

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дружинина Александра Владимировича «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

### Актуальность темы исследования

Интерес к наноструктурированным материалам связан с их уникальными физическими и химическими свойствами, которые обусловлены малым размером зерен и наличием большого числа внутренних границ раздела. Одним из распространённых типов наноструктурированных материалов являются многослойные структуры (МС), представляющие собой тонкие пленки, состоящие из чередующихся слоев двух или более различных фаз толщиной, как правило, в интервале от единиц до нескольких десятков нанометров. Основной проблемой таких материалов является их низкая термическая стабильность, обусловленная высокой термодинамической неустойчивостью таких систем. В последние годы высокий интерес у исследователей вызывают МС на основе системы Cu/W, что связано с полным отсутствием в ней взаимной растворимости элементов вплоть до температуры плавления меди и крайне малыми коэффициентами объемной гетеродиффузии. При этом МС данной системы обладают высокими механическими характеристиками и радиационной стойкостью, а электро- и теплопроводность может варьироваться в широких пределах путем изменения толщин слоев меди. В связи с этим, диссертационная работа А.В. Дружинина, посвященная экспериментальному исследованию изменения микроструктуры МС системы медь-вольфрам с наноразмерными слоями различной толщины в условиях отжига при повышенных температурах, представляется весьма актуальной. Результаты, полученные в данной работе, могут повысить исследовательский интерес к изучению многослойных структур системы медь-вольфрам и их возможному практическому применению, а также внести вклад в развитие фундаментальных знаний в области создания МС с высокой термической стабильностью.

### Структура и краткое содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 159 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения с общими выводами по полученным результатам, а также списка цитируемой литературы, включающего 148 источников.

Во **введении** приводятся актуальность темы, цель и задачи работы, научная новизна исследования, его теоретическая и практическая значимость, перечислены методы исследования и положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность полученных результатов, апробация работы и публикации по теме диссертации.

**Первая глава** представляет собой краткий литературный обзор, где приведены общие сведения о физических свойствах многослойных структур, физике процесса термической деградации таких структур, литературные данные о деградации многослойных структур системы медь-вольфрам.

Во **второй главе** описан способ получения МС системы Cu/W с наноразмерными слоями методом магнетронного напыления, перечислены использованные экспериментальные методы структурных исследований (сканирующая электронная микроскопия, оже-электронная



спектроскопия, сканирующая просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифракция), методика оценки значений остаточных механических напряжений в слоях.

**Третья глава** посвящена исследованию объемной микроструктуры полученных методом магнетронного напыления образцов МС системы Cu/W с одним типом бислоев (бислоем – пара слоев меди и вольфрама) с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Изучен характер остаточных механических напряжений в слоях меди и вольфрама после изготовления МС.

**В четвертой главе** проведены исследования влияния отжига в интервале температур 400–700 °С на микроструктуру МС системы Cu/W с разной толщиной слоев, но одним типом бислоев. Изучены закономерности релаксации остаточных механических напряжений в слоях, приводится описание экспериментального *in situ* анализа методом оже-электронной спектроскопии температурной зависимости коэффициента зернограницной диффузии меди в слоях вольфрама.

**Пятая глава** посвящена исследованию влияния отжига при температуре 800 °С на объемную микроструктуру многослойных структур с одним типом бислоев. Выявлены закономерности деградации слоистой структуры с формированием микроструктуры нанокompозита. Приводится предположение о физической природе смещения начала процесса твердофазного смачивания границ зерен в область более высоких температур (700–800 °С), что связано с изменением силы, действующей вдоль межфазной границы раздела (111)Cu/(110)W.

**Шестая глава** посвящена исследованию влияния термического отжига в интервале температур 400–800 °С на объемную микроструктуру многослойных структур с двумя типами бислоев. Разработана методика анализа распределения упругой деформации в слоях по толщине многослойной структуры, с помощью которой получены профили распределения в изготовленных образцах.

В конце каждой из четырех оригинальных глав сформулированы выводы. В **заключении** приведены общие выводы, сделанные по полученным в диссертационной работе результатам.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научные положения, выносимые на защиту, и основные выводы работы физически обоснованы с использованием адекватной интерпретации полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов оригинальных исследований с имеющимися в современной литературе модельными представлениями и экспериментальными данными других авторов. Представленные результаты исследований признаны отечественной и зарубежной научной общественностью, прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

#### **Научная новизна и достоверность полученных результатов**

В качестве наиболее важных научных результатов, полученных в диссертационной работе, можно отметить следующее:



1) Показано, что отжиг МС системы медь-вольфрам в интервале температур 400–600 °С приводит к оттоку атомов меди на поверхность структуры и формированию крупных медных кристаллитов, причем количество кристаллитов зависит от толщин слоев меди и вольфрама в бислоях, а также от комбинирования бислоев нескольких типов в объеме многослойной структуры. В последнем случае на интенсивность оттока можно влиять, располагая слои меди и вольфрама той или иной толщины ближе к подложке или ближе к поверхности МС. С помощью разработанной методики анализа показано, что изменение расположения бислоев приводит к изменению формы распределения упругой деформации в слоях по толщине структуры, что в свою очередь определяет интенсивность оттока меди на поверхность;

2) Обнаружено, что сила, действующая на межфазной границе раздела (111)Cu/(110)W, принимает значения существенно более высокие, чем для других систем элементов. Этим объясняется появление механических напряжений одного знака (сжимающих) в слоях меди и вольфрама. При этом, немаловажный вклад в величину напряжений вносит взаимодействие многослойной структуры с подложкой;

3) Показано, что, изменяя толщины слоев меди и вольфрама в бислоях, возможно существенно варьировать объемную микроструктуру нанокompозита, формирующегося в процессе отжига при температуре 800 °С. Комбинирование бислоев нескольких типов позволяет формировать пленки нанокompозитов с неравномерной объемной микроструктурой.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием в ней современных методов экспериментальных исследований и аналитического оборудования, обсуждением полученных результатов на всероссийских и международных научных конференциях, публикацией результатов в рецензируемых научных журналах (в том числе высокорейтинговых), входящих в перечень журналов, рекомендованных ВАК РФ, а также в международных базах цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора подтверждается его непосредственным участием в постановке задач, проведении исследований с использованием различных экспериментальных методик, анализе полученных экспериментальных данных и проведении расчетов.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработанной методике оценки распределения упругой деформации в слоях МС по глубине, которая позволила получить экспериментально профили распределения деформации в слоях вольфрама в многослойных структурах с двумя типами бислоев.

Практическая значимость диссертации связана с описанием в ней механизмов изменения интенсивности оттока атомов меди на поверхность структуры, что потенциально позволяет использовать такие структуры в качестве твердофазных припоев. Кроме того, деградация многослойной структуры в процессе отжига при температуре 800 °С представляет собой новый способ формирования нанокompозитов для систем с невзаимодействующими между собой элементами.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Содержание автореферата в целом отражает полученные в диссертационной работе Дружинина А.В. результаты и сформулированные общие выводы, и полностью соответствует содержанию диссертации.



### Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе Дружинина А.В. имеются следующие замечания:

1. В работе ничего не говорится об аморфной компоненте МС, которая, как известно, формируется при магнетронном напылении тонких пленок и может влиять на структуру и распределение остаточных напряжений. О возможном присутствии аморфной составляющей в данном случае может, в частности, свидетельствовать размытие рентгеновских максимумов на дифрактограммах (рис. 3.2 и 4.1).
2. В первом положении, выносимом на защиту, говорится об экспериментально полученном значении силы, создаваемой межфазной границей раздела. Однако, как известно сила является векторной величиной, в связи с чем, данное утверждение требует уточнения, связанного с указанием направления действия данной силы.
3. В работе были получены интересные результаты по температурной зависимости коэффициента зернограницной диффузии  $D_{зд}$  в  $W$ . К сожалению, сопоставление полученных данных по коэффициенту  $D_{зд}$  и энергии активации с известными из литературы значениями в работе не проведено, что затрудняет оценку корректности использованных при расчетах подходов.
4. Положения, выносимые на защиту, сформулированы как выводы и состоят из нескольких предложений. В свою очередь, основные выводы, сделанные по результатам работы, во многом дублируют положения, выносимые на защиту.
5. Замечания по оформлению диссертационной работы:
  - многие рисунки в работе представлены на английском языке;
  - имеет место путаница с аббревиатурами и обозначение одних и тех же переменных разными символами (толщина слоя обозначается в разных случаях литерами  $d$  и  $h$ );
  - список использованной литературы оформлен не в полном соответствии с требованиями.

В целом сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость, и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

### Заключение

Диссертационная работа Дружинина Александра Владимировича «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи, связанной с повышением термической стабильности системы  $Cu/W$ . По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов и выводов, диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор А.В. Дружинин заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.


**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Найденкин Евгений Владимирович 

«17» ноября 2021 г.

Даю согласие на обработку персональных данных

Найденкин Е. В. 

«17» ноября 2021 г.

Подпись Найденкина Е.В. заверяю,  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН  
Кандидат физ.-мат. наук





Н.Ю. Матолыгина

Контактная информация:

Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 49-12-45

e-mail: nev@ispms.tsc.ru