

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию *Богущ Натальи Валерьевны* «Формирование электрохимических покрытий серебро-вольфрам для устройств электронной техники», представленную 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 диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите*

Диссертационная работа Богущ Н. В. соответствует специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники согласно раздела III (области исследований) паспорта специальности 05.27.06:

III.1. Физико-химические процессы, протекающие при синтезе и выращивании кристаллических и аморфных материалов в объемном и пленочном состоянии для различных областей электронной техники.

III.3. Исследование элементного состава кристаллов и слоев, их кристаллической структуры и микроструктуры.

III.4. Исследование электрических, магнитных, оптических, теплофизических свойств материалов и слоев.

### *2. Актуальность темы диссертации*

В настоящее время широко распространено использование покрытий на основе серебра в качестве электроконтактов в СВЧ-устройствах, микроэлектронике, медицине и других отраслях. При этом актуальным является выбор неагрессивного электролита, так как используемые составы с цианидным комплексом характеризуются экологической опасностью и трудоемкостью утилизации. Эксплуатационные характеристики покрытий на основе серебра не удовлетворяют современным требованиям для устройств электронной техники. В этой связи введение вольфрама в формируемые серебряные покрытия позволит получать пленки с улучшенными параметрами микротвердости, паяемости и износоустойчивости.

В связи со сказанным выше, проведенные в диссертационной работе исследования по разработке методики формирования электрохимических покрытий серебро-вольфрам для устройств электронной техники из нецианистых электролитов и установление закономерностей

электрохимического осаждения композиционных покрытий на латунных подложках являются актуальными.

### *3. Степень новизны результатов, научных положений, которые выносятся на защиту диссертации*

Основные результаты и научные положения, представленные в диссертации, являются новыми и получены соискателем впервые.

К их числу необходимо отнести следующие:

1. Разработанные методики и оптимальные технологические режимы формирования покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама от 0,8 до 3,0 мас.%, с использованием вольфрамата натрия в сульфатно-аммониевом электролите, что обеспечивает формирование пленки с увеличенной проводимостью в 2,5 раза по сравнению с использованным электролитом с вольфраматом калия.

2. Предложенные методики и оптимальные технологические режимы формирования покрытий серебро-вольфрам с впервые применёнными режимами импульсного и реверсивного токов со средним значением плотности  $0,7 \text{ А/дм}^2$  и частотой импульсов от 10 до 1000 Гц, что обеспечило формирование покрытий с повышенной от 20 до 100% микротвердостью и увеличенной от 2 до 7 раз износостойкостью по сравнению с покрытиями, сформированными в режиме постоянного тока.

3. Установленные характеристики покрытий серебро-вольфрам, сформированных в режиме постоянного тока с учетом дополнительного ультразвукового воздействия, свидетельствуют о повышенном в 2 раза содержании вольфрама, увеличенных на 90% микротвердостью и до 30% коррозионной стойкостью, сниженным в 2 раза объемном износе и до 30% контактным электросопротивлением.

Новизна основных полученных результатов отражена в 28 научных публикациях соискателя.

### *4. Обоснованность и достоверность основных результатов и рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Обоснованность и достоверность основных результатов, научных положений и выводов диссертации не вызывают сомнений. Они подтверждаются корректным применением аналитических моделей для решения поставленных задач, количественным и качественным



соответствием результатов расчетов имеющимся экспериментальным данным, апробированием на республиканских и международных научно-технических конференциях.

#### *5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов и основных научных положений диссертации*

*Научная значимость* результатов и основных научных положений состоит в разработке аналитической модели описания процесса массопереноса в режимах электрохимического осаждения на постоянном и импульсном токах в сульфатно-аммонийном электролите серебрения с добавкой вольфрама натрия; обосновании комплексного механизма включения вольфрама в структуру покрытий; установлении закономерностей формирования композиционных электрохимических покрытий при различных режимах электролиза с улучшенными параметрами микротвердости, износостойкости, коррозионной стойкости и контактного электросопротивления по сравнению с существующими.

*Практическая значимость* результатов заключается в их использовании в производстве и учебном процессе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, возможности использования разработанных покрытий серебро-вольфрам в СВЧ-устройствах (стенки волноводов, экранов ЭМИ, электроконтактов) и контактных устройствах (паяных соединений, разъемных контактов).

*Экономическая значимость* результатов состоит в разработке технологии формирования покрытий из нецианистого электролита серебрения, что снижает стоимость утилизации отходов, и увеличении микротвердости покрытий для контактных устройств, что позволяет снизить величину объемного износа до 2 раз.

*Социальная значимость* результатов диссертации состоит в применении менее опасного, неагрессивного сульфатно-аммониевого электролита серебрения.

#### *6. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати*

По материалам диссертационной работы опубликовано 28 научных работ, из них 1 монография, 7 статей в рецензируемых научных изданиях, 19 статей в сборниках научных трудов республиканских и международных

конференций и 1 патент на полезную модель. Опубликованные работы раскрывают основные положения, выносимые на защиту. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

#### *7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК*

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав с краткими выводами, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя ученой степени и приложений. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 64 рисунка на 25 страницах, 17 таблиц на 6 страницах, 2 приложения на 2 страницах. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК Республики Беларусь и характеризуются хорошим качеством текстового и графического материала. Работа изложена ясным научным языком.

#### *8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует*

На основе анализа содержания диссертации в целом, использованных при ее выполнении методов и методик, интерпретации полученных результатов, количества опубликованных работ, можно заключить, что соискатель соответствует научной квалификации кандидата технических наук по искомой специальности.

#### *9. Недостатки диссертации*

К недостаткам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. В диссертационной работе желательно было бы привести сравнительные условия обеспечения производственной безопасности разработанного электролита по сравнению с цианистыми электролитами.

2. П.1 раздела 2.5 «Выводы» нуждается в конкретизации основных новых приемов подготовки образцов и условий осаждения (стр. 58 диссертации).

3. П.1, п.2 раздела 3.4 следовало бы указать на конкретную используемую технологию. Например – «в процессе электрохимического осаждения покрытий ...» (стр. 86 диссертации).

4. При проведении эксперимента по влиянию условий осаждения покрытий серебро-вольфрам автором удельное сопротивление представлено в размерности Ом\*м (стр. 95 диссертации), а результаты в выводах по главе 4 (стр. 113 диссертации) и «заключении» (стр. 116 диссертации) в размерности мкОм\*см.

5. Глава 2 содержит раздел 2.4, посвященный разработке аналитической модели массопереноса в сульфатно-аммониевом электролите серебрения с добавлением соли вольфрамата натрия при различных условиях электролиза. Его лучше представить в главе 3, посвященной экспериментальным исследованием.

Однако приведенные выше недостатки не затрагивают основных положений и выводов, содержащихся в диссертации, и не снижают ценности и значимости полученных результатов.

## *10. Заключение*

В целом, диссертационная работа Богуш Н.В. «Формирование электрохимических покрытий серебро-вольфрам для устройств электронной техники», выполненная соискателем самостоятельно под руководством доктора технических наук, профессора Хмыля Александра Александровича, является квалификационной научной работой, содержание которой соответствует заявленной специальности и отрасли наук. По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, обоснованности научных положений и выводам работа Богуш Н.В. соответствует установленным требованиям пунктов 20, 21 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий», утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 17.11.2004 № 560 (в редакции Указа Президента Республики Беларусь от 23.06.2023 № 180), а ее автор, Богуш Наталья Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» за получение новых научно обоснованных результатов:

– предложенное использование вольфрамата натрия от 3,5 до 35,0 г/л в сульфатно-аммониевом электролите для формирования покрытий серебро-вольфрам с проводимостью от 5,4 до  $13,3 \cdot 10^{-8}$  Ом\*м, увеличенной в 2,5 раза по сравнению с использованным электролитом с вольфраматом калия;



– разработанные методики и оптимальные технологические режимы формирования покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама от 0,8 до 3,0 мас.%;

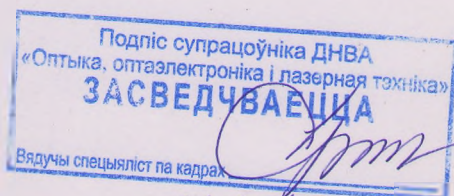
– разработанные оптимальные режимы формирования покрытий электрохимическим осаждением в различных условиях электролиза с впервые использованными режимами импульсного и реверсивного токов со средней плотностью  $0,7 \text{ А/дм}^2$ , применение которых обеспечивает возможность формирования покрытий с повышенной от 20 до 100% микротвердостью и от 2 до 7 раз износостойкостью по сравнению с серебряными покрытиями, сформированными в режиме постоянного тока;

– установленные характеристики покрытий серебро-вольфрам с содержанием вольфрама от 0,70 до 3,05 мас.%, полученных в режиме постоянного тока с плотностью от 0,3 до  $1,5 \text{ А/дм}^2$  с учетом дополнительного ультразвукового воздействия с частотой 38 кГц, акустической мощностью 15 Вт, интенсивностью в диапазоне от 0,70 до  $1,28 \text{ Вт/см}^2$ , что позволяет в 2 раза повысить содержание вольфрама в пленке, увеличить на 90% микротвердость и до 30% коррозионная стойкость, а также снизить в 2 раза объемный износ и контактное сопротивление до 30% по сравнению с покрытиями, сформированными с применением аналогичного электролита в режиме постоянного тока;

что в совокупности позволило решить важные научные и практические задачи – создание покрытий серебро-вольфрам с оптимальными свойствами паяемости, коррозионной устойчивости и электропроводности для использования в СВЧ-устройствах и контактных устройствах.

Официальный оппонент,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории микро- и наносенсорики  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и  
лазерная техника»

И.М. Андрухович



ад. 12.20.28

Св. Фрокош