

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

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.

**Оценка актуальности.**

Поверхностная сегрегация в многокомпонентных системах проявляется в отклонении состава поверхностного слоя между существующими фазами от состава этих фаз. Поверхностная сегрегация является одним из свойств гетерогенной системы в равновесном состоянии. Поверхностная сегрегация определяет ход ряда физических и химических процессов, играет важную роль в технологии производства электронных приборов и устройств.

Трудности изучения поверхностного слоя связаны с его уникальностью как физического объекта. Макроскопичность в двух измерениях сочетается в нем с микроскопичностью в третьем. Поверхностный слой принципиально не существует в отрыве от объемных фаз существующих с ним. Его свойства быстро меняются в нормальном к поверхности направлении, в связи с чем само понятие поверхностного слоя условно.

Сегрегированный слой на поверхности сплава во многих случаях обладает уникальными свойствами. Так ультратонкие пленки медно-марганцевого сплава способны формировать двумерные сплавы с дальним магнитным порядком. Пленки Cu-Al и Cu-Ge могут применяться в качестве «диффузионного барьера» для защиты медной металлизации. Нанослои сульфида меди используются в качестве прозрачной составляющей гетероперехода в полупроводниковых фотоэлементах, преобразователях солнечной энергии и лазерах с перенастраиваемой частотой излучения. Поэтому тема диссертационной работы Бжихатлова К.Ч., посвященная

поверхностной сегрегации в медных сплавах с марганцем, германием и алюминием, является **актуальной**.

### **Оценка научной новизны.**

Обсуждаемая работа по ряду позиций отвечает требованиям новизны.

Впервые проведен комплексный анализ состава, атомно-электронной структуры и свойств поверхности бинарных сплавов меди с Mn, Al и Ge в моно- и поликристаллических состояниях методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ). В поликристалле Cu – 22.5 ат. % Mn и монокристалле (100) Cu–4 ат. % Mn, наблюдается поверхностная сегрегация компонентов. Исследования зависимости состава поверхности от температуры показали, что при нагреве от комнатной температуры до 675 К поверхность обогащается марганцем. Концентрация марганца при данной температуре для поликристалла составила 55%, а для монокристалла 28%. Дальнейший нагрев приводит к снижению концентрации марганца на поверхности. При этом восходящая и спадающая зависимости поверхностной концентрации от температуры различны.

Поведение спектров характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) коррелирует с результатами ЭОС и подтверждает наличие максимума на температурной зависимости состава поверхностного слоя. На основе экспериментальной зависимости интенсивности пиков на спектрах ХПЭЭ от энергии первичного определялся профиль распределения примеси по глубине. Показано, что марганец распределен немонотонно – с максимумом на втором атомном слое.

С целью исследования атомной структуры и динамических свойств поверхности автором получены данные ДМЭ поверхности монокристалла (100) Cu 4 ат. % Mn. В работе приведены не только сами дифракционные картины, но и зависимости интенсивности зеркального рефлекса от энергии первичного пучка и температуры, причем, как в процессе нагрева, так и в процессе охлаждения. На дифракционной картине после нагрева и охлаждения

образца изменилась форма и интенсивность рефлексов, но сверхструктурные рефлексы не наблюдаются. Это свидетельствует о том, что 4% Mn в объеме недостаточно для образования двумерной фазы с дальним магнитным порядком.

Получены результаты изучения процесса поверхностной сегрегации на монокристаллах (111) Cu с 2 ат. % Ge и (111) Cu с 10 ат. % Al. Зависимость состава поверхности от температуры для обоих образцов имеет максимум. При нагреве до определенной температуры поверхность обогащается атомами добавки. Концентрация Ge на поверхности достигает максимума 18% при температуре 575 К, а концентрация Al 0,35% при температуре 625 К. Дальнейший нагрев приводит к уменьшению концентрации добавки на поверхности. Таким образом, общий ход температурной зависимости состава поверхностного слоя одинаков для исследованных объектов.

Исследование сплава Cu-Ge методом ДМЭ показало, что нагрев приводит к появлению на дифракционных картинах слабых добавочных рефлексов от сверхструктуры ( $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ) R 30°.

#### **Оценка степени достоверности и обоснованности научных положений и выводов диссертационной работы.**

Высокая степень достоверности экспериментальных результатов обусловлена следующими особенностями обсуждаемой работы.

Для получения экспериментальных результатов применялись апробированные методы исследования поверхности твердых тел, а именно, электронная оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и дифракция медленных электронов (ДМЭ). Измерения проводились в сверхвысоком вакууме порядка  $10^{-8}$  Па. При откачке не использовались масляные насосы.

Для исследования поверхности образцов сплавов применялись рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ.

Таким образом, достоверность экспериментальных результатов обусловлена надежностью использованных методов исследования и соответствием этих методов поставленным задачам.

Научные положения и выводы диссертации соответствуют современным представлениям о природе поверхности твердых тел, базируются на полученных результатах и тем самым вполне обоснованы.

По материалам диссертации опубликовано достаточное число работ, в том числе в авторитетных журналах, входящих в список ВАК и индексированных в SCOPUS и WOS. Материалы диссертации доложены на международных конференциях.

#### **Оценка значимости для науки и практики полученных в диссертации результатов.**

Полученные в диссертации данные по влиянию термостимулированной поверхностной сегрегации на свойства поверхности бинарных сплавов меди с Mn, Ge и Al интересны для дальнейшего развития современных теоретических представлений о структуре и свойствах поверхности твердых растворов. Кроме того, эти результаты могут быть использованы в дальнейшем для получения диффузионных барьеров, элементов гетеропереходов и защитных пленок.

#### **В процессе изучения работы возникли некоторые пожелания, вопросы и замечания.**

1. Достоверность получаемых результатов должна подтверждаться, в частности, их повторяемостью в серии экспериментов с идентичными образцами, проводимых в одних и тех же условиях. Сведений о проведении такого рода повторных измерений в тексте диссертационной работы нет.

2. Некоторые важные и интересные результаты, вскользь упоминаемые в тексте, не представлены должным образом, в частности, графически. Полезно было бы показать кинетику изменения состава поверхности в процессе отжига. Политермы состава поверхности, интенсивности пиков ХПЭ сплавов и других свойств следовало бы показать не только для режима роста температуры отжига, но и в режиме охлаждения. Более того, несомненный

интерес представляли бы полимеры, полученные в результате нескольких циклов нагрева и охлаждения.

3. Отсутствуют попытки связать полученные результаты с теорией или моделями сегрегации.

4. Расчет поверхностного натяжения осуществляется на основе формулы

4.1. При расчете молярной поверхности не учтена возможность отличия поверхностного слоя от монослоя. Среди исходных параметров, которые вводятся в программный комплекс (стр. 117) отсутствуют коэффициент упаковки  $f_{up}$ , число соседних атомов в атомных слоях  $Z_l$  и  $Z_v$ , входящие в расчетную формулу. Выводы о знаковой корреляции между отклонением от идеальности по поверхностному натяжению и теплотой смешения представляются тривиальными, поскольку непосредственно следуют из расчетной формулы 4.1.

5. Встречаются отдельные текстовые неточности и недостатки оформления работы. Отсутствует список сокращений и обозначений, что затрудняет понимание текста. Нередко библиографическое описание источников выполнено не должным образом: под номерами 10, 11 и т.д. использованной литературы отсутствуют названия статей, не соблюдается определенный порядок следования фамилии и инициалов авторов, отсутствует том или номер журнала (напр., 21).

Выявленные недостатки не снижают научной и практической значимости рассматриваемой диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация выполнена на актуальную тему. Основные результаты обладают научной новизной и практической ценностью. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Материалы диссертации опубликованы в авторитетных научных изданиях, доложены на Международных конференциях и получили одобрение специалистов.

Содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 01.04.15 - Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика (п. 4, 8, 10).

Диссертационное исследование «Поверхностная сегрегация и ее 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 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а автор исследования 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.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры общей и специальной физики  
Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
доктор физико-математических наук,  
доцент  Саввин В.С.  
«29» 11 2017г.  
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студенческий городок 1  
Тел.+7 (919) 034-77-96  
E-mail: [savvin-vs@yandex.ru](mailto:savvin-vs@yandex.ru)

Подпись профессора Саввина В. С. заверяю  
Проректор НИЯУ МИФИ  
и. о. первого заместителя  
директора ИАТЭ НИЯУ МИФИ



Леонова Т. Н.