

УТВЕРЖДАЮ

Начальник учреждения
образования «Военная академия
Республики Беларусь»
генерал-майор

А.М.Горбатенко

25.11.2025

ОТЗЫВ

оппонирующей организации

на диссертационную работу БОГУШ Натальи Валерьевны
«Формирование электрохимических покрытий серебро-вольфрам
для устройств электронной техники», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.27.06 – технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Содержание диссертационной работы БОГУШ Натальи Валерьевны соответствует отрасли науки и требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники. В части соответствия *формуле специальности* это определяется тем, что диссертационная работа ... «включает разработку научных основ создания новых перспективных материалов для твердотельной электроники...». Основные научные результаты соответствуют двум пунктам, описывающим *области исследования* (п.1; п.4). Диссертация, во-первых, направлена на установление основных закономерностей электродных процессов в стационарных и нестационарных режимах электрохимического серебрения путем введения вольфрама в электролит и формируемые покрытия, определение характеристик их износоустойчивости и стабильности; во-вторых, в серийно выпускаемых изделиях применяются разработанные автором технические решения. Поэтому отнесение диссертации к отрасли технических наук не вызывает сомнения.

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи

В диссертационной работе решены актуальные частные научные задачи, связанные с установлением закономерностей электрохимического осаждения композиционных покрытий серебро-

вольфрам в тех компонентах электронной техники, где требуется сочетание высокой электропроводности и исключительной механической стойкости.

Научный вклад соискателя включает:

1. Разработку аналитической модели описания процесса массопереноса на постоянном и импульсном токе в сульфатно-аммониевом электролите серебрения, которая учитывает электрохимическое равновесие и значения термодинамических констант нестойкости, что позволило установить кинетические особенности перехода в системе «электролит – твердое тело» и предельную плотность тока электролиза при формировании композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам.

2. Эмпирическое 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.

3. Экспериментально установленные закономерности формирования композиционных электрохимических покрытий с применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия, а также композиционных электрохимических покрытий в режиме импульсного тока, что позволило значительно повысить микротвердость, износостойкость и коррозионную устойчивость изделий электронной техники.

3. Конкретные научные результаты, за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень

Соискателю может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук за следующие новые научно-обоснованные результаты:

1. Методики формирования покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама от 0,8 до 3,0 мас.%, отличающиеся применением 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; с плотностью тока от 0,3 до 1,5 А/дм², что позволило сформировать пленки с увеличенной в 2,5 раза проводимостью по сравнению с использованием электролита с вольфраматом калия.

2. Методики формирования тонкопленочных покрытий с электрохимическим осаждением серебро-вольфрам, отличающиеся,

во-первых, примененными режимами импульсного тока со средней плотностью $0,7 \text{ А/дм}^2$ и частотой импульсов от 10 до 1000 Гц; во-вторых, использованием реверсированного тока со средней плотностью $0,7 \text{ А/дм}^2$ и частотой импульсов от 1 до 1000 Гц, что в совокупности *позволило* сформировать поверхностный функциональный слой, характеризующийся 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. Оптимальные технологические режимы, разработанные на основе эмпирически исследованных характеристик поверхностного функционального слоя серебро-вольфрам (с содержанием вольфрама в от 0,70 до 3,05 мас.% и применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия в режиме постоянного тока с плотностью от $0,3$ до $1,5 \text{ А/дм}^2$), *отличающиеся* дополнительным ультразвуковым воздействием с частотой 38 кГц, акустической мощностью 15 Вт, интенсивностью ультразвука в диапазоне от $0,07$ до $1,28 \text{ Вт/см}^2$, что в совокупности *позволило* 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.

4. Рекомендации по практическому применению результатов диссертационной работы

Практическое применение полученных соискателем научных результатов вызывает искреннее уважение (Приложение А. Акт внедрения в производство, стр. 136). Общий объем выпуска изделий при использовании разработанных и внедренных режимов составил 19206 штук, которые прошли все этапы испытаний, на практике подтвердили обоснованность принятых новых технических решений и высокую достоверность результатов.

В качестве рекомендаций остается только пожелать соискателю успехов в более широком применении авторских методик в отечественной промышленности.

5. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Содержание диссертационной работы, полнота проведенных исследований, разработанные методики и обоснованные

технологические режимы подтверждают очень высокий уровень научной квалификации соискателя и соответствие ученой степени кандидата технических наук.

6. Замечания по диссертации

1. В диссертации аналитическая модель массопереноса в сульфатно-аммониевом электролите (стр. 48 – 58) нашла свое отражение в общей характеристике работы лишь в разделе научная новизна. Включение данной модели в положения, выносимые на защиту, безусловно украсило бы теоретическую часть исследований соискателя.

2. В разделе 2.3.6 «Измерение трибологических свойств покрытий» (стр. 45 – 46) целесообразно было бы привести результаты погрешностей измерений.

3. К сожалению, соискатель на стр. 72, 76, 97, 98 использует выражения «по-видимому», «позволяет предположить» и др. При описании научных и практических результатов следует применять глаголы совершенного вида в прошедшем времени.

4. Из текста диссертации (страница 61, абзац 1) не понятно, почему коэффициент переноса равен 0,2. Соискателю следовало бы более подробно описать выбор значения данного коэффициента.

7. Заключение

Отмеченные замечания носят в основном рекомендательный характер и не снижают научную и практическую значимость и общее положительное впечатление от диссертационной работы Богуш Н.В.

Представленная диссертация является законченной квалификационной научной работой, по содержанию и уровню научных исследований, новизне полученных результатов и их значимости соответствуют требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Богуш Наталья Валерьевна достойна присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники за разработку методик формирования покрытий серебро-вольфрам и технологических режимов на основе эмпирически исследованных характеристик поверхностного функционального слоя серебро-вольфрам для компонентов электронной техники, в которых требуется сочетание высокой электропроводности, исключительной механической и коррозионной стойкости.

Отзыв обсужден и утвержден на расширенном заседании научно-исследовательской лаборатории факультета связи и автоматизированных систем управления учреждения образования «Военная академия

Республики Беларусь» (состоялось 19 ноября 2025 года), на котором соискатель выступила с докладом (приказ начальника учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» от 14.11.2025 № 1392).

На расширенном заседании присутствовали члены, имеющие ученые степени – 11 человек: д.т.н. профессор Косачев И.М., д.т.н. профессор Малкин В.А., к.т.н. профессор Хижняк А.В., к.т.н. доцент Михнёнок Е.И., к.т.н. доцент Садов В.С., к.т.н. доцент Шарак Д.С., к.т.н. доцент Белоус А.А., к.т.н. доцент Менжинский А.Б., к.т.н. Пантелеев С.В., к.в.н. доцент Гавриленко К.А., к.в.н. доцент Аскерко А.В.

Отзыв принят открытым голосованием. В голосовании приняли участие члены расширенного заседания, имеющие ученую степень. Результаты голосования:

«за» – 11,
«против» – нет,
«воздержалось» – нет.

Председатель расширенного заседания
кандидат технических наук, доцент
подполковник

Е.И.Михнёнок

Эксперт
кандидат технических наук, профессор

А.В.Хижняк

Секретарь расширенного заседания
кандидат технических наук, доцент
полковник

А.А.Белоус