

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права
УДК 544.163.2-034.2:621.382.2/3

БОГУШ
Наталья Валерьевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
СЕРЕБРО-ВОЛЬФРАМ ДЛЯ УСТРОЙСТВ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – технология и оборудование
для производства полупроводников, материалов и приборов
электронной техники

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Хмыль Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, Почетный профессор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Гребчиков Сергей Степанович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Андрухович Ирина Михайловна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорики государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «11» декабря 2025 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 3 » ноября 2025 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат технических наук, доцент



Г.А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Создание функциональных слоев и покрытий для полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и изделий радиоэлектроники с различными характеристиками неразрывно связано с развитием современных технологических процессов, а также совершенствованием оборудования для их реализации. Формируемые методами электрохимического осаждения покрытия на основе драгоценных металлов (золота, серебра и др.) характеризуются химической стойкостью, высокой отражательной способностью, электропроводностью и износоустойчивостью.

Гальванические покрытия на основе серебра используются в качестве основы в электроконтактах различных микроэлектронных и других устройств, проводящих поверхностях СВЧ-устройств, авиастроении (покрытия для резьбовых соединений и замков лопаток турбин), ювелирной промышленности, медицине и многих других отраслях.

Одной из проблем в производстве изделий, содержащих покрытия на основе серебра и его сплавов, является выбор неагрессивных электролитов, поскольку в данной технологии широко распространены составы на основе цианидного комплекса. Замена данного типа электролитов на другие не всегда приводит к получению покрытий с требуемым качеством. Среди наиболее перспективных электролитов выделяют растворы, основанные на использовании аммиачных комплексов серебра. Однако их стабильность и характеристики получаемых тонкопленочных осадков изучены недостаточно.

Для улучшения свойств покрытий широко используются нестационарные методы осаждения (применение импульсных токов, введение ультразвука в зону осаждения и др.).

Эксплуатационные характеристики металлических покрытий определяются их структурой и элементным составом, технологическими особенностями, параметрами осаждения и последующей обработки. Для повышения твердости и износостойкости покрытий в состав металлического слоя с высокой удельной электрической проводимостью вводят различные примеси, такие как тугоплавкие металлы, ультрадисперсные алмазы, углеродные нанотрубки и др. Среди тугоплавких металлов наиболее доступным и перспективным является вольфрам, обладающий максимальной температурой плавления. Введение вольфрама в водный электролит возможно с использованием растворимых солей вольфрамовой кислоты. При этом электродные процессы в таких электролитах детально не исследованы, что необходимо для выработки технологических рекомендаций.

В связи с вышеизложенным установление основных закономерностей электродных процессов в стационарных и нестационарных режимах

электрохимического серебрения путем введения вольфрама в формируемые покрытия, определение характеристик их износоустойчивости и стабильности является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (пункт 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы»).

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1) «Разработка нового композиционного материала на основе серебра с высокой электроэрозионной стойкостью для высоковольтных электрических контактов и технологии его получения» ГКПНИ «Химические реагенты и материалы», 2008–2010 гг., № ГР 2008079;

2) «Разработка и получение микрослоистых нанокомпозитов на основе серебра с улучшенными трибологическими свойствами на периодических токах» ГППИ «Композиционные материалы», 2009–2011 гг., № ГР 20093377;

3) «Формирование многослойных тонкопленочных покрытий на основе серебра и олова с улучшенными физико-механическими характеристиками для электрических контактов на программируемых режимах электролиза» ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», 2011–2013 гг., № ГР 20113893;

4) «Разработка процесса получения нанокомпозиционных тонкопленочных материалов на основе серебра и оксидов тугоплавких металлов для электрических контактов в условиях ультразвукового стимулирования» ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», 2011–2013 гг., № ГР 20113901;

5) «Разработка и исследование процесса формирования композиционных серебряных покрытий на электрических контактах в условиях нестационарного электролиза при введении в электролит активирующих добавок и ультразвуковых колебаний» ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», 2014–2015 гг., № ГР 20142480;

6) «Получение композиционных порошковых структур на основе переходных металлов, исследование их поглощающих свойств в СВЧ-диапазоне» ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», 2016–2020 гг., № ГР 20163864.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель – установить закономерности электрохимического осаждения композиционных покрытий серебро-вольфрам из сульфатно-аммониевого электролита в стационарных и нестационарных режимах, в том числе при воздействии ультразвуковых колебаний, а также определить свойства формируемых пленок для их применения в технологических процессах создания компонентов изделий электронной техники.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ состояния фундаментальных и прикладных исследований в области применения методов электрохимического осаждения серебросодержащих покрытий из водных растворов, сопровождаемого формированием новых композиционных материалов, и перспектив их применения в качестве конструктивных элементов изделий электронной техники;

- разработаны методики и определены в рамках экспериментальных исследований режимы осаждения пленок серебро-вольфрам из растворов сульфатно-аммониевого электролита с добавкой вольфрамата натрия для различных типов функциональных покрытий;

- предложена аналитическая модель процессов массопереноса в электролите серебрения при формировании композиционных покрытий серебро-вольфрам в условиях стационарного и нестационарного электролиза;

- исследованы состав, структура покрытий на основе серебра в различных режимах осаждения, использующих постоянный и импульсный токи, при воздействии ультразвуковых колебаний и различное содержание вольфрамата натрия в сульфатно-аммониевом электролите, исследованы зависимости таких свойств, как твердость, износостойкость, электросопротивление, паяемость, коррозионная стойкость покрытий серебро-вольфрам от режимов осаждения;

- разработаны рекомендации по практическому применению процессов электроосаждения покрытий серебро-вольфрам для создания конструктивных элементов изделий электронной техники, обеспечивающих необходимые функциональные характеристики (электропроводность, микротвердость, коррозионная стойкость, износостойкость, коэффициент трения, паяемость).

Объект исследования – сульфатно-аммониевый электролит для формирования тонкопленочных покрытий в стационарных и нестационарных режимах осаждения, а также при воздействии ультразвуковых колебаний.

Предмет исследования – электрофизические, механические, структурные, трибологические, антикоррозионные свойства покрытий серебро-вольфрам, а также кинетика процессов, закономерности изменения этих свойств в зависимости от концентрации вольфрамата натрия

в электролите, режимов осаждения и параметров ультразвукового воздействия на процесс осаждения.

Научная новизна

1. Предложенная аналитическая модель описания процесса массопереноса на постоянном и импульсном токе в сульфатно-аммониевом электролите серебрения, содержащем растворимую соль вольфрамата натрия с концентрацией 3,5 г/л, учитывающая электрохимические равновесия и значения термодинамических констант нестойкости, позволила установить кинетические особенности перехода в системе «электролит – твердое тело» и предельную плотность тока электролиза ($2,01 \text{ А/дм}^2$) при формировании композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам.

2. Экспериментальное обоснование комплексного механизма включения вольфрама в структуру электрохимических покрытий серебро-вольфрам, при котором ионы WO_4^{2-} восстанавливаются до металлического вольфрама на катоде, и адсорбционного механизма, при котором оксиды вольфрама не участвуют в токообразующей реакции, а поверхность серебра характеризуется положительным зарядом и облегчает адсорбцию анионов, что экспериментально подтверждено повышением катодной поляризации при изменении стационарного потенциала и полулогарифмической зависимостью концентрации вольфрама в электролите от его содержания в покрытии, а также результатами исследования выхода по току и элементного состава.

3. Экспериментально установлены закономерности формирования композиционных электрохимических покрытий с применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия, с использованием которых установлена взаимосвязь между параметрами постоянных, импульсных и реверсированных токов и кинетическими особенностями проведения такого процесса, составом и структурой покрытий и с учетом которых установлено содержание вольфрама в указанных покрытиях (0,7–3,05 мас.%), при котором они характеризуются повышенной на 20–100 % микротвердостью и увеличенной в 2–7 раз износостойкостью по сравнению с серебряными покрытиями, сформированными с применением сульфатно-аммониевого электролита.

4. Экспериментально установлены закономерности формирования композиционных электрохимических покрытий в режиме постоянного тока с применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия при ультразвуковой активации (частота 38 кГц, мощность акустическая 15 Вт, интенсивность активации от 0,07 до $1,28 \text{ Вт/см}^2$) указанного электролита, что позволило повысить содержание вольфрама в покрытии в 2 раза, микротвердость на 90 %, снизить объемный износ в 2 раза

и контактное электросопротивление до 30 %, повысить коррозионную стойкость до 30 %.

Положения, выносимые на защиту

1. Методики и оптимальные технологические режимы формирования покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама от 0,8 до 3,0 мас.%, основанные на впервые предложенном использовании вольфрамата натрия с содержанием от 3,5 до 35 г/л в сульфатно-аммониевом электролите с концентрацией AgNO_3 – 35 г/л; сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 170 г/л; аммиака NH_4OH – 20 г/л (25 %), pH 9–10, плотность тока от 0,3 до 1,5 А/дм², что позволяет формировать пленки с проводимостью от 5,4 до $13,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, с увеличенной в 2,5 раза по сравнению с использованным электролитом с вольфраматом калия.

2. Методики и оптимальные технологические режимы формирования тонкопленочных покрытий серебро-вольфрам электрохимическим осаждением с впервые использованными режимами импульсного тока со средней плотностью 0,7 А/дм² и частотой импульсов от 10 до 1000 Гц, а также реверсированного тока со средней плотностью 0,7 А/дм² и частотой импульсов от 1 до 1000 Гц, применение которых обеспечивает возможность формирования покрытий, характеризующихся повышенной от 20 до 100 % микротвердостью и увеличенной от 2 до 7 раз износостойкостью по сравнению с серебряными покрытиями, сформированными с применением сульфатно-аммониевого электролита в режиме постоянного тока.

3. Экспериментально установленные характеристики полученных методом электрохимического осаждения композиционных покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама в пределах от 0,70 до 3,05 мас.% с применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия в режиме постоянного тока с плотностью от 0,3 до 1,5 А/дм² с учетом предложенного дополнительного ультразвукового воздействия с частотой 38 кГц, акустической мощностью 15 Вт, интенсивности (амплитуды) ультразвука в диапазоне от 0,07 до 1,28 Вт/см², что позволяет в 2 раза повысить содержание вольфрама в формируемой пленке, увеличить микротвердость на 90 % и коррозионную стойкость до 30 % соответственно, а также снизить объемный износ в 2 раза и контактное сопротивление до 30 % по сравнению с покрытиями, сформированными с применением аналогичного электролита в режиме постоянного тока.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, заключающийся в разработке подходов и методик, получении, интерпретации и анализе результатов исследований. Совместно с научным руководителем доктором технических наук, профессором А. А. Хмылем определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Соискатель самостоятельно осуществляла проведение экспериментов, изготовление образцов, контроль параметров, а также их подготовку ко всем видам исследований. Анализ структуры и элементного состава образцов проводился при участии старшего научного сотрудника Л. К. Кушнер (БГУИР). Разработка математической модели и расчет зародышеобразования проводились при участии заведующего научно-исследовательской лабораторией «Функциональные пленочные системы» кандидата технических наук, старшего научного сотрудника И. И. Кузьмар. Исследование механических характеристик проводилось лично. Электрические характеристики измерялись автором лично и с участием доцента кафедры электронной техники и технологии С. М. Завадского (БГУИР). Соискатель принимала непосредственное участие в написании статей, подготовке и презентации докладов.

Совместно с соавторами публикаций Н. В. Дежкуновым, В. А. Вакульчиком, В. К. Василец (Бранцевич), М. М. Борисик и Д. В. Гульпой осуществлялись подготовка и проведение исследований, обсуждались полученные результаты. В работе над монографией принимали участие В. Л. Ланин, А. П. Достанко. Соавторы патента № 11795 Л. М. Лыньков и О. В. Бойправ. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства связи» (г. Минск, 2004); Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Минск, 2009, 2010, 2011, 2012); IX Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (г. Минск, 2010); Международный симпозиум «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы,

сварка» (г. Минск, 2011); Республиканский научно-технический семинар «Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий» (г. Минск, 2011, 2014); 48-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Моделирование, компьютерное проектирование и технология производства электронных средств» (г. Минск, 2012); Международный симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка» (г. Минск, 2013); Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (г. Минск, 2014); Международная научно-техническая конференция «Современные электрохимические технологии и оборудование» (г. Минск, 2016); Международная научно-техническая конференция «Intermatic – 2016» (г. Москва, 2016).

Полученные результаты использованы при реализации технологии осаждения композиционных покрытий для электропроводящих элементов электронной техники с улучшенной износостойкостью, а также внедрены в учебный процесс кафедры электронной техники и технологии БГУИР.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 28 научных работ общим объемом 9,4 авторского листа. Из них глава в монографии объемом 1,0 авторского листа, 7 статей объемом 3,7 авторского листа в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 19 статей в сборниках материалов конференций объемом 4,5 авторского листа, получен 1 патент Республики Беларусь на полезную модель объемом 0,2 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 2 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 147 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 28 наименований. Общий объем – 137 страниц, в том числе 64 рисунка на 25 страницах, 17 таблиц на 6 страницах, 2 приложения на 2 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе показана перспективность электрохимического осаждения пленок композиционных на основе серебра для создания конструктивных элементов электронной техники – контактов, покрытий

высокопроводящих, защитных покрытий и т.д. Введение вольфрама в формируемые покрытия на основе серебра представляется перспективной задачей, так как позволяет использовать неагрессивные электролиты и формировать пленки с улучшенными функциональными характеристиками (микротвердость, паяемость, износоустойчивость). При этом установлено, что механизмы электрохимического формирования практически не изучены и поведение растворов и свойств пленок в зависимости от режимов осаждения также не изучены. Практически отсутствуют сведения о том, как влияют на параметры пленок состав электролита и условия осаждения при использовании нестационарных условий осаждения (импульсные и реверсированные режимы, ультразвуковое воздействие), что весьма перспективно для управления структурой и свойствами покрытий. Таким образом, важным и актуальным является проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на установление закономерностей электрохимического осаждения композиционных покрытий на основе серебра в стационарных и нестационарных режимах, в том числе с включением вольфрама и при воздействии на электролит ультразвуковых колебаний, а также разработка технологии электрохимического осаждения пленок серебро-вольфрам, изучение механических, электрических, коррозионных свойств формируемых пленок и выработка практических рекомендаций для их применения в процессе создания компонентов изделий электронной техники.

Во **второй главе** представлены описания процессов подготовки образцов из медьсодержащих материалов для подложек, используемых для осаждения покрытий серебро-вольфрам, описан процесс и условия осаждения в различных режимах электролиза. Сделано описание основного оборудования для проведения экспериментальных исследований.

Представлено краткое описание основного контрольно-измерительного оборудования для контроля толщины покрытий, определения выхода металла по току, измерения электрофизических характеристик (удельное электросопротивление, контактное электросопротивление), микротвердости (микротвердометр ПМТ-3М, «ЛОМО», Россия), трибологических свойств, коррозионных свойств, кинетических закономерностей (трехэлектродная электрохимическая ячейка с использованием потенциостата ПИ-50-1.1, СССР, хлорсеребряный электрод сравнения), химического состава (рентгенофлуоресцентный спектрометр «ElvaX», «Елватех», Украина).

Для исследования структуры применялись сканирующий электронный микроскоп, рентгенофлуоресцентные методы энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (растровый электронный микроскоп

РЭМ S-4800, «Hitachi», Япония), электронная микроскопия (микроскоп ЭМ-125, «Электрон», Украина).

Для изучения процессов массопереноса при электрохимическом осаждении покрытий Ag-W из сульфатно-аммониевого электролита предложена аналитическая модель в виде матрицы состава с учетом электрохимических равновесий и термодинамических констант нестойкости (стационарный электролиз). Предложена система уравнений для описания общего переноса тока по металлу и водороду в плоскости, перпендикулярной поверхности электрода в процессе электролиза в зависимости от плотности тока. Численное решение системы уравнений проводилось с использованием программы Mathcad 7.0 Prof.

Анализ полученных аналитических зависимостей распределения концентраций ионных и молекулярных форм серебра, аммония, вольфрамат-ионов, сульфат-ионов в зависимости от pH электролита показал, что кинетика электроосаждения серебра характеризуется смешанным характером, а расчетное значение предельной диффузионной плотности тока катодного процесса равна $\sim 2,05$ А/дм².

Для изучения процессов массопереноса при использовании электроосаждения покрытий Ag-W в сульфатно-аммониевом электролите предложена аналитическая модель зависимости концентраций разряжающихся ионов на поверхности электрода и в диффузионных слоях от амплитуды и частоты импульсов периодического тока (нестационарный электролиз). Для катодного процесса предельная диффузионная плотность тока i_d определяется по формуле (1):

$$i_d = \frac{zFD[C_i]^0}{(1 - n_k)\delta}, \quad (1)$$

где z – заряд ионов, Кл; F – число Фарадея, 9,648 Кл/моль; D – коэффициенты диффузии ионов, м²/с; $[C_i]^0$ – концентрации i -го компонента в объеме электролита, моль/л; n_k – число переноса ионов Me^+ ; δ – толщина диффузионного слоя, м.

С использованием уравнения нестационарной диффузии, дополненной начальными и граничными условиями, получены расчетные концентрационные изменения в прикатодном слое электролита серебрения. Показано, что использование импульсных токов может привести к повышению эффективности осаждения за счет изменений концентрации ионов в прикатодном слое электролита.

В третьей главе представлены экспериментально установленные зависимости изменения стационарного потенциала катода (латунь с покрытием из серебра) от концентрации вольфрамата натрия в электролите.

На рисунке 1 показана зависимость величины стационарного потенциала от концентрации $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите.

Изучены зависимости изменения катодного потенциала с повышением тока осаждения для сульфатно-аммониевого электролита с концентрацией вольфрамата натрия 3,5–35 г/л.

Установлено, что с изменением концентрации соли от 0 до 35 г/л наблюдается смещение стационарного потенциала в отрицательную область от 0,375 до 0,315 В с дальнейшей его стабилизацией в диапазоне концентрации 5–35 г/л соли вольфрама.

На рисунке 2 показано, что полученные в различных режимах осаждения (без и с перемешиванием) зависимости («1» – без $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите, без перемешивания; «2» – без $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите, УЗК; «3» – 3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, без перемешивания; «4» – 3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, УЗК; «5» – 3,5 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, с перемешиванием) позволяют сделать вывод, что второй предельный ток вызван диффузионным перенапряжением.

Показано, что при воздействии ультразвука на электролит серебрения во время осаждения наблюдается уменьшение катодной поляризации, обусловленное концентрационными эффектами, т. е. аналогично воздействию перемешивания (см. рисунок 2). В результате исследований временной зависимости (0–100 с) плотности тока осаждения 0,3–1,5 А/дм² и при введении вольфрамата натрия в электролите (3,5–35 г/л) установлено значительное изменение потенциала осаждения от 0,32 до 0,15 В.

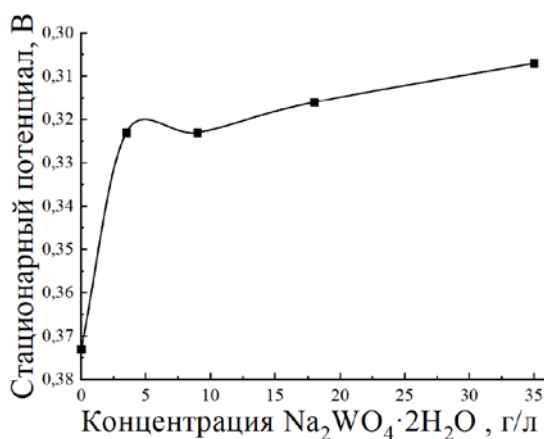


Рисунок 1 – Зависимость величины стационарного потенциала от концентрации $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите

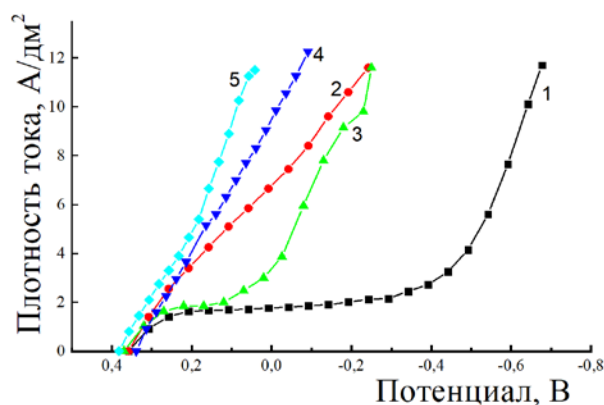
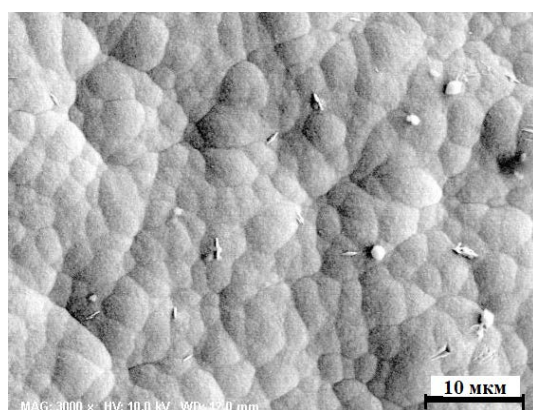


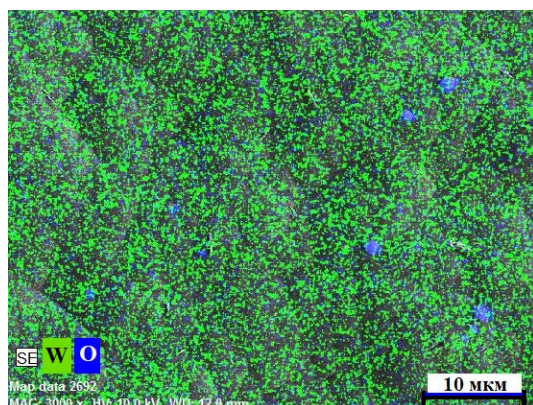
Рисунок 2 – Катодные поляризационные кривые в зависимости от условий электролиза

С использованием методов регрессионного анализа и теоретических подходов электрохимии (теория Эрдей-Груза и Фольмера) проведены расчеты параметров зародышеобразования при осаждении серебряных покрытий и покрытий серебро-вольфрам. Установлено, что с увеличением плотности тока и концентрации вольфрамата натрия в электролите возрастает перенапряжение катода и уменьшается радиус зародыша до 3 раз и, соответственно, формируется более плотным и устойчивым к внешним воздействиям осадок. При этом зависимость снижения радиуса зародыша при увеличении плотности тока осаждения характеризуется как линейная.

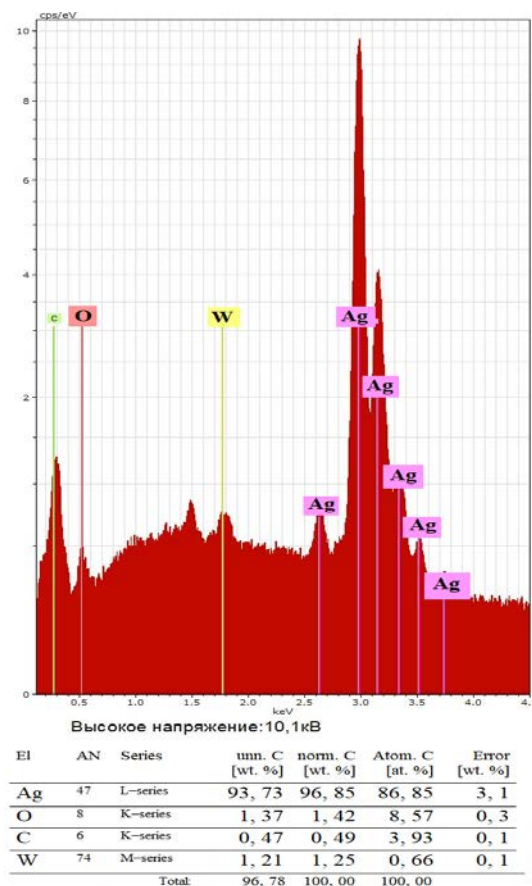
С использованием рентгенофлуоресцентной спектроскопии изучено влияние условий формирования осадков на состав покрытий серебро-вольфрам. На рисунке 3 представлена структура, результаты анализа элементного состава и поверхностное распределение элементов W, O в покрытии серебро-вольфрам (9 г/л $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $i = 0,3 \text{ А/дм}^2$).



a



б



в

a – структура покрытия серебро-вольфрам; *б* – поверхностное распределение элементов W, O в покрытии серебро-вольфрам; *в* – элементный состав W, O в покрытии серебро-вольфрам

Рисунок 3 – Структура, элементный состав Ag, W, O в покрытии серебро-вольфрам

Показано, что с увеличением концентрации вольфрамата натрия с 1,5 до 35 г/л содержание вольфрама в осажденных покрытиях изменяется от 0,8 до 3,0 мас.%. Использование импульсного тока осаждения приводит к увеличению содержания вольфрама в формируемом покрытии от 0,70 до 2,16 мас.%.

Исследование структурных особенностей поверхности формируемых покрытий серебро-вольфрам с использованием сканирующего электронного микроскопа показывает изменение размера зерен от 3 до 0,4 мкм (при токах осаждения 0,3–1,0 А/дм²).

Установлено, что увеличение концентрации соли вольфрамата натрия в электролите приводит к уменьшению размера кристаллов до 0,4–0,5 мкм при плотности тока $i = 0,7$ А/дм². Повышение плотности тока осаждения (более 0,7 А/дм²) приводит к формированию иглообразных осадков при концентрации 3,5 г/л, которые не образуются при концентрации соли вольфрамата натрия 9 г/л.

Установлено, что применение импульсного тока (частоту импульсного тока изменяли от 10 до 1000 Гц, амплитудную плотность тока – от 1 до 10 А/дм², длительность импульса и паузы – от 0,1 до 100 мс) приводит к формированию более мелкокристаллических осадков, чем при постоянном токе, а с увеличением частоты до 100 Гц происходит формирование крупнокристаллической поверхности с размером зерен до 2 мкм).

Показано, что введение УЗ-колебаний в электролит (интенсивность от 0,07 до 1,28 Вт/см²) приводит к снижению размера зерен от 1,5 до 0,8 мкм.

В **четвертой главе** представлены результаты изучения влияния концентрации вольфрамата натрия в электролите серебрения и режимов осаждения покрытий серебро-вольфрам на микротвердость покрытий на основе серебра (таблица 1).

Таблица 1 – Зависимость микротвердости покрытий серебро-вольфрам от условий их формирования

Концентрация Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O, г/л	Плотность тока, А/дм ²	Микро- твердость, МПа	Концентрация Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O, г/л	Плотность тока, А/дм ²	Микро- твердость, МПа
0	0,7	1110	3,5	0,7	1720
1,5	0,7	1680	3,5	1,0	1250
3,5	0,7	1720	3,5	1,5	1160
5	0,7	1750	3,5	2,0	640
9	0,7	1900	9	0,3	2330
20	0,7	1870	9	0,5	1850
35	0,7	1880	9	0,7	1840
3,5	0,3	2020	9	1,0	1540
3,5	0,5	1950	9	1,5	1750

Установлено, что повышение микротвердости покрытий от 640 до 2300 МПа происходит при введении в электролит вольфрамата натрия от 3,5 до 35 г/л (в режиме постоянного тока), от 1300 до 2300 МПа (в режиме импульсных токов осаждения) и от 1110 до 2100 МПа (в режиме реверсированного тока осаждения). Электроосаждение с применением ультразвука приводит к получению плотных однородных, мелкокристаллических осадков с повышенной микротвердостью до 2200 МПа.

Проведено исследование трибологических свойств покрытий на основе серебра, полученных на постоянном и импульсном токе осаждения. На рисунке 4 представлена зависимость влияния состава электролита на износостойкость покрытий серебро-вольфрам ($i = 0,7 \text{ А/дм}^2$).

Показано, что при изменении параметров импульсного тока величина объемного износа покрытий серебро-вольфрам изменяется от $3,85 \cdot 10^{-6}$ до $0,62 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$.

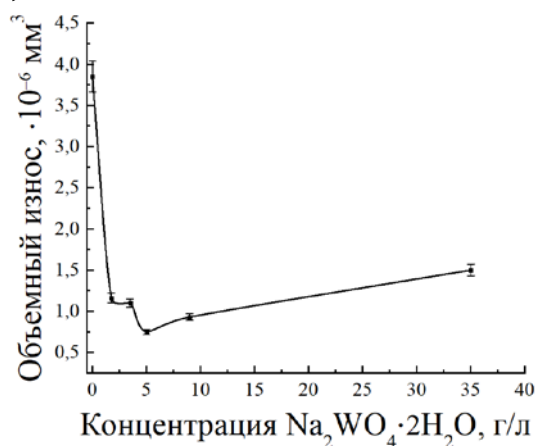


Рисунок 4 – Зависимость износостойкости осадков серебро-вольфрам от концентрации $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в электролите

Установлено, что введение в электролит вольфрамата натрия приводит к возрастанию величины удельного сопротивления формируемых покрытий серебро-вольфрам от 6 до 13 мкОм·см. При этом удельное электросопротивление серебряных покрытий составляет 3 мкОм·см. На рисунке 5 представлена зависимость величины удельного электросопротивления покрытий серебро-вольфрам от концентрации вольфрамата натрия в электролите ($i = 0,7 \text{ А/дм}^2$).

Показано, что предложенная термообработка покрытий серебро-вольфрам приводит к снижению удельного электросопротивления от 7 до 3,8 мкОм·см. Исследование влияния режимов осаждения покрытий серебро-вольфрам на величину контактного электросопротивления показало, что в зависимости от режимов осаждения имеется возможность формирования покрытий с контактным электросопротивлением от 1,7 до 3,1 мОм. При этом контактное электросопротивление покрытия без вольфрама составляет 1,8 мОм.

Проведено исследование влияния плотности тока и ультразвука разной интенсивности при осаждении покрытий серебро-вольфрам на их коррозионную стойкость. Установлено, что введение вольфрама в покрытие приводит к уменьшению скорости коррозии до 50 % по сравнению с серебряным покрытием в зависимости от режимов осаждения. Показано, что воздействие ультразвука на

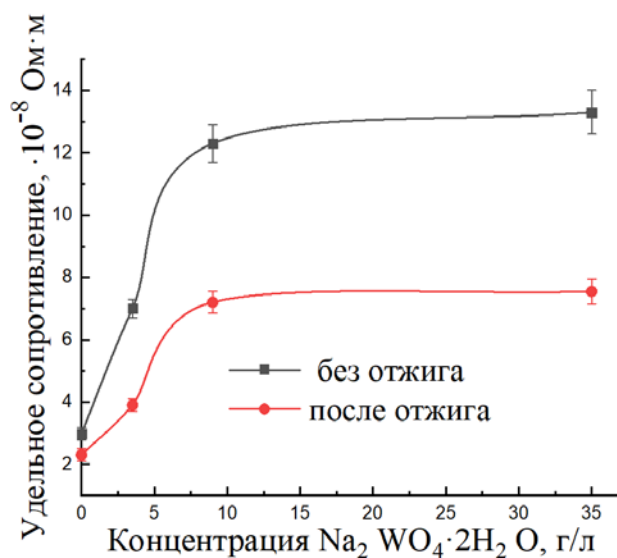


Рисунок 5 – Зависимость величины удельного электросопротивления покрытия серебро-вольфрам от концентрации вольфрамата натрия в электролите

характеристик процесса. Согласно расчетным данным для формирования качественных гальваноосадков при нестационарном электролизе амплитудное значение плотности тока не должно превышать $2,051 \text{ А/дм}^2$, скважность импульсов равна 5, длительность импульса не должна превышать $\tau_{\text{и}} \leq 95 \text{ мс}$.

Разработаны технологические рекомендации по получению покрытий серебро-вольфрам с улучшенными эксплуатационными свойствами и определены оптимальные режимы осаждения покрытий серебро-вольфрам для контактных систем, оптимальные режимы осаждения покрытий серебро-вольфрам для паяных контактных систем и оптимальные режимы осаждения покрытий серебро-вольфрам для изготовления экранов электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

Разработан технологический маршрут получения покрытий серебро-вольфрам, заключающийся в следующих стадиях: химическая подготовка образцов, выставление требуемой величины катодного тока, проведение процесса осаждения покрытий серебро-вольфрам, промывка образцов, сушка образцов с покрытием.

Изделия с покрытием серебро-вольфрам, осажденным при воздействии ультразвуковых колебаний ($0,07 \text{ Вт/см}^2$) с высокой проводимостью, могут быть применены для СВЧ-устройств. Изделия с покрытиями серебро-вольфрам, осажденными в импульсном токе (частота 100, скважность импульсов 1,25), реверсированном токе (соотношение длительности прямого и обратного импульса 100:10 мс), могут быть применены для изготовления разъёмных контактов с повышенной износостойкостью.

электролит при осаждении приводит к уменьшению скорости коррозии покрытий до 60 % в зависимости от интенсивности ультразвука. Проведено исследование паяемости покрытий серебро-вольфрам.

Установлено, что коэффициент растекания припоя для образцов с серебряным покрытием составлял 87 % и менялся от 67 до 89 % в зависимости от режимов осаждения покрытий. Проведена оптимизация режимов электроосаждения покрытий серебро-вольфрам из сульфатно-аммониевого электролита с использованием поляризационных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате математического моделирования процессов массопереноса в электролите серебрения, содержащем вольфрамат натрия, основанного на значениях термодинамических констант нестойкости, проведен расчет зависимости концентрации ионов на электродах и в диффузионных слоях в условиях стационарного и нестационарного электролиза. Отмечено, что наиболее эффективным и перспективным для получения покрытий является электролит ($\text{pH} = 9\text{--}10$), в состав которого входят $\text{AgNO}_3 - 35 \text{ г/л}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 - 170 \text{ г/л}$, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 3,5 \text{ г/л}$, $\text{NH}_4\text{OH} (25 \%) - 20 \text{ г/л}$, и обоснованы оптимальные режимы осаждения для стационарных и нестационарных условий формирования покрытий серебро-вольфрам. В результате экспериментальных исследований установлены механизмы включения оксидов вольфрама WO_x^{2-} в структуру формируемых покрытий серебра, при которых данные оксиды не участвуют в обусловленной протеканием тока реакции, что может быть подтверждено экспериментальной полулогарифмической зависимостью между количеством вольфрама в покрытии и его концентрацией в электролите [1–А; 3–А; 5–А; 26–А].

2. Экспериментально исследованы структурные особенности формирования покрытия серебро-вольфрам в различных условиях электролиза. Показано, что:

- с увеличением плотности тока и концентрации вольфрамата натрия в электролите серебрения возрастает поляризация катода, что приводит к увеличению скорости зародышеобразования и уменьшению радиуса зародыша и, соответственно, формированию более плотного и устойчивого к внешним воздействиям покрытия;

- с использованием рентгенофлуоресцентной спектроскопии изучено влияние условий формирования на состав покрытий серебро-вольфрам. Показано, что с увеличением концентрации вольфрамата натрия от 3,5 до 35 г/л содержание вольфрама в осажденных покрытиях изменяется от 0,8 до 3,0 мас.%. Использование импульсных токов осаждения приводит к увеличению содержания вольфрама в формируемом покрытии от 0,70 до 2,16 мас.%;

- проведение импульсного электролиза (амплитудная плотность тока от 1 до 10 А/дм², длительность импульса и паузы от 0,1 до 100 мс, частота импульсного тока от 10 до 1000 Гц) приводит к формированию более мелкокристаллических покрытий, чем при постоянном токе, а увеличение частоты от 10 до 100 Гц приводит к формированию крупнокристаллической структуры (размер зерна от 0,7 до 2,0 мкм);

– введение ультразвука в электролит интенсивностью 0,56 – 1,28 Вт/см² приводит к снижению размера зерен от 1,5 до 0,8 мкм [1–А; 2–А; 4–А; 5–А; 6–А; 7–А; 8–А; 9–А; 10–А; 11–А; 12–А; 15–А; 17–А; 18–А; 19–А; 22–А; 24–А; 25–А; 26–А; 27–А].

3. Экспериментально проведено исследование влияния режимов осаждения на эксплуатационные характеристики покрытий серебро-вольфрам. Установлен эффект локального повышения микротвердости осадков от 1700 до 2200 МПа в УЗ-режимах электролиза (при интенсивности ультразвука 0,33 Вт/см²). Показано, что при изменении параметров периодического тока величина объемного износа покрытий серебро-вольфрам изменяется от 3,85 до $0,62 \cdot 10^{-6}$ мм³ [1–А; 5–А; 6–А; 7–А; 12–А; 13–А; 21–А; 26–А].

4. Показано, что экспериментально предложенная термообработка покрытий серебро-вольфрам (в вакууме при температуре 300 °С) приводит к снижению удельного сопротивления до 7,5 мОм·см. Исследование влияния режимов осаждения покрытий серебро-вольфрам на величину контактного электросопротивления показало, что в зависимости от режимов осаждения имеется возможность формирования осадков с контактным электросопротивлением 1,7–3,1 мОм. При этом контактное электросопротивление серебряного покрытия без вольфрама составляет 1,8 мОм. Введение УЗ-колебаний в электролит приводит к снижению до 60 % скорости коррозии в зависимости от интенсивности ультразвука. Установлено, что коэффициент растекания припоя изменяется от 67 % (частота 1000 Гц, скважность импульсов 2,0–2,5) до 89 % (частота 100 Гц, скважность импульсов 2–5) в зависимости от режимов осаждения покрытий серебро-вольфрам [1–А; 6–А; 7–А; 14–А; 16–А; 20–А; 21–А; 23–А; 28–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложенные покрытия серебро-вольфрам и технологические маршруты их изготовления, основанные на разработанных процессах осаждения из нецианистого электролита серебрения в различных условиях (стационарный и нестационарный электролиз, введение ультразвуковых колебаний в зону осаждения), характеризуются оптимальными свойствами паяемости и коррозионной устойчивости (AgNO_3 – 35 г/л, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 170 г/л, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 3,5 г/л, NH_4OH (25 %) – 20 г/л, pH = 9–10 и режим осаждения (плотность тока 0,7 А/дм², режим импульсного тока с частотой 100 Гц и скважностью импульсов 2), электропроводности (AgNO_3 – 35 г/л, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 170 г/л, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 3,5 г/л, NH_4OH (25 %) – 20 г/л, pH = 9–10) и режимов осаждения: плотность тока 0,7 А/дм² режим УЗ-колебаний интенсивностью 0,07 Вт/см²), износостойчивости

(импульсный ток с частотой 100 Гц и скважностью импульсов 1,25; реверсированный ток с соотношением длительности прямого и обратного импульса 100 : 10 мс; введение ультразвуковых колебаний в электролит с интенсивностью 0,07 Вт/см²) для возможного использования в СВЧ-устройствах (стенок волноводов, экранов ЭМИ, электроконтактов), в контактных устройствах (паяных соединений, разъемных контактов).

2. Процесс импульсного осаждения композиционных покрытий серебро-вольфрам в сульфатно-аммониевом электролите и процесс осаждения на реверсированном токе внедрены на предприятии ООО «СЭОМ электро», что позволило повысить микротвердость покрытий для электроконтактных устройств и соответственно снизить величину объемного износа до 2 раз.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры электронной техники и технологии БГУИР.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монография

1–А. Формирование трехмерных токопроводящих микроструктур методом нестационарного электролиза // Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер, Д. В. Гульпа : под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко и д-ра техн. наук В. Л. Ланина. – Минск, 2021. – Гл.1. – С. 9–51.

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

2–А. Формирование объемных выводов полупроводниковых приборов методом электрохимического осаждения / А. А. Хмыль, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, Н. В. Богуш, М. М. Борисик, С. М. Завадский // Доклады БГУИР. – 2013. – № 8 (78). – С. 34–38.

3–А. Моделирование процессов массопереноса в сульфатно-аммиакатном электролите серебрения при формировании композиционных покрытий / И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя: Фізіка-тэхнічных навук. – 2014. – № 3. – С. 10–14.

4–А. Оптимизация условий электроосаждения композиционных покрытий никель-УДА / И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль, Н. В. Богуш // Доклады БГУИР. – 2014. – № 6 (84). – С. 12–16.

5–А. Структура и физико-механические свойства композиционных покрытий серебро-вольфрам, полученных электрохимическим методом /

Н. В. Богуш, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5 (107). – С. 54–61.

6–А. Влияние периодических токов на состав, физико-механические и функциональные свойства электрохимических композиционных покрытий серебро-вольфрам / Н. В. Богуш, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер // Доклады БГУИР. – 2018. – № 6 (116). – С. 46–51.

7–А. Состав, структура и функциональные свойства композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам, сформированных при воздействии ультразвука / Н. В. Богуш, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, Н. В. Дежунов // Доклады БГУИР. – 2021. – № 19 (6). – С. 23–31.

8–А. Кинетика электрохимического формирования покрытий «серебро-вольфрам» из сульфатно-аммониевого электролита / Н. В. Богуш, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 1 (54). – С. 7–12.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9–А. Функциональные покрытия на основе серебра / А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, Н. В. Богуш // Технические средства защиты информации : матер. докл. и кратк. сообщ. II Белорусско-российской науч.-техн. конф., 17–21 мая 2004 г., г. Минск-Нарочь: спец. выпуск, Доклады БГУИР / БГУИР ; редкол.: М. П. Батура [и др.]. – Минск, 2004. – № 5. С. 88–89.

10–А. Влияние вольфрама на микротвердость серебряных покрытий / Н. В. Богуш, А. А. Хмыль, М. М. Борисик // Современные средства связи : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., 29 сент.–1 окт. 2009 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол.: М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2009. – С. 133.

11–А. Исследование влияния условий получения на состав композиционных покрытий на основе серебра / Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер // Современные средства связи : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., 29 сент.–1 окт. 2009 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол.: М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2009. – С. 134.

12–А. Электрохимическое формирование композиционных покрытий на основе серебра / Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль, В. А. Вакульчик // Современные средства связи : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., 28–30 сент. 2010 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 76.

13–А. Исследование физико-механических и функциональных свойств композиционных материалов серебро-вольфрам / Л. К. Кушнер, Н. В. Богуш, А. А. Хмыль // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы

докладов IX Междунар. науч.-техн. конф., 29–30 сент. 2010 г., г. Минск / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси ; редкол.: А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич. – Минск, 2010. – С. 182–183.

14–А. Расчет оптимальных режимов электроосаждения композиционных покрытий на основе серебра / И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы, сварка : материалы докладов Междунар. симп., 22–25 марта 2011 г. : в 2 ч. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси ; редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2011. – Ч. 2. – С. 174–179.

15–А. Влияние ультразвука на кинетические особенности процесса электроосаждения покрытий / И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш, Н. В. Дежкунов, А. А. Хмыль // Современные средства связи: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., 27–29 сент. 2011 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол. А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2011. – С. 76.

16–А. Исследование электрофизических характеристик КЭП серебро-вольфрам / Н. В. Богуш, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль, В. К. Бранцевич // Современные средства связи: материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., 27–29 сент. 2011 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол. А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2011. – С. 77.

17–А. Закономерности зародышеобразования электрохимических покрытий при воздействии ультразвука / А. А. Хмыль, Н. В. Дежкунов, Л. К. Кушнер, И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы докладов Республиканского науч.-техн. семинара, 6–7 дек. 2011 г., г. Минск / БГТУ ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2011. – С. 11–15.

18–А. Влияние ультразвука на процесс формирования сплава олово-висмут / А. А. Хмыль, И. И. Кузьмар, Н. В. Богуш, Н. В. Дежкунов, В. К. Бранцевич // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы докладов Республиканского науч.-техн. семинара, 6–7 дек. 2011 г., г. Минск / БГТУ ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2011. – С. 64–67.

19–А. Влияние состава электролита на структуру и свойства композиционных электрохимических покрытий на основе серебра / В. К. Бранцевич, Н. В. Богуш, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер // Моделирование, компьютерное проектирование и технология производства электронных средств: материалы 48-ой Науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, 7–11 мая

2012 г., г. Минск / БГУИР ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2012. – С. 120–121.

20–А. Влияние ультразвука на коррозионную стойкость гальванических покрытий / А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, И. И. Кузьмар, Н. В. Богущ, В. К. Бранцевич // Современные средства связи: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф., 16–18 окт. 2012 г., г. Минск / Высший государственный колледж связи ; редкол. А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2012. – С. 150–151.

21–А. Формирование композиционных покрытий при воздействии ультразвука / А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, Н. В. Дежкунов, Н. В. Богущ, И. И. Кузьмар // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. Междунар. симп., 10–12 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси ; редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – Ч. 2. – С. 319–324.

22–А. Оптимизация процесса формирования нанокomпозиционных покрытий / А. А. Хмыль, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, Н. В. Богущ // Углеродные наночастицы в конденсированных средах : сб. научн. ст. / Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 3–8.

23–А. Влияние ультрадисперсного алмаза и условий формирования на защитные свойства никелевых покрытий / А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, И. И. Кузьмар, Н. В. Богущ // Углеродные наночастицы в конденсированных средах : сб. научн. ст. / Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 9–14.

24–А. Формирование композиционных покрытий серебро-вольфрам при воздействии ультразвука / Н. В. Богущ, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль // материалы Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР, г. Минск, 18–19 марта 2014 г. : в 2 ч. / БГУИР ; редкол.: А. Н. Осипов [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 182–183.

25–А. Формирование композиционных серебряных покрытий в условиях нестационарного электролиза / А. А. Хмыль, Н. В. Богущ, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий : материалы докладов IV Респ. науч.-техн. семинара, 4–5 дек. 2014 г. / БГТУ ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 25–28.

26–А. Влияние состава электролита и режима электролиза на формирование покрытий серебро-вольфрам / Н. В. Богущ, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер // Современные электрохимические технологии и оборудование : матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 24–25 нояб. 2016 г. / БГТУ ; редкол.: И. В. Войтов. – Минск, 2016. – С. 6–9.

27–А. Влияние состава электролита меднения и условий электролиза на процесс зародышеобразования / И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, А. А. Хмыль, Н. В. Богуш // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Intermatic – 2016», 21–25 нояб. 2016 г. : в 4 ч. / Российская акад. наук ; редкол.: Ю. В. Гуляев [и др.]. – Москва, 2016. – Т. 16, Ч. 4. – С. 169–172.

Патент

28–А. Полезная модель ВУ 11795 U, МПК H01Q 17/00 (2006.01). Электромагнитный экран с гиротропными свойствами : № u 20180036 : заявлено 08.02.2018 : опубл. 30.10.2018 / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Н. В. Богуш ; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (ВУ) – 3 с.



РЭЗІЮМЭ

Богуш Наталля Валер'еўна

Фарміраванне элеткрахімічных пакрыццяў срэбра-вальфрам для прылад электроннай тэхнікі

Ключавыя словы: кампазіцыйныя электрахімічныя пакрыцці, серабрэне, пакрыццё срэбра-вальфрам, нестацыянарны электrolіз, ультрагук

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцей электрахімічнага асаджэння кампазіцыйных пакрыццяў срэбра-вальфрам з сульфатна-амоніевага электраліту з дадаткам солі вальфрамату натрыю ў стацыянарных, нестацыянарных рэжымах і пры стымулюючым уздзеянні ўльтрагукавых ваганняў падчас электrolізу.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: гальванастатычныя і патэнцыядынамічныя метады даследавання кінетыкі асаджэння пакрыцця срэбра-вальфрам, пачатковых стадый працэсу электракрышталізацыі пакрыццяў на чужароднай падложцы; рэнтгенафлуарысцэнтны аналіз; рэнтгенаўская дыфрактаметрыя; скануючая электронная мікраскапія; чатырохзондавы і трохзондавы метады вызначэння ўдзельнага і кантактнага супраціўлення; вымярэнне мікрацвёрдасці па Вікерсе; паяльнасць пакрыцця ацэньвалі метадамі змочвальнай здольнасці прыпою.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: разлічана аналітычная мадэль працэсу масапераносу ў сульфатна-амоніевым электраліце серабрэння і пачатковыя стадыі зародкаўтварэння ў залежнасці ад падаванага току асаджэння і солі вальфрамату натрыю ў электраліце, вывучаны механізм уключэння вальфраму ў структуру асновы. Упершыню атрыманы залежнасці структуры, складу, фізічных і механічных уласцівасцей пакрыццяў срэбра-вальфрам ад рэжымаў асаджэння (стацыянарнага і нестацыянарнага электrolізу), а таксама ад канцэнтрацыі солі вальфрамату натрыю ў электраліце. Атрыманы заканамернасці фарміравання пакрыццяў срэбра-вальфрам на пастаянным току пры ультрагукавой актывацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: даследуемыя пакрыцці з'яўляюцца перспектыўнымі для прымянення іх у вырабах хвалявядучых сістэм, экранах электрамагнітнага выпраменьвання, электрычных кантактах, паяных злучэннях, раздымных кантактах у залежнасці ад абраных рэжымаў нанясення.

РЕЗЮМЕ

Богуш Наталья Валерьевна

Формирование электрохимических покрытий серебро-вольфрам для устройств электронной техники

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, серебрение, покрытие серебро-вольфрам, нестационарный электролиз, ультразвук

Цель работы: установление закономерностей электрохимического осаждения композиционных покрытий серебро-вольфрам из сульфатно-аммониевого электролита с добавлением соли вольфрамата натрия в стационарных, нестационарных режимах и при стимулирующем воздействии ультразвуковых колебаний в процессе электролиза.

Методы исследования и использованная аппаратура: гальваностатические и потенциодинамические методы исследования кинетики осаждения покрытия серебро-вольфрам, начальных стадий процесса электрокристаллизации покрытий на чужеродной подложке; рентгенофлуоресцентный анализ; рентгеновская дифрактометрия; сканирующая электронная микроскопия; четырехзондовый и трехзондовый метод определения удельного и контактного сопротивления; измерение микротвердости по Виккерсу; паяемость покрытия оценивали методом смачивающей способности припоя.

Полученные результаты и их новизна: рассчитана аналитическая модель процесса массопереноса в сульфатно-аммониевом электролите серебрения и начальные стадии зародышеобразования в зависимости от подаваемого тока осаждения и соли вольфрамата натрия в электролите, изучен механизм включения вольфрама в структуру основы. Впервые получены зависимости структуры, состава, физических и механических свойств покрытий серебро-вольфрам от режимов осаждения (стационарного и нестационарного электролиза), а также от концентрации соли вольфрамата натрия в электролите. Получены закономерности формирования покрытий серебро-вольфрам на постоянном токе при ультразвуковой активации.

Рекомендации по использованию и область применения: исследуемые покрытия являются перспективными для применения их в изделиях волноведущих систем, экранах электромагнитного излучения, электрических контактах, паяных соединениях, разъемных контактах в зависимости от выбранных режимов нанесения.

SUMMARY

Bohush Natallia Valerievna

Formation of electrochemical silver-tungsten coatings for electronic devices

Keywords: composite electrochemical coatings, silver plating, silver-tungsten coating, non-stationary electrolysis, ultrasound

Purpose of the work: to establish the laws of electrochemical deposition of silver-tungsten composite coatings from an ammonium sulfate electrolyte with the addition of sodium tungstate salt in stationary, non-stationary modes and under the stimulating influence of ultrasonic vibrations during the electrolysis process.

Research methods and used equipment: galvanostatic and potentiodynamic methods for studying the kinetics of silver-tungsten coating deposition, the initial stages of the process of electrocrystallization of coatings on a foreign substrate; X-ray fluorescence analysis; X-ray diffractometry; scanning electron microscopy; four-probe and three-probe methods for determining specific and contact resistance; Vickers microhardness measurement; the solderability of the coating was assessed by the solder wetting ability method.

The results obtained and their novelty: an analytical model of the mass transfer process in an ammonium sulfate silver electrolyte and the initial stages of nucleation were calculated depending on the applied deposition current and sodium tungstate salt in the electrolyte, and the mechanism of inclusion of tungsten in the base structure was studied. For the first time, the dependences of the structure, composition, physical and mechanical properties of silver-tungsten coatings on deposition modes (stationary and non-stationary electrolysis), as well as on the concentration of sodium tungstate salt in the electrolyte, have been obtained. The patterns of formation of silver-tungsten coatings at direct current with ultrasonic activation were obtained.

Recommendations for use and scope: the coatings under study are promising for use in products of waveguide systems, electromagnetic radiation screens, electrical contacts, solder joints, detachable contacts, depending on the selected application modes.

Научное издание

Богущ Наталья Валерьевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
СЕРЕБРО-ВОЛЬФРАМ ДЛЯ УСТРОЙСТВ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Подписано в печать 28.10.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,6. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 60. . Заказ 187.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск