах.
2. Обеспечивает отвод тепла, выделяемого полупроводниковыми кристаллами и элементами схемы.

Используемая для подложек керамика негигроскопична, термостойка, является изоляционным материалом с высокими механическими и диэлектрическими свойствами. Она отличается сравнительной простотой изготовления и невысокой стоимостью. При изготовлении силовых модулей используются керамические подложки из оксида или нитрида алюминия с многослойным металлическим покрытием толщиной от нескольких микрон до нескольких десятков микрон (в зависимости от применения), обеспечивающим требуемую степень адгезии покрытия к керамике и наносимым с одной или с обеих сторон керамической пластины.

Основными требованиями к готовому изделию являются минимальные габариты и низкая стоимость материалов и процесса производства. Кроме того, решающими факторами являются высокие технические характеристики, устойчивость к воздействию окружающей среды и безотказность. Конструкция готового модуля должна обеспечивать минимальные значения переходных тепловых сопротивлений, распределенных индуктивностей силовых шин, высокое напряжение изоляции.

Адгезионная прочность зависит от многих факторов: технологии получения покрытия, материала пленки, материала подложки; и может снижаться в процессе эксплуатации готового изделия. В процессе работы силовых модулей они подвергаются тепловым и механическим нагрузкам, в том числе вибрации. Это приводит к разрушению компонентов от перегрева и механическим повреждениям модулей. Часто разрушение происходит в

структуре подложка-проводящее покрытие. Основной причиной такого разрушения является низкая адгезия металлической пленки к керамическому основанию.

Основные причины снижения адгезионной прочности покрытий во время эксплуатации приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Основные причины снижения адгезионной прочности

Причина	Результат
Термомеханическая несовместимость материала подложки и слоя металлизации	Отслоение пленки от подложки, разрушение пленки
Химическая несовместимость материала подложки и металлизации	Окисление покрытия, изменение электрических свойств, разрушение пленки

Исследованиями технологий формирования покрытий и силовых модулей в целом занимались С. Флюренцев (анализ современного состояния и прогноз развития приборов силовой электроники), Ю. Непочатов (разработка технологии изготовления металлизированных подложек для изделий силовой электроники), В.К. Егоршев (формирование соединений металл-керамика). Исследованиями тонкопленочной технологии занимались Ю. В. Панфилов (изучение технологии формирования тонкопленочных покрытий), В.В. Одинокоев (технологии металлизации в вакууме), М. К. Марахтанов (формирование тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления). Однако, до настоящего времени остались не решенными вопросы использования тонкопленочных технологий на керамических подложках при производстве силовых высоконагруженных модулей.

В настоящее время при производстве силовых модулей для металлизации используются атмосферные толстопленочные технологии, такие как вжигание пасты, Direct Bonding Coating (DBC), Direct Plated Coating (DPC), холодное газодинамическое нанесение. Переход на тонкопленочные технологии, такие как термическое испарение и магнетронное распыление, позволят получать высокое качество покрытий и воспроизводимость результатов при их получении. Из-за этого возникла необходимость получения токопроводящих покрытий на керамических подложках, используемых для произ-

водства силовых модулей, методами тонкопленочной технологии. Для силовых модулей и электровакуумных приборов до настоящего момента не решены вопросы получения высокой адгезионной прочности металлических покрытий на керамических подложках при формировании таких покрытий методами тонкопленочной технологии.

Цель работы

Повышение адгезионной прочности покрытий при металлизации методами тонкопленочной технологии керамических подложек, используемых для изготовления устройств силовой электроники и электровакуумных приборов.

Задачи исследований

1. На основе анализа существующих требований к устройствам силовой электроники и электровакуумным приборам, а также методов получения металлических покрытий, определить требования к материалам и технологии металлизации керамических поверхностей.
2. Разработать лабораторную установку для проведения исследований процессов нанесения покрытий на керамические подложки.
3. Определить технологические режимы нанесения покрытий, обеспечивающие адгезионную прочность получаемых покрытий более 50 МПа.

Научная новизна работы

1. Показано, что при нанесении адгезионного подслоя титана методом магнетронного распыления при давлении 1,5 Па при расположении подложки на расстоянии от 25 до 60 мм и углах наклона подложки относительно мишени от 0° до 180° шероховатость адгезионного подслоя титана зависит от расположения подложки и её угла наклона относительно мишени магнетронной распылительной системы во время формирования такого адгезионного подслоя.
2. Выявлено, что при нанесении покрытий меди на подложках оксида алюминия с исходной шероховатостью поверхности $R_a = 1,6$ мкм уменьшение шероховатости адгезионного подслоя титана от значения $R_a = 10,0$ мкм до значения $R_a = 2,0$ мкм приводит к увеличению показателя адгезионной прочности от балла 3 до балла 0 при проведении измерений по методу сетчатых надрезов в соответствии с ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013).
3. Выявлено, что при нанесении адгезионного подслоя титана методом магнетронного распыления при давлении 1,5 Па при расположении

подложки на расстоянии от 25 до 60 мм и углах наклона подложки относительно мишени от 0° до 180° наибольшее влияние на адгезионную прочность покрытий оказывает угол наклона подложки.

Практическая ценность работы

1. Разработана, отлажена и введена в эксплуатацию лабораторная установка для отработки получения многослойных покрытий в едином вакуумном цикле. Установка используется для выполнения научно-исследовательских работ студентов и при проведении лабораторных работ при подготовке бакалавров по направлениям «Электроника и нанoeлектроника» и «Наноинженерия».

2. Получены значения параметров технологических режимов, позволяющие повысить адгезионную прочность соединений металл-керамика.

3. Разработанная технология может быть использована в производстве изделий электронной техники для замены толстопленочных технологий при формировании токопроводящих слоев силовых электронных модулей и соединений металл-керамика в конструкциях электровакуумных приборов.

4. Получены зависимости, позволяющие определить оптимальное положение подложки в зоне нанесения для получения заданных характеристик адгезионной прочности покрытий.

Достоверность 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. Зависимость шероховатости адгезионного подслоя титана от положения подложки и её угла наклона относительно мишени магнетронной распылительной системы.

2. Диапазон значений положения подложки относительно мишени магнетронной распылительной системы и технологических режимов, позволяющие получать покрытия меди на подложках оксида алюминия с адгезионной прочностью не хуже 50 МПа.

3. Результаты исследования адгезионной прочности токопроводящих покрытий меди на подложках оксида алюминия, полученных при раз-

личных технологических режимах, как с адгезионным подслоем, так и без него.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва, 2015, 2016, 2017, 2018 г.), на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2015 г.), на XXI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Крым, 2015 г.), на XI международной научно-технической конференции (Москва, 2016 г.), на XXII научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Крым, 2016 г.), на XII международной научно-технической конференции (Москва, 2017 г.), на 24-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (Санкт-Петербург, 2017 г.), на XXIV научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Крым, 2017 г.), на 25-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (Санкт-Петербург, 2018 г.), на XXV научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Крым, 2018 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 целесообразно использовать при разработке технологических процессов металлизации керамических подложек модулей силовой электроники, а также керамических элементов узлов электровакуумных приборов. Предложенную компоновку лабораторной установки целесообразно использовать в исследовательских лабораториях высших учебных заведений и научно-исследовательских центров.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликована 1 статья в журнале, рекомендуемом ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в систему цитиро-

вания SCOPUS и 6 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора методов металлизации; выявлении требований к соединениям металл-керамика применительно к области производства силовых электронных компонентов; разработке, монтажу и наладке лабораторной установки для отработки технологии нанесения покрытий; проведения работ по отработке технологии; исследованию полученных образцов, обработке экспериментальных данных и выдаче рекомендаций по использованию результатов работы.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 73 наименований. Работа содержит 107 страниц машинописного текста, в том числе 34 таблицы и 46 рисунков, 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы; приведена постановка задач; сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов; перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор современных методов получения металлических покрытий на керамических деталях различного назначения, используемых как в силовых электронных модулях, так и в электровакуумных приборах. Проведен анализ используемых керамических материалов, а также материалов покрытий. Выявлены требования к керамике и покрытиям для изделий различного назначения. Сделан анализ используемых в настоящее время методов металлизации; определены достоинства и недостатки каждого метода. Определено, что наиболее перспективными методами получения металлических покрытий на керамике для силовых модулей и методы исследования свойств таких покрытий являются вакуумные методы, такие как магнетронное распыление, термическое испарение, дуговое испарение. Сочетание этих методов с методом пароструйного осаждения позволяет достичь скоростей формирования покрытий до 1 мкм/мин.

Вторая глава посвящена разработке лабораторной установки, позволяющей проводить отработку технологии формирования металлических покрытий на керамических подложках.

Одним из условий получения высокой адгезионной прочности является возможность формирования многослойных покрытий в едином вакуумном цикле, без разгерметизации объема вакуумной камеры и контакта изделия с атмосферой.

Разработанная лабораторная установка предназначена для нанесения пленок методами магнетронного и термического испарения в едином вакуумном цикле. Установка является полностью оригинальной разработкой.

Установка состоит из следующих основных узлов: вакуумной камеры, технологической системы, систем откачки и напуска газа, систем питания и управления. Схема и внешний вид установки показаны Рисунке 1.

Вакуумная камера выполнена с использованием стандартных вакуумных компонентов и имеет присоединительные размеры стандарта ISO, что позволяет при необходимости осуществлять быструю замену технологических источников, в том числе с расширением реализуемых технологических методов. Система откачки позволяет получить полностью безмасляный вакуум, что является важным условием для получения высокой адгезионной прочности формируемых покрытий.

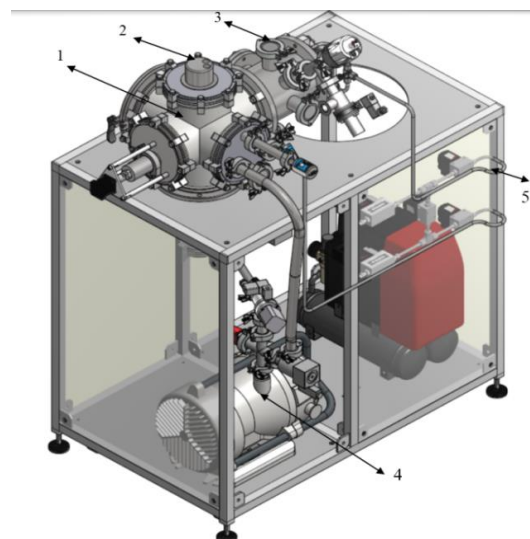
Системы подачи газа имеет два независимых канала, которые позволяют подавать в камеру аргон, азот или их смесь в любой пропорции. Контроллер газовой системы осуществляет регулирование состава и количества газа по процентному соотношению компонентов, количеству подаваемого газа, и по давлению в вакуумной камере через механизм обратной связи. Давление в вакуумной камере при этом контролируется с помощью емкостных датчиков, что обеспечивает высокую точность измерения.

Источники питания имеют возможность стабилизации технологических режимов по мощности, току и напряжению, а также имеют возможность работы в импульсном режиме с частотой импульсов до 100 кГц и коэффициентом заполнения импульсов от 0 до 100%.

Два независимых источника наносимых материалов (термический испаритель и магнетронная распылительная система) позволяют формировать двухслойные покрытия в едином вакуумном цикле. Подложкодержатель выполнен таким образом, что исследуемые образцы могут вводиться в технологическую зону каждого из источников.



а)



б)

Рисунок 1. Вакуумная схема (а) и внешний вид (б) разработанной установки для проведения экспериментальных исследований

1 - Камера нанесения, 2 – Магнетронная распылительная система, 3- Камера испарения, 4- Система откачки, 5 – Система подачи газа

Особенностью используемой магнетронной распылительной системы является возможность нанесения покрытий с горячей мишени. Мишень не охлаждается, и в процессе работы под воздействием ионной бомбардировки разогревается до температуры порядка около 900°C.

Для контроля температуры подложки установка оснащена термопарным преобразователем, который позволяет проводить измерения непосредственно в процессе формирования покрытия.

Была проведена серия экспериментов по определению диапазона режимов, при которых возможно формирование пленок с помощью термического испарителя и магнетронной распылительной системы.

Определены диапазоны величин подачи газа и мощности, при которых возможно получение покрытий без визуальных дефектов. Для титана эти значения составили: подача газа 30 ссст; диапазон мощностей магнетронной распылительной системы: от 350 до 420 Вт; диапазон ионного тока от 520 до 600 мА. На этих режимах были получены пленки титана на подложках ситалла. Образцы были испытаны на адгезионную прочность с помощью методов сетчатых надрезов и отрыва. Все образцы показали высокие значения адгезии. По методу сетчатых надрезов был получен максимально возможный показатель (0), а по методу отрыва были получены значения от

5,5 до 8 Мпа, причем разрушение происходило по клею, которым грибок был приклеен к покрытию, а покрытие осталось неповреждённым.

Третья глава посвящена отработке технологии получения двухслойных покрытий на подложках оксида алюминия. В качестве подложек во всех экспериментах использовались шлифованные пластины оксида алюминия с шероховатостью Ra 1,6 мкм с содержанием оксида алюминия не менее 99,95%.

Во всех экспериментах одновременно проводилось нанесение на 10 образцов. Для каждого режима нанесения было проведено по три нанесения. Таким образом, для каждого режима было получено по 30 образцов покрытия. Результаты измерения подвергались статистической обработке.

Адгезионной подслои титана наносился методом магнетронного распыления. Основной слой меди наносился методом термического испарения. Диапазон варьирования параметров технологического процесса представлен в Таблице 2. В зависимости от характера разрушения (стык покрытие/подложка; стык покрытие/грибок; межслойное соединение покрытия) делался вывод о величине адгезионной прочности. Схема проведения измерения представлена на Рисунке 2.

Первая серия экспериментов была посвящена определению влияния наличия адгезионного подслоя титана на адгезионную прочность. Были проведены измерения образцов покрытий с подслоем и без него.

Таблица 2.

Диапазон варьирования параметров технологического процесса

Параметр	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
Мощность МРС, Вт	350	380	420
Подача газа, сссм	10	20	30
Время нанесения, мин	5	10	15

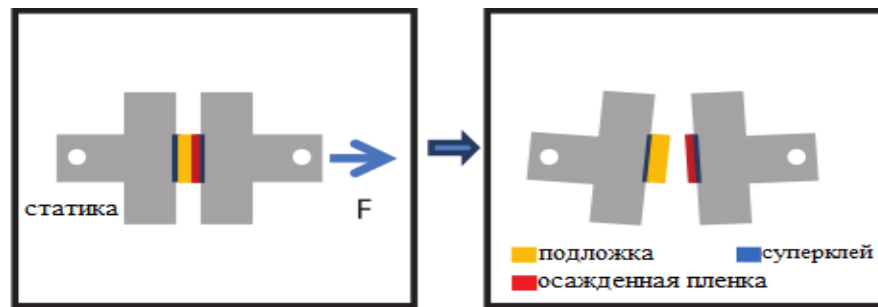


Рисунок 2. Схема проведения измерения адгезионной прочности методом отрыва

Установлено, что вставка адгезионного подслоя приводит к увеличению адгезионной прочности токопроводящего покрытия в 10 раз до величины 45 МПа. Поэтому все дальнейшие исследования выполнялись на образцах с применением адгезионного подслоя титана. Результаты измерений адгезионной прочности покрытия с адгезионным подслоем и без него показаны на Рисунке 3.

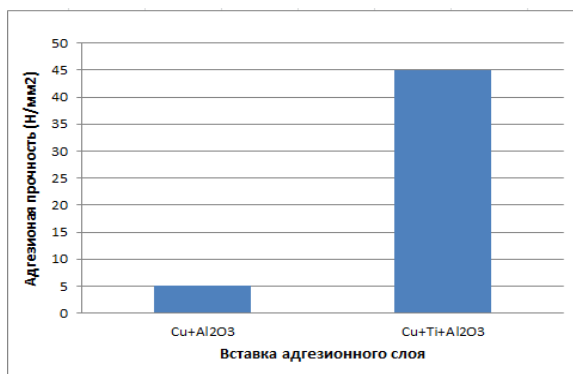


Рисунок 3. Влияние подслоя титана на адгезионную прочность покрытия меди на подложке оксида алюминия

Вторая серия экспериментов была направлена на выявление зависимости адгезионной прочности от режимов работы магнетронной распылительной системы при нанесении адгезионного подслоя. Были проведены серии экспериментов при работе магнетронной распылительной системы в режиме постоянного тока, а также в импульсном режиме при различных параметрах частоты и скважности импульсов. Было установлено, что при работе магнетронной распылительной системы наилучшие значения адгезионной прочности показали образцы, полученные на частоте импульсов 90 кГц при коэффициенте заполнения 70%. Адгезионная прочность этих образцов составила 41 МПа. Уменьшение частоты импульсов при сохранении коэффициента заполнения приводит к незначительному снижению прочности. Снижение же коэффициента заполнения приводит к потере адгезионной прочности покрытия и сводит на нет эффект от адгезионного подслоя. Результаты этой серии экспериментов показаны на Рисунке 4.

Третья серия экспериментов была направлена на выявление влияния давления в вакуумной камере при нанесении адгезионного подслоя на прочность покрытия. Давление в камере регулировалось за счет изменения пода-

чи рабочего газа аргона. Наилучшие значения адгезионной прочности показали образцы, полученные при работе магнетронной распылительной системы в режиме постоянного тока при давлении $8,8 \cdot 10^{-2}$ мбар. Адгезионная прочность этих образцов составила 62 МПа. Результаты этой серии экспериментов показаны на Рисунке 5.

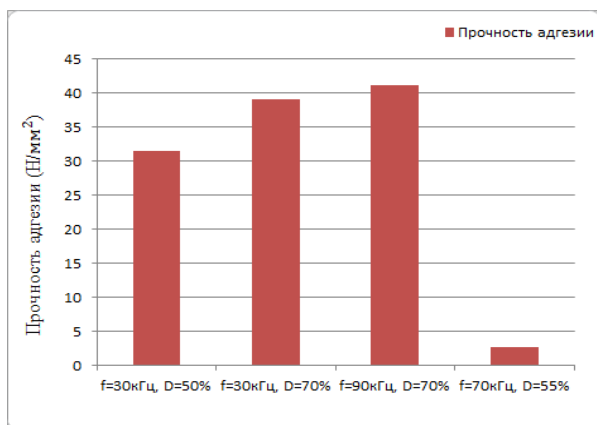


Рисунок 4. Влияние параметров импульсного режима работы магнетронной распылительной системы при нанесении подслоя на адгезионную прочность покрытий

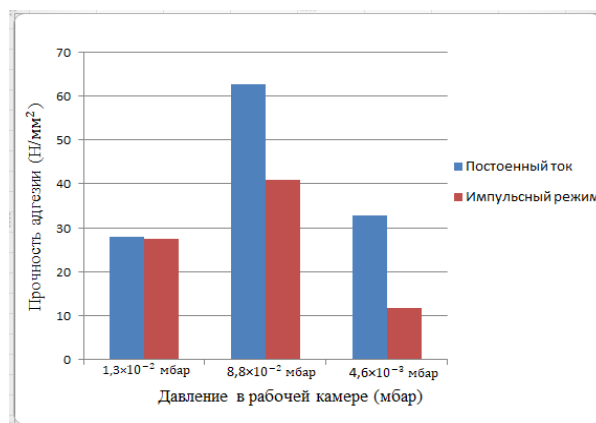


Рисунок 5. Влияние давления в вакуумной камере при нанесении подслоя на адгезионную прочность покрытий

Все дальнейшие исследования проводились с параметрами режима, показавшими наилучший результат по адгезионной прочности.

В четвертой главе представлены результаты исследований по выявлению температурного воздействия на подложки в процессе нанесения, а также зависимости адгезионной прочности получаемых покрытий от положения подложки относительно мишени магнетронной распылительной системы во время нанесения адгезионного подслоя.

Были проведены измерения зависимости температуры подложки от времени формирования покрытия титана с помощью магнетронной распылительной системы с горячей мишенью. Полученные результаты представлены на Рисунке 6. Выявлено, что для используемой конфигурации оборудования диапазон значений температуры подложки во время нанесения адгезионного подслоя с использованием горячей мишени составляет от 180 °С до 220 °С. Установлено, что на начальном этапе формирования покрытия наблюдается резкий рост температуры подложки, что может приводить к разрушению подложки.

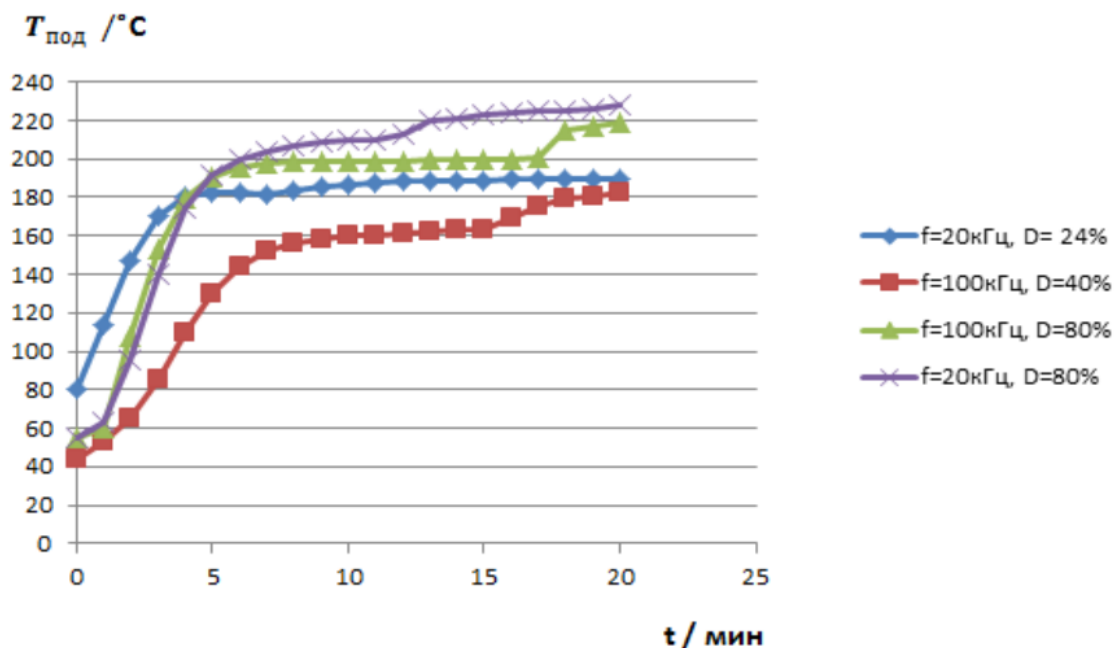


Рисунок 6. Зависимость температуры подложки от времени формирования покрытия

Была спроектирована и изготовлена специальная оснастка, позволяющая размещать подложки на различном расстоянии и под разными углами относительно магнетронной распылительной системы. Это позволило регулировать температурное воздействие на подложку со стороны магнетронной распылительной системы. При удалении подложки от мишени и увеличении угла расположения подложки относительно мишени магнетронной распылительной системы снижается температурное воздействие на подложку и растущую пленку, а также происходит снижение скорости роста покрытия.

Чтобы оценить влияние расстояния от мишени до подложки на скорость роста и шероховатость получаемых покрытий проводились измерения толщины и шероховатости. Было установлено, что для используемого диапазона расстояний от 25 до 60 мм при давлении в камере равном 1,5 Па не происходит заметного снижения скорости формирования адгезионного подслоя. Снижение скорости роста покрытий происходит при размещении подложки на расстоянии от 60 до 100 мм от мишени. В процессе проведения исследований было установлено, что шероховатость получаемого адгезионного подслоя зависит от положения и угла наклона подложки относительно мишени и лежит в диапазоне от 1 до 10 мкм. Полученная зависимость шероховатости от угла наклона представлена на Рисунке 7.

Образцы покрытий были исследованы на адгезию при помощи метода сетчатых надрезов. Внешний вид разрушения покрытий до и после испытаний представлен в Таблице 3. Покрытия, полученные в непосредственной близости от мишени, показали низкие значения адгезионной прочности, которые составили от 3 до 4 баллов в соответствии с ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013).

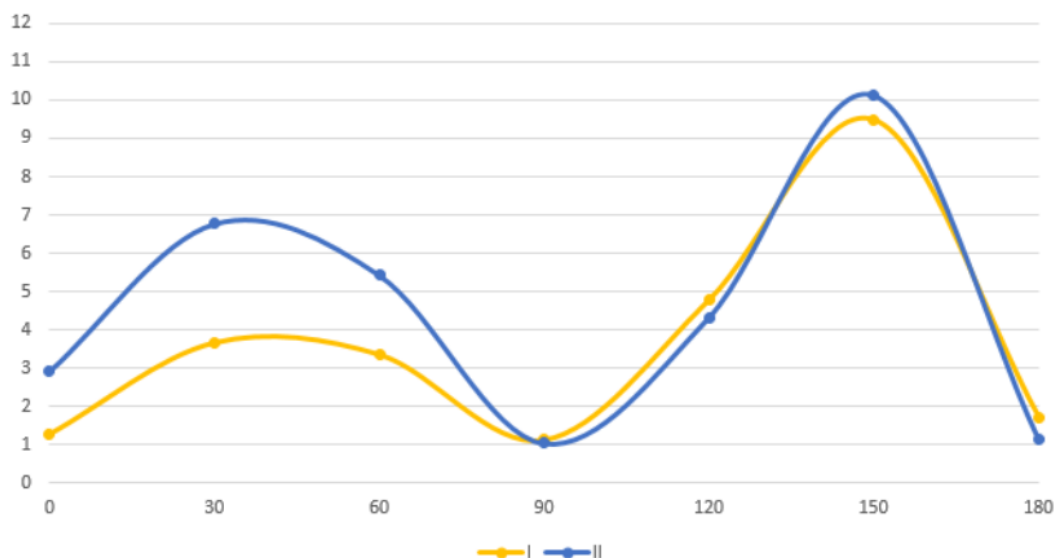


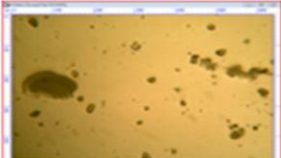
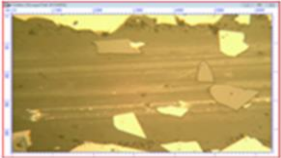






Рисунок 7. Зависимость шероховатости адгезионного подслоя Ti от угла наклона относительно магнетронной распылительной системы

Повреждения на них видны еще до проведения испытаний. Наилучший результат показали покрытия под углом 60° и 180° по отношению к мишени. Измерения шероховатости показало, что наименьшую шероховатость покрытия имели образцы, полученные под углом 30° и 60° . Однако, с увеличением расстояния от подложки до мишени резко падает скорость роста покрытия. На основании полученных данных были определены диапазоны расстояний и значения угла, позволяющие определить положение подложки относительно мишени для обеспечения высокой адгезионной прочности и скорости роста покрытия.

Таблица 3.

Внешний вид полученного покрытия после нанесения и после проведения испытаний по методу сетчатых надрезов

Положение подложки (расстояние до мишени/мм, угол)	Вид покрытия после нанесения	Вид покрытия после испытаний	Адгезионная прочность по ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013), балл
60/90°			3
75/30°			4
90/60°			2
110/180°			0

В заключение приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. Определено, что наиболее перспективным методом для получения покрытий в силовых электронных модулях и электровакуумных приборах является использование вакуумных методов, таких как магнетронное распыление и термическое испарение. Для увеличения скорости нанесения покрытий возможно использование указанных методов в сочетании с методом пароструйного осаждения.

2. Использование магнетронных распылительных систем с горячей мишенью может приводить к разрушению подложки на начальной стадии формирования покрытия.

3. Шероховатость адгезионного подслоя титана влияет на адгезионную прочность токопроводящего слоя меди на подложке оксида алюминия. Минимальные значения шероховатости $Ra < 2,0$ мкм, необходимые для достижения максимальных значений адгезионной прочности до 60 МПа, могут быть получены при расположении подложки относительно магнетрон-

ной распылительной системы под углом 90° и 180° при расстоянии от мишени до подложки от 25 до 60 мм.

4. Использование разработанной лабораторной установки формирования покрытий позволяет проводить отработку технологии формирования двухслойных покрытий в едином вакуумном цикле. Модульная конструкция установки обеспечивает мобильность и позволяет легко расширять состав технологических методов во время исследований.

5. Установка может быть использована для проведения исследований и в учебном процессе при подготовке специалистов по направлениям «Электроника и наноэлектроника» и «Наноинженерия».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В журналах ВАК РФ и SCOPUS

1. L L Kolesnik, T S Zhuleva, P O Predtechenskiy, Myo Kyaw Hlaing and 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 // Нано-индустрия. 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 and 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)

В других изданиях и сборниках трудов конференций

1. Мьо Чжо Хлаинг. Анализ возможностей применения кластерных ионов для уменьшения шероховатости поверхности // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, (7-10 Апреля) 2015. № гос. Регистрации 0321501427.– URL: http://studvesna.ru/db_files/articles/1366/article.pdf. (0,34 п.л/ 0,34 п.л)

2. Л. Л. Колесник, Мьо Чжо Хлаинг. Анализ возможностей применения кластерных ионов для обработки поверхности // Вакуумная наука и техника. Тезисы докладов XXII научно технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым, 2015. С. 191-195. (0,36 п.л/ 0,18 п,л)
3. Колесник Л.Л., Мьо Чжо Хлаинг, Зао 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)
4. Л. Л. Колесник, 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)
5. Л. Л. Колесник, Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг, Мьо Мин Латт. Отработка технологии металлизации керамических подложек двумя методами // 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)
6. Колесник Л.Л., Жулева Т.С., Предтеченский П.О., Мьо Чжо Хлаинг, Зао Пхо Аунг Отработка технологии металлизации алюмооксидной керамики для элементов электровакуумных приборов и устройств силовой электроники // 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)
7. Л. Л. Колесник, Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг, Мьо Мин Латт. Повышение адгезии токопроводящих покрытий на подложках оксида алюминия // 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)
8. Л. Л. Колесник, Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг, Мьо Мин Латт. Влияние технологического развития на повышение адгезионной прочности металлических тонкопленочных покрытий на керамические подложки оксида алюминия // 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)