

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Моисеенко Евгения Тимофеевича
«Структурные фазовые превращения и атомное упорядочение при
твердофазных реакциях в тонкопленочных системах Cu/Au и Pd/Fe»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного
состояния

Твердофазные реакции, приводящие к структурным фазовым превращениям и атомному упорядочению твердых растворов, существенно влияют на физические свойства многослойных тонкопленочных систем, в которых слои состоят из разнородных химических элементов или фаз. Твердофазные реакции могут приводить к выходу из строя изделий микроэлектроники, поэтому с точки зрения эксплуатационных свойств чрезвычайно важной задачей является установление диапазона температурной стабильности многослойных тонкопленочных систем. Также твердофазные реакции могут использоваться для создания функциональных материалов с комплексом оптимальных физических свойств. В этом случае особую важность приобретает установление условий формирования определенной фазы. Именно в этом направлении выполнена диссертационная работа Моисеенко Е.Т., в которой исследованы фазовые превращения и атомное упорядочение в тонкопленочных системах Cu/Au и Pd/Fe. В связи с вышесказанным тема диссертации является несомненно актуальной.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, в котором сформулированы основные результаты и выводы. В конце каждой главы сформулированы выводы по результатам соответствующих разделов.

Первая глава посвящена подробному обзору теоретических и экспериментальных работ по твердофазным реакциям и атомному упорядочению в тонкопленочных системах Cu/Au и Fe/Pd, а также механизмам атомного упорядочения в тонких пленках и наночастицах Cu-Au и Fe-Pd.

Во второй главе приведено описание исследованных объектов – двухслойных тонкопленочных систем Cu/Au и Pd/ α -Fe(001), методы их получения и исследования. Описаны условия проведения электронно-микроскопических и электронографических *in situ* исследований процессов твердофазных реакций и атомного упорядочения, инициированных путем

термического нагрева образцов непосредственно в колонне просвечивающего электронного микроскопа.

В третьей главе представлены результаты электронно-микроскопических и электронографических *in situ* исследований структурных фазовых превращений и атомного упорядочения при твердофазных реакциях в двухслойной тонкопленочной системе Cu/Au с атомным соотношением Cu: Au $\approx$ 3:1. Установлено, что температура начала регистрации твердофазной реакции между нанослоями Cu и Au в процессе нагрева со скоростью 4-8 °C/мин составляет $\approx$ 180 °C. Важным результатом является то, что в работе проведены оценки значений коэффициента взаимодиффузии меди и золота и энергии активации взаимодиффузии меди и золота в процессе твердофазной реакции.

В четвертой главе представлены результаты электронно-микроскопических и электронографических *in situ* исследований структурных фазовых превращений и атомного упорядочения при твердофазных реакциях в двухслойной тонкопленочной системе Cu/Au с атомным соотношением Cu: Au $\approx$ 1:1. Особый интерес представляет исследование начального этапа твердофазной реакции в двухслойной тонкопленочной системе Cu/Au. Важным научным результатом является тот факт, что на начальных этапах твердофазной реакции за счет взаимодиффузии в образце формируется матрица с включенными в нее кристаллитами размером 4-6 нм, состоящими из атомно-неупорядоченной фазы CuAu и атомно-упорядоченной фазы CuAuI. Сделано предположение, что матрица представляет собой нанокристаллиты твердого раствора Cu-Au с областью когерентного рассеяния $\approx$ 1 нм. Предполагается, что массоперенос при твердофазной реакции в тонкопленочной системе Cu/Au происходит по смешанному механизму, включающему как зернограничную, так и объемную диффузию. При этом роль зернограничной диффузии возрастает в процессе твердофазной реакции. Таким образом, в диссертационной работе Е.Т. Моисеенко решена задача, имеющая существенное значение для физики твердого тела – исследованы структурные фазовые превращения и атомное упорядочение на начальном этапе твердофазной реакции в тонкопленочной системе Cu/Au.

В пятой главе представлены результаты электронно-микроскопических и электронографических *in situ* исследований структурных фазовых изменений при твердофазных реакциях и атомном упорядочении в двухслойной тонкопленочной системе Pd/ α -Fe(001) с атомным соотношением Fe: Pd $\approx$ 1:1.

Установлено, что температура начала регистрации твердофазной реакции между слоями Pd (в поликристаллическом состоянии) и α -Fe (в монокристаллическом состоянии) в процессе нагрева со скоростью 4-8 °C/мин составляет ≈ 400 °C. При температуре ≈ 480 °C зарегистрировано начало формирования атомно-упорядоченной монокристаллической фазы $L1_0$ -FePd. При достижении температуры ≈ 740 °C отмечен переход атомно-упорядоченной фазы $L1_0$ -FePd в атомно-неупорядоченную фазу FePd во всем объеме пленки. Наблюдаемая температура фазового перехода порядок-беспорядок смещена на 35 °C в сторону более высоких температур по сравнению с фазовой диаграммой. Важным является заключение диссертанта, что этот эффект связан с более высокой концентрацией атомов палладия на границах кристаллических зерен FePd за счет зернограницной адсорбции.

К недостаткам работы можно отнести следующие:

1) В работе предлагается модель структуры образцов тонкопленочных Cu/Au на начальном этапе твердофазной реакции – матрица, представляющая собой нанокристаллиты твердого раствора Cu-Au с областью когерентного рассеяния ≈ 1 нм, с включенными в нее кристаллитами CuAu, CuAuI размером 4-6 нм. При этом на электронно-микроскопических изображениях высокого разрешения наблюдаются только кристаллиты размером 4-6 нм. Кристаллиты матрицы размером ≈ 1 нм на представленных изображениях не разрешаются.

2) Диссертант обнаружил, что температура фазового перехода порядок-беспорядок ($L1_0$ -FePd $\rightarrow$ FePd) смещена на 35 °C в сторону более высоких температур по сравнению с фазовой диаграммой. Сделано предположение, что этот эффект связан с более высокой концентрацией атомов палладия на границах кристаллических зерен FePd за счет зернограницной адсорбции. Однако никаких экспериментальных доказательств (электронная микроскопия высокого разрешения, локальный элементный анализ) повышенной концентрации палладия на границе зерен Fe-Pd не приводится.

Отмеченные недостатки не снижают научного и практического значения результатов диссертационной работы. В ней получены новые научные результаты. Научные положения и основные результаты диссертации обоснованы и хорошо аргументированы. Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется комплексным подходом, когда анализируются данные, полученные различными современными методами: просвечивающей электронной микроскопией, включая электронную

микроскопию высокого разрешения; дифракцией электронов, включая микро- и нанодифракцию; и, локальный анализ элементного состава методом энергодисперсионной спектроскопии.

Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации. Результаты проведенных исследований достаточно полно опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Таким образом, диссертационная работа «Структурные фазовые превращения и атомное упорядочение при твердофазных реакциях в тонкопленочных системах Cu/Au и Pd/Fe», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, содержит достоверные результаты и удовлетворяет требованиям пп.9-11 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ее автор Е.Т. Моисеенко, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой физики
Томского государственного архитектурно-
строительного университета

Э. В. Козлов

Подпись Э.В. Козлова удостоверяю.
Ученый секретарь Ученого Совета ТГАСУ



Ю.А. Какушкин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

634003, г. Томск, пл. Соляная 2

Тел. (3822) 65-42-63; (3822) 65-42-65

Факс: (3822) 65-42-63

E-mail: kozlov@tsuab.ru

СПИСОК

опубликованных научных и учебно-методических работ

Козлова Эдуарда Викторовича

за последние 5 лет

№ п/п	Наименование работы	Вид работы	Выходные данные	Соавторы
1.	Dislocation and diffusion deformation mechanisms of ultrafine grained materials	статья	Materials Science Forum. 2010. V. 633-634. P. 121-128	Koneva N.A., Popova N.A.
2.	Критические размеры зерен поликристаллов микро- и мезоуровня	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 5. С. 644-648.	Конева Н.А., Попова Н.А.
3.	Зеренная структура сплава Ni ₃ Mn при упорядочивающем отжиге	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 8. С. 1123-1125	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А..
4.	Формирование наноразмерных интерметаллидных фаз в условиях имплантации алюминия титановых мишеней	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 1. С. 74-78	Курзина И.А., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Шаркеев Ю.П. и др.
5.	Изменение зернограничного ансамбля при фазовом переходе Al→L1 ₂ в сплаве Ni ₃ Mn	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 7. С. 930-933	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А. и др.
6.	Модификация структурно-фазового состояния мелкозернистого титана в условиях ионного облучения	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 11. С. 1384-1392	Курзина И.А., Попова Н.А., Калашников М.П. и др.
7.	Влияние микродвойников превращения на	статья	Известия РАН. Серия физическая	Киселева С.Ф., Попова Н.А.,

	избыточную плотность дислокаций и внутренние напряжения деформированного ГЦК материала		ская. 2012. Т. 76. № 13. С. 70-73	Конева Н.А. и др.
8.	Влияние степени дальнего атомного порядка на параметры твердого раствора и зеренную структуру сплава Ni_3Mn со сверхструктурой $L1_2$	статья	Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 149-153	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А., Иванов К.В.
9.	Влияние кинетики упорядочения на степень дальнего атомного порядка в сплаве Pd_3Fe	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 3. С. 322-325	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А., Веселов С.В.
10.	Влияние легирования и температуры деформации на зеренную структуру и фазовый состав интерметаллида Ni_3Al	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 9. С. 1225-1229	Конева Н.А., Попова Н.А., Калашников М.П., Никоненко Е.Л., Федорищева М.В., Пасенова А.Д.
11.	Влияние степени дальнего атомного порядка на параметры твердого раствора и зеренной структуры сплава Pd_3Fe со сверхструктурой $L1_2$	статья	Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 9. С. 1820-1824	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А., Иванов К.В.
12.	Влияние дозы ионного воздействия алюминием на структуру и фазовый состав ультрамелкозернистого титана	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 11. С. 1669-1672	Курзина И.А., Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Калашников М.П.
13.	Исследование зеренной структуры сплавов $Cu-Al$ и $Cu-Mn$ методами дифракции обратно рассеянных	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 4. С. 384-387	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А., Иванов К.В.

	электронов и оптической металлографии			
14.	Исследование изменений зеренной структуры при фазовом переходе Al-Li ₂ в упорядочиваемом сплаве Ni ₃ Fe методом дифракции обратнорассеянных электронов	статья	Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 8. С. 1038-1041	Коновалова Е.В., Перевалова О.Б., Конева Н.А., Иванов К.В.
15.	Relationship between parameters of solid solution and grain boundary ensemble in Pd ₃ Fe ordered alloy with L1 ₂ superstructure	статья	Advanced Materials Research. 2014. V. 1013. P. 91-96	Perevalova O.B., Konovalova E.V., Koneva N.A., Ivanov K.V.

Доктор физико-математических наук,
профессор



Э. В. Козлов

Ученый секретарь Ученого совета
Томского государственного
архитектурно-строительного
университета



Ю. А. Какушкин

Печать организации