

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу

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

Диссертационная работа Н.В. Богущ посвящена развитию научных основ создания новых перспективных материалов для твердотельной электроники, техники СВЧ и электротехники, разработке новых методик формирования тонкопленочных электропроводящих материалов на основе серебра с использованием электрохимического осаждения из водных растворов, включая разработку составов электролитов и режимов осаждения, изучение структуры и свойств покрытий серебро-вольфрам при изменении условий осаждения и воздействии ультразвуковых колебаний, а также рекомендаций по их практическому использованию.

Основные **научные и практические результаты исследований** включают:

теоретический анализ процессов массопереноса в электролите серебрения, содержащем соль вольфрамата натрия, основанного на значениях термодинамических констант нестойкости, позволил установить зависимости концентрации ионов на электродах и в диффузионных слоях в условиях стационарного и нестационарного электролиза и обосновать оптимальный состав электролита (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) при $\text{pH}=9-10$ и выбор режимов осаждения для стационарных и нестационарных условий формирования покрытий серебро-вольфрам;

комплексный механизм включения вольфрама в структуру электрохимических покрытий на основе серебра, при котором оксиды WO_x^{2-} не участвуют в обусловленной протеканием тока реакции, что подтверждено экспериментальной полулогарифмической зависимостью между его количеством в покрытии и концентрацией в электролите;

закономерности формирования покрытий серебро-вольфрам в различных условиях электролиза, демонстрирующие нелинейный характер изменения содержания вольфрама в осажденных покрытиях от 0,85 до 3,05 масс.%. при увеличении концентрации соли вольфрамата натрия в электролите от 3,5 до 35 г/л, а также возможности варьирования размеров зерен в покрытии от 0,7 до 2,0 мкм при использовании импульсных токов осаждения с амплитудной плотностью тока до 10 А/дм^2 и частотой до 1000 Гц и ультразвукового воздействия интенсивностью 0,56–1,28 Вт/см²;

разработанные и экспериментально апробированные электролиты и режимы осаждения и термообработки, позволяющие получать гальванические покрытия серебро-вольфрам с улучшенными по сравнению с серебряными покрытиями эксплуатационными характеристиками микротвердости до 2200 МПа и объемного износа до $0,62 \cdot 10^{-6}$ при минимальном контактном электрическом сопротивлении 1,7 мОм, что позволяет рекомендовать их для возможного использования при изготовлении контактных устройств, микроэлектронных, СВЧ и иных устройств электронной техники.

Разработанные режимы осаждения и рекомендации по формированию тонкопленочных композиционных покрытий нашли практическое применение при разработке технологий изготовления объемных контактных элементов, электропроводящих элементов электронной техники с улучшенной износостойкостью, а также внедрены в учебный процесс.

Достоверность научных результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, не вызывает сомнений, т.к. они основаны на теоретически обоснованных и экспериментально подтвержденных гипотезах и практических решениях для электрохимических процессов.

В процессе работы над диссертацией Богуш Н.В. проявила себя как высококвалифицированный и грамотный специалист, умеющий самостоятельно ставить научные задачи, решать их и анализировать полученные результаты. Настойчивость и целеустремленность в работе, использование широкого спектра взаимодополняющих методов исследования определяют высокую степень достоверности полученных результатов, которые отражены в 28 печатных работах, в том числе 7 статьях в научных журналах, соответствующих требованиям ВАК, 1 монографии, 19 статьях в научных изданиях и сборниках материалов конференций. Автором получен Патент Республики Беларусь на полезную модель.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК Беларуси. Представленный автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и ее основным выводам.

Учитывая изложенное, считаю, что диссертационная работа «Формирование контактных систем на основе сплавов серебра» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, соответствующую требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (пп. 19-26 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий). Ее автор, Богуш Н.В., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники за решение актуальной задачи разработки научных основ технологии формирования композиционных тонкопленочных покрытий для изделий электронной техники и получение новых результатов, включающих:

обоснование комплексного механизма включения вольфрама в состав покрытий серебро-вольфрам, формируемых электрохимическим осаждением из сульфатно-аммониевого электролита серебрения, содержащего растворимую соль вольфрамата натрия, при котором ионы WO_4^{2-} восстанавливаются до металлического вольфрама на катоде совместно с адсорбцией ионов оксидов вольфрама, которые не участвуют в токообразующей реакции, на поверхности серебра с положительным зарядом, что облегчает адсорбцию анионов. Указанный механизм экспериментально подтвержден 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;

результаты теоретического анализа процесса массопереноса на постоянном и импульсном токе в сульфатно-аммониевом электролите серебрения с вольфрамом натрия концентрации 3,5 г/л, который учитывает электрохимические равновесия и значения термодинамических констант нестойкости, позволили установить кинетические особенности перехода в системе «электролит–твёрдое тело» и предельную плотность тока электролиза ($2,01 \text{ А/дм}^2$) при формировании композиционных электрохимических покрытий серебро-вольфрам;

экспериментально установленные закономерности формирования композиционных электрохимических покрытий с применением сульфатно-аммониевого электролита серебрения и соли вольфрамата натрия и взаимосвязь между параметрами осаждения при использовании стационарного и нестационарного электролиза, ультразвукового воздействия, термообработки и составом, структурой, электропроводящими и эксплуатационными характеристиками покрытий,

что позволило получать гальванические покрытия на основе серебра с содержанием вольфрама 0,7-3,05 масс. %, характеризующиеся повышенной на 20–100 % микротвёрдостью, увеличенной в 2-7 раз износостойкостью, сниженным на 30% контактным электросопротивлением и повышенной до 30 % коррозионной стойкостью по сравнению с серебряными покрытиями, сформированными с применением сульфатно-аммониевого электролита.

Научный руководитель

д.т.н., профессор,

почетный профессор учреждения образования

«Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

А.А. Хмыль

Подпись Хмыля А.А. Удостоверено

19.09.2025 Н.В. Гайдук