

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о работе А.В. Дружинина по кандидатской диссертации «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Александр Владимирович Дружинин первоначально поступил в аспирантуру НИТУ МИСиС на кафедру материаловедения в 2017 году. В 2018 г. он перешёл в аспирантуру кафедры физической химии. Это было связано с началом его работы под моим руководством в рамках международного проекта EXMONAN (FP7-PEOPLE-2013-IRSES-612552-EXMONAN). Этот проект финансировался Европейским сообществом в рамках Седьмой рамочной программы поддержки научных исследований FP7-PEOPLE-2013-IRSES под номером 612552. Программа FP7-PEOPLE-2013-IRSES предполагала поддержку многосторонних исследований, в нашем проекте участвовало несколько научных институтов из России и Украины, а также ряд научных учреждений из Европейского союза, Швейцарии, Австралии и Канады. Европейское сообщество в рамках этой программы предоставляло европейским институтам финансовые средства для работы в них молодых научных сотрудников (аспирантов и постдоков) из российских институтов. Наша Лаборатория поверхностей раздела в металлах из Института физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН) в Черноголовке участвовала в этом многостороннем проекте в качестве партнёра с Конфедеративным институтом материаловедения (EMPA) в г. Дюбендорф, Швейцария.

В ходе нескольких рабочих визитов в институт EMPA А.В. Дружинин участвовал в совместных исследованиях многослойных структур системы медь-вольфрам. В дальнейшем исследовательская работа была продолжена А.В. Дружининым на кафедре физической химии в НИТУ «МИСиС» при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемых молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре ("Аспиранты" 2019 г.). Диссертация А.В. Дружинина на тему «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама» посвящена актуальной проблеме деградации при воздействии повышенных температур слоистой микроструктуры многослойных структур с наноразмерными слоями системы медь-вольфрам.

А.В. Дружинин проявил себя в качестве талантливого и трудолюбивого экспериментатора. Он освоил целый ряд экспериментальных методик, среди которых сканирующая электронная микроскопия, оже-электронная спектроскопия, рентгеновская дифракция и др. А.В. Дружинин не только хороший экспериментатор, ему прекрасно удаётся и теоретическая часть работы, в частности – обработка полученных результатов с помощью самых современных теоретических моделей. А.В. Дружинин прекрасно владеет английским языком, самостоятельно пишет на научные статьи и заявки проекты, выступал на ряде международных конференций с устными и стендовыми докладами на английском и русском языках. Следует отметить отличные социальные навыки А.В. Дружинина. Он хорошо вписывается в международные и российские научные коллективы, успешно сотрудничает с коллегами из разных стран. А.В. Дружинин пользуется поддержкой и авторитетом в коллективах, его коллеги охотно с ним сотрудничают. А.В. Дружинин доброжелателен, активен, самостоятелен, способен к продолжительной и сложной научной работе, аккуратен и пунктуален в выполнении разнообразных задач, причём не только научных, но и организационных. Можно с уверенностью сказать, что А.В. Дружинин является квалифицированным научным работником, умеет самостоятельно решать сложные научные и технические задачи, обладает знанием современного мирового уровня развития соответствующей области физики конденсированного состояния.

В результате проведённых исследований А.В. Дружининым получен ряд важных научных результатов, среди которых можно выделить следующие:

1) Экспериментально обнаружено, что значения остаточных механических напряжений в изготовленных МС зависят от толщин слоев меди и вольфрама. Впервые экспериментально получено значение силы, создаваемой межфазной границей раздела Cu(111)/W(110), и определена ее зависимость от температуры отжига в многослойных структурах системы медь-вольфрам. Обнаружено, что существует дополнительный источник механических напряжений, который действует одинаково на все бислои и связан с воздействием подложки на многослойную структуру;

2) Экспериментально обнаружено, что количество медных кристаллитов, которые появляются на поверхности многослойной структуры после отжига, зависит от толщины слоев меди и вольфрама в бислоях, а также способа уложения бислоев в объеме многослойной структуры, если комбинируются бислои различного типа. С началом деградации кристаллиты исчезают, и атомы меди диффундируют обратно в объем многослойной структуры;

3) Экспериментально обнаружено, что с ростом температуры отжига (при фиксированной его длительности) величина силы, создаваемой межфазными границами раздела Cu(111)/W(110), линейным образом уменьшается до нулевого значения;

4) Экспериментально установлено, что формирование нанокompозита сопровождается появлением пустот в его объеме, а объемная микроструктура нанокompозита зависит от толщин слоев меди и вольфрама в бислоях. Обнаружено, что термическая деградация многослойных структур с комбинацией разных типов бислоев приводит к появлению нанокompозитов с составной микроструктурой;

5) С помощью *in situ* анализа методом оже-электронной спектроскопии впервые экспериментально определена температурная зависимость коэффициента зернограничной диффузии меди в вольфраме в многослойных структурах системы медь-вольфрам;

6) Разработаны методики экспериментального анализа распределения упругой деформации в слоях по глубине многослойной структуры и распределения упругой деформации по глубине в традиционных тонких пленках. Впервые экспериментально получены профили распределения деформации в слоях вольфрама по глубине многослойной структуры системы Cu/W.

Теоретические и экспериментальные результаты исследований А.В. Дружинина опубликованы в 7 статьях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и входящих в перечень ВАК. Результаты работы были доложены на 11 российских и международных конференциях.

Практическая значимость диссертационной работы А.В. Дружинина состоит в следующем:

1) Выявлено, что интенсивность оттока меди поддается контролю через подбор комбинации толщин слоев меди и вольфрама, что может найти свое применение в области создания твердофазных припоев на основе многослойных структур системы медь-вольфрам;

2) Процесс высокотемпературной термической деградации многослойных структур системы медь-вольфрам можно рассматривать как новый метод изготовления нанокompозитов данной системы элементов. Комбинация толщин слоев меди и вольфрама в объеме многослойной структуры определяет объемную микроструктуру нанокompозита, что дает инструмент для получения материала с желаемыми физическими свойствами;

3) Полученная экспериментально температурная зависимость коэффициента зернограничной диффузии меди в вольфраме может быть использована для расчета кинетики диффузионных процессов в наноматериалах данной системы элементов;

4) Разработаны методики экспериментального анализа распределения упругой деформации по глубине в тонких пленках и многослойных структурах.

Диссертация А.В. Дружинина является оригинальным и завершенным исследованием, в ней содержатся новые научные результаты, способствующие расширению области применения многослойных структур систем медь-вольфрам. Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений.

Учитывая вышесказанное, считаю, диссертационная работа А.В. Дружинина «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама» содержит ценные научные результаты, выполнены на высоком научно-техническом уровне и соответствует требованиям Положений ВАК, а соискатель достоин присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Научный руководитель:



Б.Б. Страумал

8 сентября 2021г.

Страумал Борис Борисович
доктор физико-математических наук,
01.04.07 – Физика конденсированного состояния
заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах ИФТТ им. Ю.А. Осипьяна РАН
Рабочий адрес: г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д.2, 142432,
Рабочий телефон: +7 49652 28300
E-mail: straumal@issp.ac.ru

Подпись Б.Б. Страумала заверяю

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, к.ф.-м.н.



А.Н. Терещенко