

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский
государственный университет им. К.Л.
Хетагурова», доктор экономических наук,
профессор

Огоев А.У.

«01» 12 2017 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Бжихатлова Кантемира Чамаловича «Поверхностная сегрегация и ее влияние на некоторые свойства нанослоев на поверхности твердых растворов меди с марганцем, германием и алюминием», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 - физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика.

Термостимулированная поверхностная сегрегация в многокомпонентных системах приводит к изменению состава и физических свойств границы раздела между контактирующими телами. При этом, поверхностный слой, где имеет место поверхностная сегрегация, имеет нанометровую толщину и, по праву, относится к нанообъектам. Теоретическое и экспериментальное изучение таких сверхтонких слоев сопряжено со многими трудностями принципиального характера. Диссертационная работа Бжихатлова К.Ч. посвящена экспериментальному исследованию поверхностной сегрегации компонентов бинарных сплавов Си с Mn, Al и Ge методами низкоэнергетической электронной спектроскопии и дифракции медленных электронов. Результаты экспериментальных исследований используются для получения разнообразной информации о термодинамических и динамических свойствах поверхностей ряда бинарных растворов, находящихся в моно- и поликристаллическом состоянии. Исследуемые системы интересны благодаря тому, что они широко применяются в производстве приборов микро- и наноэлектроники, в том числе и в качестве материала межсоединений в интегральных схемах.

Ультратонкие пленки системы Cu-Mn также привлекают повышенное внимание ввиду их способности формировать двумерные сплавы с дальним магнитным порядком. Они представляют интерес в технологии «самоформирующегося» диффузионного барьера. Сульфид меди применяется в гетеропереходах для солнечных элементов (в качестве прозрачной составляющей гетероперехода p-Cu_{1.8}S - n-ZnS), полупроводниковых фотоэлементов, фото- и термопреобразователях, поляризаторах инфракрасного излучения и лазерах с перенастраиваемой частотой излучения. Исходя из изложенного, можно сделать вывод об актуальности диссертационной работы Бжихатлова К.Ч.

В соответствии с целями и задачами диссертационной работы, автором были получены следующие результаты, характеризующиеся высокой степенью новизны и оригинальности: методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ) проведено комплексное экспериментальное исследование сегрегации на сплавах меди с Mn, Al и Ge. На основе полученных экспериментальных данных рассчитаны термодинамические свойства поверхности монокристаллов, (100) Cu-4 ат. % Mn, (111) Cu-10 ат. % Al и (111) Cu-2 ат. % Ge по данным ЭОС. Эти данные позволят более точно прогнозировать свойства поверхности исследуемых сплавов.

Автором установлен режим формирования двумерной фазы Cu₂S на поверхности монокристаллической меди с малой примесью серы. В частности, определена температура и время формирования сверхструктуры, что позволит прогнозировать условия выращивания пленок на основе сульфида меди.

Кроме того, в работе определены динамические характеристики поверхности монокристаллического сплава (100) Cu-4 ат. % Mn (температура Дебая и среднеквадратичные колебания атомов на поверхности).

Научная и практическая значимость работы определяется тем, что полученные данные могут быть использованы для анализа разнообразных моделей, применяемых на практике, и дальнейшего развития теории поверхностных явлений в гетерогенных системах. Кроме того, результаты исследования могут найти применение в технологии изготовления тонких слоев с заданными свойствами, например, диффузионных барьеров, элементов гетеропереходов и защитных пленок.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется использованием метрологически аттестованного экспериментального оборудования и признанных методик анализа результатов ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ, корректным анализом и обработкой имеющихся экспериментальных данных и согласованностью полученных результатов с данными, представленными в литературных источниках.

Диссертация Бжихатлова К.Ч. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений.

Во введении автором обоснованы цель и задачи исследования, актуальность и степень разработанности выбранной темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе представлен литературный обзор, посвященный поверхностной сегрегации в многокомпонентных системах. В ней рассматриваются современные теории поверхностной сегрегации и критерии предельной поверхностной активности добавок. Кроме того, рассмотрены экспериментальные результаты исследования поверхностной сегрегации в сплавах на основе меди. В обзоре приведены результаты, полученные методами ЭОС, ДМЭ, СХПЭЭ, а также СТМ, РФЭС, РЭМ, ПЭМ. Наличие подобных работ указывает на интерес научного сообщества как к поверхностной сегрегации в целом, так и к поверхностной сегрегации в бинарных сплавах на основе меди.

Во второй главе диссертации описываются методы исследования, используемые в данной работе. Приведено подробное описание электронного спектрометра для комплексного анализа поверхности твердых тел, на котором проводились исследования методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ. Изложены методики подготовки монокристаллических и поликристаллических образцов, а также методика расчета среднего состава поверхностного слоя по данным ЭОС.

Во второй части главы приведены результаты комплексного экспериментального исследования поверхности бинарных сплавов Cu-Mn, Cu-Ge и Cu-Al методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ. Среди исследованных образцов, по нашему мнению, наибольший интерес представляет система медь-марганец, где возможно формирование поверхностного слоя нанометровой толщины с дальним магнитным порядком. Автором подробно изучена температурная зависимость состава поверхности монокристалла (100) Cu - 4 ат. % Mn и поликристалла Cu - 22,5 ат. % Mn. В обоих случаях, при увеличении температуры концентрация марганца растет, достигает

максимума и затем падает. Предельное значение содержания марганца на поверхности достигается при температуре 675 К. Максимальное значение для монокристалла составило 28 %, а для поликристалла 55 %. Исследования методом СХПЭЭ подтвердили результаты, а также позволили оценить профиль распределения марганца по глубине. Для поликристаллического образца обнаружено заметное изменение спектров ХПЭЭ при температуре около 700 К, что возможно указывает на растянутый по температуре фазовый переход типа «порядок – беспорядок».

Для систем Cu-Al и Cu-Ge зависимости концентрации примеси от температуры имеют аналогичный характер и при нагреве от комнатной температуры концентрация примеси растет, достигает максимума и затем падает. Максимум на зависимости состава от температуры для монокристалла (111) Cu - 10 ат. % Al наблюдается при 625 К, а для (111) Cu-2 ат. % Ge при 575 К.

Стоит отметить подробное исследование дифракционных картин на грани (100) монокристалла Cu-4 ат. % Mn. При нагреве дифракционные рефлексы немонотонно меняли форму и интенсивность. В главе приведены зависимости интенсивности зеркального дифракционного рефлекса от энергии первичного пучка и температуры нагрева. Несмотря на то, что, нагрев не приводит к реконструкции поверхности, обнаружено изменение яркости и формы дифракционных рефлексов.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований состава и структуры наноразмерных слоев, формирующихся в процессе термостимулированной сегрегации на поверхности монокристаллической и поликристаллической меди с малой примесью серы. Получены электронные спектры для различных значений температуры, времени нагрева и энергии первичного пучка. Благодаря полученным данным определено температура и время формирования сверхструктуры на поверхности меди. При этом предельная концентрация серы на поликристалле меньше, чем на монокристалле. Данное явление объясняется сегрегацией на границах зерен, куда уходит часть серы из объема образца.

В этой же главе приведены результаты исследований фазового состава и морфологии после экспозиции исследуемых образцов в атмосфере. Методом РФА обнаружены фазы оксидов, образовавшихся при отжиге бинарных сплавов. На поверхности сплавов Cu-Al и Cu-Ge доля оксидов заметно ниже, чем на медно-марганцевых сплавах.

Четвертая глава посвящена расчетам физических свойств поверхности с использованием полученных автором экспериментальных данных. Автором рассчитаны поверхностное натяжение, параметры адсорбции и термодинамическая активность компонентов на поверхности для бинарных систем Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge. Для грани (100) монокристалла меди-марганец определены значения температуры Дебая, среднеквадратичные смещения атомов, температурный коэффициент поверхностного натяжения и электронная плотность. Полученные данные позволяют прогнозировать влияние температуры на важные свойства поверхности бинарных систем (проводимость, термодинамическую активность компонентов, адгезионные свойства, механическую прочность и ряд других).

Автором разработаны программные модули для расчета физических свойств поверхности по данным ЭОС и ДМЭ. Подробно описаны алгоритмы и интерфейс разработанных программ, что показывает умение соискателя автоматизировать научные исследования и работать с современными языками программирования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Диссертация написана грамотно как с научной, так и с грамматической точки зрения. Автор владеет знаниями, достаточными для профессионального изложения сути и особенностей рассматриваемых в работе задач.

Все научные результаты диссертационной работы полностью апробированы и опубликованы в 9 статьях в научных журналах (5 из которых в журналах, рекомендованных ВАК) и в 23 материалах конференций.

По тексту диссертации имеется ряд **замечаний**.

1. В третьей главе проводилось исследование кинетики формирования двумерного сульфида на поверхности монокристалла меди. Исследования проводились при температуре 825 К. При этом автор никак не обосновал выбранную температуру и не проводил подобного исследования для других значений температуры. В дальнейшем соискателю рекомендуется исследовать кинетику формирования сульфида во всем интервале температур, что позволит более полно прогнозировать формирование фазы Cu_2S на поверхности меди.

2. Автором наиболее подробно исследована методом ДМЭ бинарная система Cu-Mn, для которой, в частности, получен широкий набор дифракционных картин и на его основе рассчитаны динамические свойства

поверхности монокристалла. Подобные исследования не проведены для бинарных сплавов Cu-Al и Cu-Ge. По нашему мнению, такие результаты также представляли бы научный интерес.

3. В тексте имеются некоторые ошибки и неточности, допущенные при оформлении диссертации. В частности, в автореферате в подписи рисунка № 6 указана грань (111), хотя из текста понятно, что речь идет о поликристаллической меди.

4. В диссертации состав поверхностного слоя обозначен как $x_i^{(o)}$, то есть поверхность обозначается верхним индексом в скобках. Но в разделе 4.1.2 используется X_b . Данное отличие обозначений ничем не объясняется и затрудняет понимание алгоритма расчета коэффициентов диффузии.

Приведенные замечания ни в коей мере не снижают научной и практической значимости работы.

Заключение

Диссертационное исследование Бжихатлова Кантемира Чамаловича на тему: «Поверхностная сегрегация и ее влияние на некоторые свойства нанослоев на поверхности твердых растворов меди с марганцем, германием и алюминием» является законченной научно-практической работой, в которой содержатся решения задач, имеющих существенное значение для развития рассматриваемой области знаний (физико-математические науки, физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика). Работа выполнена на высоком профессиональном уровне, обладает научной новизной и практической значимостью. Диссертант проявил себя как сложившийся специалист в области физики и технологии наноструктур.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационное исследование «Поверхностная сегрегация и её влияние на некоторые свойства нанослоев на поверхности твердых растворов меди с марганцем, германием и алюминием» представляет собой научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям (п.п. 9,10 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842). Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.15 «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика» (пункты 4, 8 и 10). Материалы диссертации в полном объеме изложены в работах, опубликованных соискателем, которые соответствуют требованиям, предусмотренным пунктами 11, 13 и 14 «Положения о порядке присуждения

ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор диссертации Бжихатлов Кантемир Чамалович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 - Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика.

Отзыв составлен, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой физики конденсированного состояния Магкоевым Тамерланом Таймуразовичем (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова», 362025, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46, Тел.: +7 (918) 822-45-95;
E-mail: t_magkoev@mail.ru)

Отзыв обсужден и одобрен на заседании объединенного семинара кафедры физики конденсированного состояния и федерального центра коллективного пользования научным оборудованием «Физика и технологии наноструктур» ФГБОУ ВО «СОГУ им. К.Л. Хетагурова», «27» ноября 2017г., протокол № 03.

Заведующий кафедрой физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «СОГУ им. К.Л. Хетагурова»,
доктор физико-математических наук,
профессор

Магкоев Т.Т.

Директор ЦКП
«Физика и технологии наноструктур»
ФГБОУ ВО «СОГУ им. К.Л. Хетагурова»,
кандидат физико-математических наук,
профессор

Блиев А.П.

Подпись  и А.П. Блиева удостоверена.
Зам. начальника кафедры физики конденсированного состояния
Л.М. Даринова
07.12.2017