

БЖИХАТЛОВ КАНТЕМИР ЧАМАЛОВИЧ

**ПОВЕРХНОСТНАЯ СЕГРЕГАЦИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА
НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА НАНОСЛОЕВ НА
ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ МЕДИ
С МАРГАНЦЕМ, ГЕРМАНИЕМ И АЛЮМИНИЕМ**

01.04.15 – Физика и технология наноструктур,
атомная и молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» на кафедре физических основ микро- и нанoeлектроники.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шебзухов Азмет-гери Аюбович

Официальные
оппоненты: **Дадашев Райком Хасимханович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Чеченский государственный
университет» (г. Грозный), заведующий кафедрой

Саввин Владимир Соломонович,
доктор физико-математических наук, доцент,
Обнинский институт атомной энергетики –филиал
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (г. Обнинск),
профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный
университет им. К.Л. Хетагурова» (г. Владикавказ)

Защита диссертации состоится «21» декабря 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.076.11 созданного на базе ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» и на сайте <http://diser.kbsu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Квашин Вадим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Поверхностная сегрегация в бинарных сплавах приводит к изменению состава ультратонкого (наноразмерного) приповерхностного слоя и, в определенных условиях, вызывает реконструкцию поверхности. Эти процессы заметно влияют на физико-химические свойства приповерхностной области, что бывает критичным для приборов микро и нанoeлектроники. При этом, информация о параметрах сегрегации позволяет прогнозировать изменение состава и создавать поверхностные слои с заданными свойствами, что в свою очередь позволяет конструировать новые приборы. Поверхностная сегрегация наблюдается для бинарных систем на основе меди, в том числе и на поверхности исследуемых в данной работе систем Cu-S, Cu-Mn, Cu-Ge и Cu-Al.

Медь и сплавы на ее основе и достаточно широко применяются в производстве приборов микро- и нанoeлектроники, в том числе и в качестве межсоединений. Кроме того, бинарные сплавы на основе меди обладают рядом свойств, позволяющих расширить область применения данного металла. В частности, ультратонкие пленки системы Cu-Mn привлекают повышенное внимание благодаря их способности формировать двумерные сплавы с дальним магнитным порядком. Такие пленки представляют интерес в технологии "самоформирующегося" диффузионного барьера. Не менее перспективными являются ультратонкие пленки сульфида меди, которые широко используются в различных современных устройствах, таких как солнечные элементы (в качестве прозрачной составляющей гетероперехода p-Cu_{1,8}S - n-ZnS), полупроводниковые фотоэлементы, ионные проводники, фото- и термопреобразователи, поляризаторы инфракрасного излучения и лазеры с перенастраиваемой частотой излучения.

Для анализа структуры, состава и физико-химических процессов в наноразмерных слоях на поверхности сплавов более всего подходят неразрушающие методы электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ), позволяющие получать информацию на атомно-электронном уровне при этом не нарушающие структуру и состав поверхности исследуемого образца.

Цель работы

Цель настоящей работы состоит в изучении процесса термостимулированной сегрегации и ее влияния на физические свойства поверхности медных сплавов с различными добавками методами электронной спектроскопии и дифракции медленных электронов.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Методами электронной спектроскопии и дифракции медленных электронов провести комплексное исследование состава, структуры и электронных свойств наноразмерных слоев, формирующихся в процессе

термостимулированной сегрегации на поверхности сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge в реальных условиях.

2. Провести экспериментальное исследование кинетики формирования поверхностных фаз на поликристаллической и монокристаллической меди.

3. Разработать программные модули для автоматизации расчетов термодинамических и динамических параметров поверхности образца по данным ЭОС и ДМЭ.

4. Рассчитать поверхностное натяжение, адсорбция компонентов, коэффициенты активности и энергия сегрегации в сплавах на основе меди.

5. Рассчитать динамические свойства поверхностного слоя медно-марганцевых сплавов.

Научная новизна

В ходе выполнения работы получены следующие результаты, обладающие признаками научной новизны:

1. Рассчитаны термодинамические свойства поверхности монокристаллов, (100) Cu-4 ат. % Mn, (111) Cu-10 ат.% Al и (111) Cu-2 ат.% Ge по данным ЭОС.

2. Установлен режим формирования двумерной фазы Cu₂S на поверхности монокристаллической меди с малой примесью серы.

3. Определены динамические характеристики поверхности монокристаллического сплава (100) Cu-4 ат. % Mn.

Теоретическая значимость работы

Данные о составе, атомно-электронной структуре и фазовых переходах в наноразмерных слоях, формирующихся при поверхностной сегрегации, могут представлять интерес для нанoeлектроники, нанотехнологии и создания наноматериалов. Новые данные о закономерностях поверхностной сегрегации могут быть использованы для построения теоретических моделей поверхности твердого тела.

Практическая значимость работы

Полученные данные о влиянии примесей и отжига на поверхность меди позволят создавать тонкие слои с заданными свойствами: диффузионные барьеры, элементы гетеропереходов и защитные пленки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Поверхностная сегрегация в бинарных сплавах меди с марганцем, алюминием и германием в моно- и поликристаллических состояниях, по данным ЭОС, зависит от температуры, объемного состава, кристаллографической ориентации грани и особенностей приготовления поверхности образцов.

2. Атомная структура и электронные характеристики поверхности бинарных твердых растворов Cu с Mn, Al и Ge, определенная методами ДМЭ и СХПЭЭ, изменяется при перераспределении компонентов между поверхностью и объемом в результате поверхностной сегрегации.

3. Поверхностная сегрегация Mn, Al и Ge в бинарных сплавах меди сопровождается изменением поверхностного натяжения, адсорбции (N-вариант), температурного коэффициента поверхностного натяжения и термодинамической активности компонентов.

4. Экспозиция в кислородной среде медных сплавов с Mn, Al и Ge и сегрегация серы из объема меди, по данным ЭОС, ДМЭ и СХПЭЭ, приводит к фазообразованию на поверхности при различных температурах

5. Термостимулированная поверхностная сегрегация вызывает изменение динамических характеристик поверхности монокристалла твердого раствора (100) Cu-4 ат. % Mn (температура Дебая и среднеквадратичные смещения).

Личный вклад автора

Диссертантом подготовлены образцы моно- и поликристаллических сплавов медь-марганец и проведены измерения методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ. Кроме того, разработаны программные модули для автоматизации расчетов параметров поверхности по данным ЭОС и ДМЭ. В опубликованных статьях соавторам принадлежит примерно равные доли творческого участия. Выводы, сделанные в настоящей работе, принадлежат автору.

Апробация результатов

Основные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: Международная научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Перспектива 2010» (Нальчик, 2010); Первый Междисциплинарный, международный симпозиум «Физика межфазных границ и фазовые переходы (МГФП-1)-(IPBPT-1)» (г. Нальчик – п. Лоо, 2011); IV Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2011); 14-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» - ОМА-14 (Ростов-на-Дону, п. Лоо, 2011); 15-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» - ОМА-15 (Ростов-на-Дону, п. Лоо, 2012); Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) (г. Нальчик – п. Лоо, 2012); V Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2012); VIII Международная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Курск, 2011); IX Международная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Астрахань, 2012); VI Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2014); Международная научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Перспектива 2015» (Нальчик, 2015); VII Международная научно-

техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2015); Пятый Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) (г. Нальчик – г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный, 2015 г.); VIII Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2016); Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника» (пос. Эльбрус, 2017); IX Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 2017).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях (5 из которых в журналах, рекомендованных ВАК) и материалах 23 конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и основных выводов и содержит 177 страниц машинописного текста, включая 102 рисунка, 10 таблиц и список литературы из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и конкретные задачи, отмечена новизна полученных в работе результатов и сформулированы основные защищаемые положения.

В первой главе приведены общие сведения о поверхностной сегрегации и ее проявлениях в различных физико-химических средах. Здесь же приведены основные критерии и теории поверхностной сегрегации. В частности, рассмотрены критерий предельной поверхностной активности, критерий обобщенных моментов, критерий статистического адсорбционного момента, критерий атомного объема, критерий поверхностного натяжения и другие.

Кроме того, в главе приводится краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований методами низкоэнергетической электронной спектроскопии, посвященных поверхности чистой меди и бинарных сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge.

Вторая глава посвящена сегрегации в бинарных твердых растворах меди с марганцем, германием и алюминием. В ней приведено описание электронного спектрометра, совмещенного с дифрактометром медленных электронов. Энергетическое разрешение спектрометра, оснащенного энергоанализатором «задерживающее поле», составляет ~0,5 %, а его чувствительность по основным элементам лежит в пределах 0,1...0,5 ат. %. Спектрометр позволяет исследовать различные материалы в сверхвысоком вакууме $\sim 10^{-8}$ Па методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ.

В данной главе описаны способ изготовления и подготовка монокристаллических образцов чистой меди с примесью серы и бинарных сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge. Для бинарных сплавов приведены фазовые диаграммы. Стоит отметить, что качество подготовки образцов контролировалось внутри вакуумной камеры методами ЭОС и ДМЭ.

Кроме того, представлены результаты экспериментальных исследований методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ монокристаллического сплава (100) Cu-4 ат. % Mn, поликристаллического сплава Cu-22,5 ат. % Mn и монокристаллических сплавов Cu-2 ат. % Ge и Cu-10 ат. % Al. Состав поверхности образцов при различных температурах определялся по спектрам ЭОС, записанных в равновесных условиях. Полученная зависимость для монокристалла и поликристалла Cu-Mn приведена на рисунке 1.

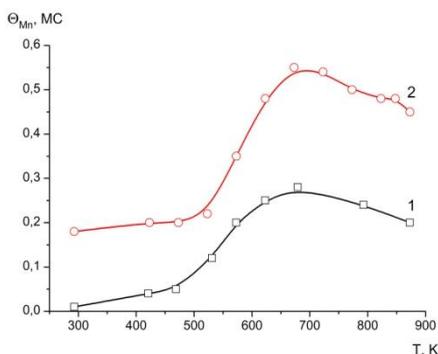


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации Mn (в атомных долях) на поверхности сплава (100) Cu-4 ат. % Mn (1) и поликристалла Cu-22,5 ат. % Mn (2).

Согласно данным ЭОС при комнатной температуре в результате селективности ионно-аргонного распыления концентрация Mn в поверхностном слое (100) Cu-4 ат. % Mn ниже, чем в объеме ($\theta_{Mn} \sim 0,02$ при $x^b = 0,04$ атомных долей в объеме). Нагрев в интервале 475...675 К приводит к обогащению поверхности образцов марганцем. Максимальная концентрация Mn достигается при $T \approx 675$ К и она составляет $\theta_{Mn} \approx 0,28$ (рис. 1, кривая 1). При дальнейшем повышении температуры содержание марганца в поверхностном слое снижается и при $T = 875$ К падает до 0,2. Спадающая часть температурного профиля концентрации ($T \sim 675 \dots 875$ К) воспроизводится при нагреве и охлаждении образцов, что свидетельствует о равновесном состоянии поверхности. В процессе охлаждения от 675 К до комнатной температуры θ_{Mn} незначительно снижается и при $T = 300$ К составляет $\sim 0,17$. Таким образом, восходящая часть ($T \sim 300 \dots 675$ К) профиля $\theta_{Mn}(T)$ не воспроизводится и относится к неравновесной сегрегации.

Для поликристаллического образца наблюдается схожее поведение зависимости $\theta_{Mn}(T)$. При комнатной температуре концентрация марганца немного ниже, чем в объеме и составляет $\sim 0,2$ МС. При отжиге концентрация примеси повышается и достигает максимума $\theta_{Mn} \approx 0,55$ МС при $T \approx 675$ К, а дальнейший нагрев приводит к уменьшению содержания марганца до $\theta_{Mn} \approx 0,45$ МС при $T = 875$ К. Корреляция формы профилей $\theta_{Mn}(T)$, полученных для (100) Cu-4 ат. % Mn и поликристалла Cu-22,5 ат.% Mn, а также совпадение температуры максимумов на этих кривых указывают на близость физических механизмов, определяющих состав поверхности исследованных сплавов.

Зависимости состава от температуры отжига для монокристаллов Cu - 2 ат. % Ge и Cu - 10 ат. % Al приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

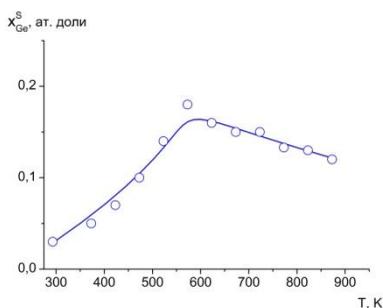


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации германия на поверхности Cu - 2 ат. % Ge.

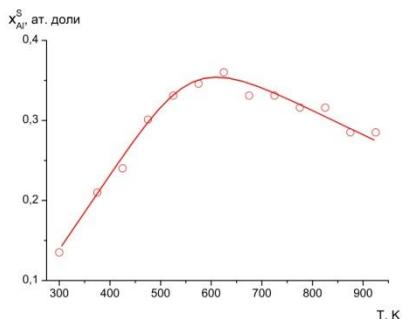


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации алюминия на поверхности Cu - 10 ат. % Al.

Как видно из данных рисунков, при нагреве поверхность обоих образцов обогащается атомами добавки, причем сегрегация Ge на поверхности достигает максимума $\sim 0,18$ (в ат. долях) вблизи 575 К, в то время как концентрация Al стремится к насыщению ($\sim 0,35$) при $T \sim 625$ К. В области $T > 575$ (для Ge) и $T > 625$ (для Al) К с ростом температуры поверхностная концентрация добавки медленно снижается. То есть поведение зависимостей $x(T)$ для германия и алюминия схожа с поведением для марганца в поликристаллическом и монокристаллическом образцах и на зависимости можно выделить участки неравновесной (низкие температуры) и равновесной сегрегации (высокие температуры).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований состава и структуры наноразмерных слоев, формирующихся в процессе термостимулированной сегрегации на поверхности монокристаллической меди с малой примесью серы. Грань (111) монокристаллической меди с малой примесью серы исследовалась методами ЭОС, ДМЭ и СХПЭЭ. Для контроля качества очистки поверхности образца были

записаны обзорные спектры ЭОС до очистки и после 5 циклов ионно-аргонного распыления с последующим отжигом. На рисунке 4 приведены спектры ЭОС (111) Cu до и после очистки. Как видно из рисунка, после очистки концентрация примесей становится ниже порога чувствительности спектрометра.

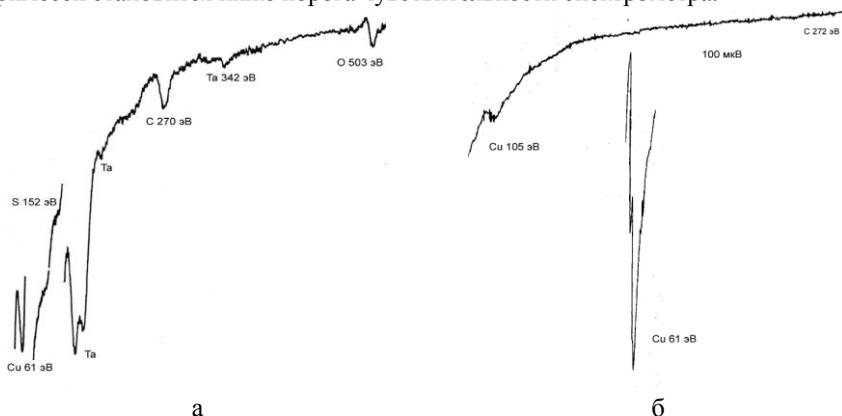


Рис. 4. Обзорные оже-спектры, полученные на монокристалле (111)Cu: а - до очистки поверхности, б - после 5 циклов нагрев - ионно-аргонного распыление поверхности.

По данным ЭОС при нагреве сера сегрегирует на поверхность меди начиная с температуры ≈ 525 К, достигая равновесного покрытия $\theta_s \sim 0,3 \dots 0,35$ МС при температурах выше 825 К. По мере роста доли площади, занимаемой поверхностной фазой, скорость сегрегации снижается (рис. 5). Стоит отметить, что равновесное покрытие серы $\theta_s \sim 0,33$ МС соответствует усредненному составу двумерной фазы сульфида Cu_2S .

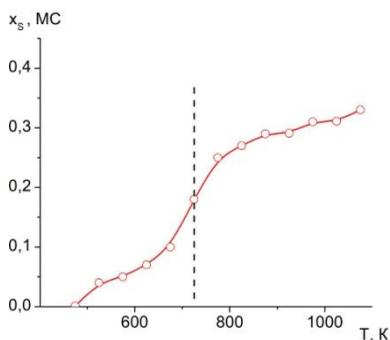


Рис. 5. Температурная зависимость концентрации серы на поверхности (111) Cu, по данным ЭОС. Пунктиром отмечена температура появления доменов упорядоченной поверхностной фазы Cu_2S .

Зависимость спектров ЭОС от температуры отжига записывалась и для поверхности поликристаллического медного образца. Результаты измерения поверхностной концентрации серы как функции температуры представлены на рисунке 6.

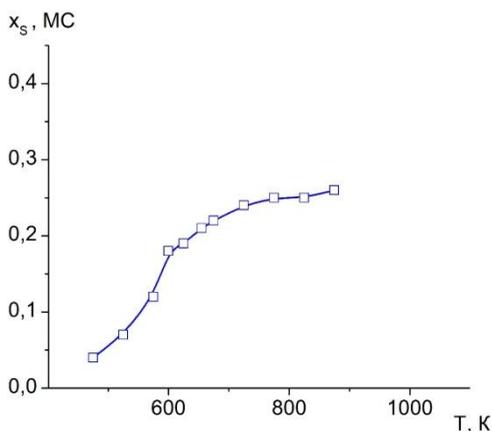


Рис. 6. Температурная зависимость концентрации серы на поверхности (111) Cu, по данным ЭОС.

По данным ЭОС содержание серы в приповерхностном слое меди при 575 К составляет ~12 ат. %, при 875 К уже ~26 ат. %. при максимальных температурах отжига концентрация серы близка к стехиометрической для сульфида меди. Как видно из рисунка 6. общий ход кривой для поликристалла схож с кривой для монокристалла меди (рис. 5).

Сопоставление данных, полученных методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ позволило определить температурные и концентрационные интервалы стабильности поверхностных структур Cu-S, формирующихся на монокристаллической меди.

Для определения стехиометрии были изучены дифракционные картины после отжига, где виден сверхструктурный шестиугольник с расщепленными рефлексами (рис. 7), что свидетельствует о структуре $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$, которая соответствует сульфиду Cu_2S с уплотненной структурой (например, $Cu_{1,8}S$). Равновесное покрытие серы для данной структуры при этом составляет $\theta_s \sim 0,33$ МС, что близко к составу (111) Cu при высоких температурах по данным электронной оже спектроскопии (рис. 5).

Для определения температуры формирования сульфида на поверхности спектры ХПЭЭ регистрировали как функцию температуры отжига образца при ступенчатом нагреве ($T = 295 \dots 875$ К) в условиях близких к равновесию. Спектры характеристических потерь при различных

температурах, а также соответствующие покрытия серы θ_S (в долях монослоя), рассчитанные из данных ЭОС, приведены на рисунке 8.

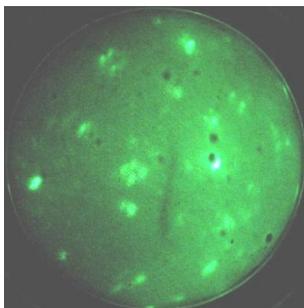


Рис. 7. Дифракционная картины от поверхности образца S/(111)Cu после нагрева до 875 К и охлаждения до комнатной температуры.

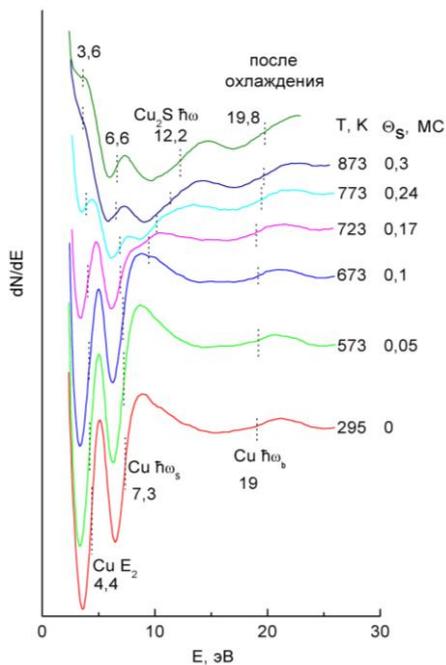


Рис. 8. Спектры ХПЭЭ от поверхности (111) Cu в зависимости от температуры отжига (θ_S – покрытие серы в долях монослоя). Справа указана концентрация серы на поверхности по данным ЭОС.

Как видно из рисунка, спектры заметно изменяются с ростом температуры: падает интенсивность плазменных пиков меди, при 675 К проявляются пики серы, интенсивность которых растет с температурой. После охлаждения пики становятся более интенсивными, что можно объяснить рассеянием плазмонов на фононах при высоких температурах. На спектрах видно изменение состава поверхности: пик Cu поверхностной природы ($\text{Cu } \hbar\omega_s$, $\Delta E=7,6$ эВ) и межзонная потеря ($\text{Cu } E_2$, $\Delta E=4,3$ эВ) в диапазоне $T = 675 - 725$ К начинают резко уменьшаться, то есть уменьшается количество атомов меди на поверхности. Кроме того, при 675 К появляется пик сульфида серы ($\text{Cu}_2\text{S } \hbar\omega$, $\Delta E = 11$ эВ), который при нагреве сильно увеличивается. Это свидетельствует о появлении новой фазы на поверхности – сульфида меди. Пик 19 эВ до 675 К практически не меняется (растет до 525 К и падает до 575 К), а после – заметно увеличивается. Выше температуры 825 К пики 11 и 19 эВ перестают заметно изменяться.

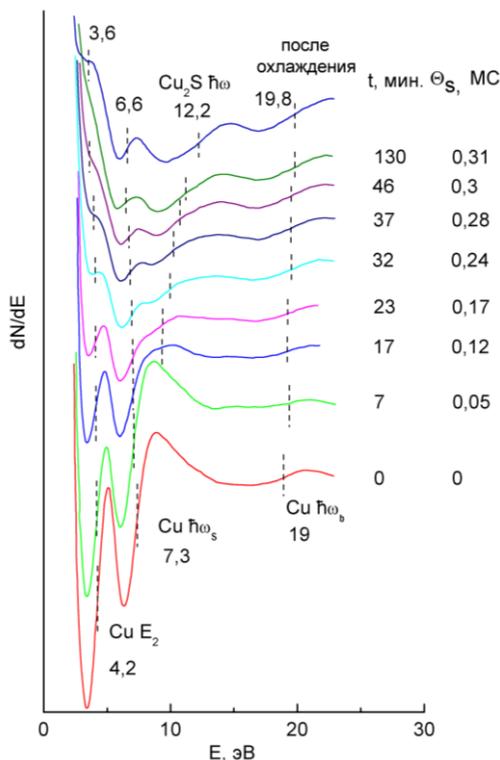


Рис. 9. Спектры ХПЭЭ от поверхности Cu(111) в зависимости от времени отжига при $T = 825$ К (θ_s – покрытие серы в долях монослоя).

Для изучения кинетики формирования поверхностной фазы были записаны спектры для различных значений времени отжига при $T = 825$ К, которые показаны на рисунке 9. На этом рисунке можно проследить образование новой фазы на поверхности монокристалла меди. На исходном спектре ($t = 0$ мин.) видны пики 4,2 эВ, 7 эВ и 19 эВ. Эти пики сильно изменяются в процессе отжига с течением времени. пики межзонной потери (4,3 эВ) и поверхностного плазмона (7,6 эВ) падают со временем (это является следствием падения концентрации меди и роста доли серы на поверхности), и практически не меняются после 32 и 37 минут отжига, соответственно. Пик 9,3 эВ, связанный с серой, появляется при 17 минутах отжига, и затем растет с выходом в насыщение при $t > 46$ мин. У пика 18,3 эВ заметен перегиб, до 7 минут его интенсивность падает, затем растет. Он тоже выходит в насыщение при $t > 46$ мин. Из этих данных можно сделать вывод, что сегрегация начинается почти сразу же, а формирование новой фазы после 17 минут отжига. К 45 минутам новая фаза уже сформировалась. После охлаждения спектр имеет форму, схожую со спектром при 130 мин. отжига, но с более выраженными пиками.

Кроме того, в третьей главе описано экспериментальное изучение фазового состава и морфологии поверхности сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge после экспозиции в кислородной среде. Образцы изучались методами РФА, СЭМ и РСМА. Термическую обработку сплавов проводили в воздушной среде в условиях естественной влажности (~60 %). Максимальная температура отжига составила $T = 640$ К при длительности 5 минут, при этом скорость нагрева и охлаждения не превышала ≈ 3 К/с.

Четвертая глава посвящена расчетам характеристик поверхностного слоя бинарных твердых растворов марганца, германия и алюминия в меди по данным ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ. В ней приведены разработанные программные модули для автоматизации расчетов термодинамических параметров поверхности на основе данных ЭОС и ДМЭ, результаты расчетов термодинамических свойств приповерхностного слоя сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge и динамических характеристик для сплава (100) Cu-4 ат.%Mn, полученные по данным ДМЭ

Разработка программных модулей велась на объектно-ориентированном языке программирования C# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2013. Программные модули представляют собой оконные приложения для операционных систем семейства Windows (проект Windows Form), что позволяет реализовать современный и удобный интерфейс и упростить работу с файлами для сохранения результатов расчетов.

Программный модуль для расчета диффузионных характеристик по данным ЭОС позволяет на основе зависимости состава поверхности от времени отжига рассчитать коэффициент диффузии. Кроме того, программа рассчитывает значения фактора диффузии и энергии активации. Для такого расчета необходимо знать, как минимум, два коэффициента диффузии, что

позволит рассчитать D_0 и E_A из системы уравнений. Поэтому в программном модуле возможно ввести две зависимости $x(t)$ для разных значений температуры отжига образца. Для расчета в программном модуле применяется уравнение кинетики сегрегации для малых времен сегрегации, связывающее коэффициент диффузии с концентрацией примеси в поверхностном слое и временем отжига образца. Кроме того, в уравнение входят состав объема образца и размеры атомов примеси и основного вещества.

Процесс работы программы состоит из следующих этапов: пользователь вводит данные о исследуемых веществах в отдельные поля, причем заполнение полей возможно из готовой базы данных, представляющей собой обычный текстовый файл. Затем вводятся основные параметры вещества в соответствующие поля, причем стоит отметить что данные объекты в программе представлены в виде массива текстовых полей. Затем, при нажатии на кнопку «Расчет» происходит расчет диффузионных характеристик по введенным данным и вывод результата в соответствующие поля. При этом в отдельной области формируются графики зависимостей концентрации от времени и температуры отжига. Кроме того, в программном модуле добавлена возможность сохранять и загружать результаты расчетов в отдельные файлы.

В формуле расчета коэффициента диффузии входят значения размеров атомов растворителя и примеси. Так как литературные данные удобно хранить в самой программе, а не загружать их при каждом новом расчете, для хранения значений r была создана база данных. Она представляет собой отдельный файл, в каждой строке которого записано название элемента и размер его атома. В программе эти данные представлены в виде текстового файла, в качестве разделителя в котором используется символ пробела.

Так же разработан программный модуль для расчета поверхностного натяжения по данным ЭОС, который работает в рамках статистической теории регулярных растворов, где поверхностное натяжение можно выразить из данных о составе объема и поверхности. Для работы программы необходимо ввести параметры образца (его кристаллографическую грань и энергию смещения компонентов), и его компонентов (молярную массу, плотность, σ , $d\sigma/dT$) и зависимость состава поверхности от температуры, на основе чего рассчитывается поверхностное натяжение бинарной системы. При этом в программе формируются графики зависимости состава и поверхностного натяжения от температуры отжига образца.

Кроме описанных выше программ разработан модуль для автоматизации построения профиля дифракционного рефлекса, который позволяет по ДМЭ изображению построить профиль дифракционного рефлекса. Внешний вид программного модуля приведен на рисунке 10.

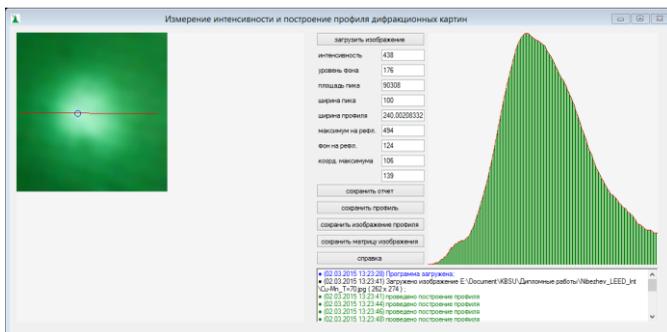


Рис. 10. Интерфейс программы для построения профилей дифракционных рефлексов

По полученным профилям возможно провести расчет динамических параметров поверхности. Эти расчеты реализованы в отдельной программе.

В соответствии с моделью твердого тела Дебая интенсивность дифракционного рефлекса в кинематическом приближении экспоненциально падает с температурой. По наклону прямой зависимости $\ln I_{\text{рф}}(T)$ (графики Дебая – Валера) можно определить температуру Дебая и эффективные величины колебаний атомов на поверхности. Для проведения расчета вводятся параметры эксперимента (энергию и угол падения первичного пучка), данные о материале образца (молярную массу) и зависимость интенсивности дифракционного рефлекса от температуры.

Данные ДМЭ позволяют рассчитать и температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Поскольку температурный коэффициент поверхностного натяжения связан с отношением частоты колебаний атомов в объеме и на поверхности монокристалла, а это отношение, в свою очередь, связано с интенсивностями зеркального пучка на дифракционной картине или с температурой Дебая, то возможно провести расчет $d\sigma/dT$ по данным ДМЭ. Этот расчет так же был автоматизирован в виде отдельной программы: пользователь вводит параметры кристаллической структуры образца (тип решетки и грань, на основе которых рассчитываются координационные числа на поверхности и в объеме), интенсивности и условия получения четырех дифракционных пиков.

Все разработанные программы позволяют сохранять результаты расчетов в виде текстового файла с отчетом или таблицы. Все построенные в программах графики сохраняются в виде изображений для дальнейшего использования. Это позволит заметно упростить и ускорить процесс обработки экспериментальных данных, полученных на спектрометре для комплексного анализа твердых тел.

С помощью разработанных программных модулей проведен расчет поверхностного натяжения образцов (100) Cu – 4 ат.% Mn, (111) Cu – 10 ат.% Al,

(100) Cu – 2 ат. % Ge. Результаты расчетов приведены на рисунках 11, 12 и 13, соответственно. Кривая 1 соответствует уменьшению с температурой поверхностного натяжения чистого растворителя (меди), кривая 2 показывает изменение σ твердого раствора без учета межатомного взаимодействия ($\Delta H_{mix}=0$, приближение идеального раствора), кривая 3 отражает влияние на σ температуры и поверхностной сегрегации с учетом межатомных взаимодействий (регулярный раствор). Для наглядности по верхней горизонтальной оси обоих графиков отложены температурные зависимости концентрации примеси на поверхности сплавов, вычисленные из данных ЭОС.

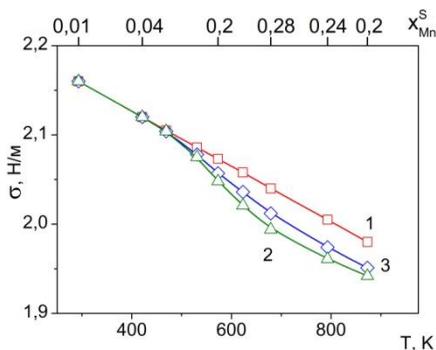


Рис. 11. Температурная зависимость поверхностного натяжения грани (100) Cu с 4 ат. % Mn: 1 – поверхностное натяжение чистой меди, 2 – расчет для идеального раствора ($\Delta H_{mix}=0$), 3 – расчет с учетом межатомных взаимодействий.

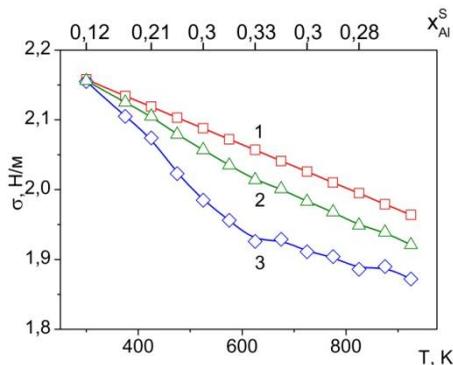


Рис. 12. Температурная зависимость поверхностного натяжения грани (111) Cu с 10 ат.% Al: 1 – поверхностное натяжение чистой меди, 2 – расчет для идеального раствора ($\Delta H_{mix}=0$), 3 – расчет с учетом межатомных взаимодействий.

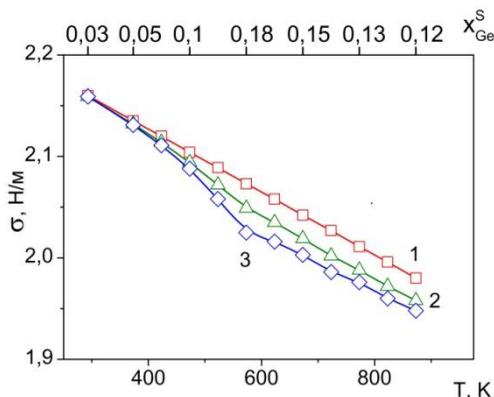


Рис. 13. Температурная зависимость поверхностного натяжения грани (100) Cu с ат. % Ge: 1 – поверхностное натяжение чистой меди, 2 – расчет для идеального раствора ($\Delta H_{mix}=0$), 3 – расчет с учетом межатомных взаимодействий.

Как видно из рисунков, поверхностное натяжение разбавленных твердых растворов изменяется согласовано с поверхностной концентрацией добавки, однако влияние сегрегации на σ невелико. Это влияние зависит от характера межатомных взаимодействий. Преимущественное взаимодействие разнородных атомов отражает тенденцию к упорядочению (Cu-Ge и Cu-Al, отрицательная теплота смешения) и приводит к отрицательному отклонению от идеальности (кривая 3 ниже кривой 2 на рис. 12 и 13). В системе Cu-Ge при 2 ат. % добавки в объеме сплава максимальное понижение σ (по сравнению с чистой Cu) составляет $\approx 3\%$, а для Al – $\approx 5\%$. Предпочтительное взаимодействие однородных атомов соответствует тенденции к расслоению (Cu-Mn, положительная теплота смешения) и положительному отклонению от идеальности (кривая 3 выше кривой 2 на рисунке 11).

По дифракционным картинкам для сплава (100) Cu-Mn определены температура Дебая и среднеквадратичные смещения атомов. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Динамические характеристики поверхности сплава (100) Cu-4 ат. % Mn для равновесного и неравновесного состояний

Нагрев			Охлаждение после отжига		
T, K	θ_{\perp}° , K	$U_{\perp, cp}^2, 10^{-22}$	T, K	θ_{\perp}° , K	$U_{\perp, cp}^2, 10^{-22}$
343-697	207	1,6	317-476	158	2,75
675-865	64	16,8	439-823	91	8,3

Из таблицы видно, что сегрегация Mn влияет на температуру Дебая θ_{\perp}^s и среднеквадратичные колебания атомов $U_{\perp,cr}^2$ поверхности (индекс \perp соответствует нормали к поверхности), вычисленные из температурной зависимости интенсивности брэгговского рефлекса (00) первого порядка. Поверхность, обогащенная Mn, характеризуется (по сравнению с распыленной) более низкой величиной θ_{\perp}^s , и соответственно, большими значениями $U_{\perp,cr}^2$. Это означает, что в результате сегрегации взаимодействие поверхностных атомов с решеткой ослабляется.

Кроме того, в главе приведены результаты расчетов термодинамической активности, коэффициента активности компонентов сплавов Cu-Mn, Cu-Al и Cu-Ge, расчет температурного коэффициента поверхностного натяжения и электронной плотности для сплава Cu-Mn.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование методами ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ поверхности ряда монокристаллических и поликристаллических образцов медных сплавов в диапазоне температур от комнатной до ≈ 900 К.

2. Выявлено, что концентрация марганца при нагреве растет и достигает максимума при температуре 675 К, дальнейший нагрев понижает содержание Mn на поверхности до $\theta_{Mn} \approx 0,2$ для (100) Cu-4 ат. % Mn и $\theta_{Mn} \approx 0,45$ для Cu-22,5 ат.% Mn. Температурные зависимости спектров ХПЭЭ для (100) Cu – 4 ат. % Mn и Cu – 22,5 ат.% Mn также имеют особенности в интервале $T \sim 650...750$ К, включающем температуру атомного разупорядочения в объеме сплава $T_k \approx 675$ К.

3. Дифракционные исследования грани (100) монокристалла Cu-Mn показали, что сплав после ионного травления имеет нереконструированную поверхность со структурой (100)-(1 \times 1). Уровень обогащения Mn, полученный в результате отжига, недостаточен для реконструкции поверхности и формирования сверхструктуры. При этом атомная структура поверхности изменяется – дифракционные рефлексы сужаются, а их интенсивность падает, что свидетельствует об изменении атомной структуры поверхности.

4. Установлено, что при нагреве поверхность монокристаллов (111) Cu – 2 ат.% Ge и (111) Cu – 10 ат.% Al обогащается атомами добавки и достигает максимальной концентрации при определенной температуре ($\theta_{Ge} \approx 0,18$ при $T=575$ К для Cu-Ge и $\theta_{Al} \approx 0,18$ при $T=575$ К для Cu-Al). Дальнейший нагрев приводит к понижению концентрации примеси на поверхности. На температурной зависимости состава поверхности можно выделить области неравновесной (низкие температуры) и равновесной сегрегации (высокие температуры)

5. Исследование сегрегации серы на монокристалле меди показало, что нагрев (111) Cu приводит к обогащению поверхности примесной серой,

причем при $T > 675$ К избыточная сера упорядочивается с образованием сверхструктуры Cu (111)- $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ -S. При этом формируется двумерный сульфид меди со стехиометрией Cu_xS , где $x \approx 2$. При исследовании кинетики ($T = 825$ К) обнаружено, что химическое взаимодействие Cu-S и формирование спектра ХПЭЭ, характерного для фазы Cu_2S , резко ускоряется при времени выдержки $t \sim 17$ мин., когда на поверхности (111) Cu содержание серы достигает ≈ 12 ат. %. Зависимость состава от температуры отжига для поликристалла меди имеет схожее поведение. Сегрегация серы наблюдается уже с 500 К, а при максимальных температурах отжига концентрация серы близка к стехиометрической для сульфида меди (0,33 МС).

6. Разработан ряд программных модулей для автоматизации расчетов параметров поверхности по данным ЭОС и ДМЭ, в частности: программа для расчета поверхностного натяжения по данным о составе поверхности, полученным из спектров ЭОС, программа для расчета параметров диффузии по двум зависимостям $x(t)$, программа для построения профилей дифракционных рефлексов и измерения их параметров, программа расчета температуры Дебая и СКС по зависимости интенсивности дифракционных рефлексов от температуры отжига образца, программа для счета $d\sigma/dT$ по данным ДМЭ. В разработанных программных модулях реализованы возможности использования базы данных с табличными значениями, сохранения и загрузки результатов расчета, построения графиков с рассчитанными зависимостями и их сохранение в файл.

7. Поверхностное натяжение разбавленных твердых растворов, рассчитанное по данным ЭОС, изменяется согласовано с поверхностной концентрацией добавки, при этом преимущественное взаимодействие разнородных атомов отражает тенденцию к упорядочению (для Cu-Ge и Cu-Al теплота смешения имеет отрицательное значение), а предпочтительное взаимодействие однородных атомов соответствует тенденции к расслоению (Cu-Mn, положительная теплота смешения).

8. По данным ДМЭ рассчитаны динамические характеристики для равновесного и неравновесного состояния поверхности: характеристическая дебаевская температура и среднеквадратичные смещения атомов. Поверхность, обогащенная Mn, характеризуется (по сравнению с распыленной) более низкой величиной температуры Дебая и, соответственно, большими значениями U^2_{\perp} . Это означает, что в результате сегрегации взаимодействие поверхностных атомов с решеткой ослабляется. Кроме того, рассчитано значение $d\sigma/dT$ для (100) Cu-Mn, которое составило $-2,055 \times 10^{-4}$ Дж/(м²·К).

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бжихатлов, К.Ч. Влияние температуры на плазмонные возбуждения в поверхностном слое упорядочивающегося сплава Cu–22.5 ат. % Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 3. – С. 429–432.
2. Бжихатлов, К.Ч. Применение метода СХПЭЭ «на отражение» для оценки локальных физических свойств поверхности сплавов Cu-Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76. – № 13. – С. 50–52.
3. Сергеев, И. Н. Атомная структура и электронные свойства поверхности монокристаллического сплава (100) Cu-4 ат.% Mn / И. Н. Сергеев, К. Ч. Бжихатлов, А. А. Шебзухов // Известия РАН. Серия физическая. 2014 – Т. 78. – № 1. – С. 120–123.
4. Сергеев, И. Н. Температурная зависимость движущих сил поверхностной сегрегации в сплавах Cu–Ge и Cu–Mn / И. Н. Сергеев, К. Ч. Бжихатлов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 5. с. 61–67.
5. Сергеев, И.Н. Поверхностная сегрегация и поверхностное натяжение грани (100) монокристаллов Cu-Al и Cu-Mn при различных температурах / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2015. Т. 5. № 3. С. 5–9.
6. Бжихатлов, К. Ч. Влияние термостимулированной сегрегации на плазмонный резонанс и плотность валентных электронов в поверхностном слое сплава Cu-Mn / К. Ч. Бжихатлов, И. Н. Сергеев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. - Тверь: Твер. гос. ун-т. 2011. - Вып. 3. - 284 с. С. 20-26.
7. Бжихатлов, К. Ч. Влияние сегрегации на морфологию поверхности сплава (100)Cu-4 ат. % Mn / К. Ч. Бжихатлов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. - Тверь: Твер. гос. ун-т, 2012. – Вып. 4. – 364 с. – С.19-25.
8. Сергеев, И.Н. Движущие силы поверхностной сегрегации в сплавах Cu-Ge и Cu-Mn / И.Н. Сергеев, К. Ч. Бжихатлов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. - Тверь: Твер. гос. ун-т. – 2013. – Вып. 5. – 440 с. – С.282-289.
9. Сергеев, И.Н. Оценка поверхностного натяжения твердых растворов Cu-2 ат.% Ge и Cu-4 ат. % Mn на основе данных оже-электронной спектроскопии / И.Н. Сергеев, К. Ч. Бжихатлов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под

общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. - Тверь: Твер. гос. ун-т. - 2013. - Вып. 5. - 440 с. - С.290-295.

10. Бжихатлов, К.Ч. Кинетика формирования двумерного сульфида меди по данным СХПЭЭ / К.Ч. Бжихатлов // Перспектива 2010: Материалы Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов - Т. V. - Нальчик: Каб. - Балк. ун-т. - 2010. - 396 с. - 200 экз. - С. 126-129.

11. Дадов, А.А. Влияние адсорбции кислорода на энергию сегрегации алюминия в сплаве (111) Cu-Al / А.А. Дадов, К.Ч. Бжихатлов // Перспектива 2015: Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Т. IV. - Нальчик: Каб. - Балк. ун-т. - 2015. - 360 с. - 160 экз. - С. 139-143.

12. Сергеев, И.Н. Исследование влияния сегрегации на распределение Mn по глубине поверхностного слоя сплава Cu_{77,5}Mn_{22,5} методом СХПЭЭ / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // 14-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» - ОМА-14, Ростов-на-Дону, п. Лоо, 8-13 сентября 2011г. Труды симпозиума. Том II. - Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. - 2011. - 174 с. - С. 109-112.

13. Сергеев, И.Н. Состав и термодинамические характеристики поверхности сплавов Cu-Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // 15-й Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» - ОМА-15, Ростов-на-Дону, п. Лоо, 13-18 сентября 2012г. Труды симпозиума. - Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. - 2012. - 372 с. - С. 357-360.

14. Сергеев, И.Н. Температурная зависимость характеристических потерь энергии в упорядочивающемся сплаве Cu 22,5 ат. % Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // Первый Междисциплинарный, международный симпозиум «Физика межфазных границ и фазовые переходы (МГФП-1)-(РВРТ-1)», г. Нальчик - п. Лоо, 19-23 сентября 2011 г. Труды симпозиума. - Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. - 2011. - 264 с. - С.139-142.

15. Сергеев, И.Н. Оценка локальных физических свойств поверхности металлов и сплавов по энергии плазмонных возбуждений / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов // Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) 18-23 сентября 2012 г. г. Нальчик - п. Лоо. Труды симпозиума. - Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. - 2012. - 216 с. - С.137-140

16. Сергеев, И.Н. Электронная плотность и атомная структура поверхности твердого раствора (100)Cu-4 ат. % Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) 18-23 сентября 2012 г. г. Нальчик - п. Лоо. Труды симпозиума. - Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. - 2012. - 216 с. - С.141-144.

17. Сергеев, И.Н. АСМ-исследование микроструктуры окисленной поверхности сплава (111) Cu-10 ат. % Mn / И.Н. Сергеев, Л.Ж. Журтов, К.Ч. Бжихатлов, И.Э. Ашибоков // Пятый Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) 16-21 сентября 2015 г. г. Нальчик – г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный. Труды симпозиума. Выпуск 5. – Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования. – 2015. – 324 с. – С.231-234.
18. Сергеев, И.Н. Расчет энергии взаимообмена в твердых металлических растворах на основе данных Оже-электронной спектроскопии / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов // Пятый Международный междисциплинарный, симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ И ФП). «Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions» (PSP&PT) 16-21 сентября 2015 г. г. Нальчик – г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный. Труды симпозиума. Выпуск 5. – Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования. – 2015. – 324 с. С.235-239.
19. Бжихатлов, К.Ч. Термостимулированные эффекты и плазмонные возбуждения в поверхностном слое упорядочивающегося сплава Cu 22,5 ат. % Mn / К.Ч. Бжихатлов, И.Н. Сергеев, А.А Шебзухов // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IV Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2011. – 256 с. – С. 86-91.
20. Бжихатлов, К.Ч. Использование плазмонных возбуждений для анализа физических свойств поверхности / К.Ч. Бжихатлов // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы V Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2012. – С. 95-97.
21. Сергеев, И.Н. Влияние нагрева в окислительной среде на состав и морфологию поверхности меди с добавками Al, Ge и Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Мурзабекова, М.У Чимова // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VI Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2014. – 510 с. – С. 42-46.
22. Сергеев, И.Н. Адсорбция атомов добавки на внешней границе раздела и ее влияние на поверхностное натяжение сплавов (111)Cu-Ge и (100)Cu-Mn / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Мурзабекова // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VI Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2014. – 510 с. – С. 47-51.
23. Бжихатлов, К.Ч. Моделирование профилей распределения элементов по глубине на основе данных ЭОС / К.Ч. Бжихатлов // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VI Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2014. – 510 с. – С. 52-56.
24. Бжихатлов, К.Ч. Программный модуль для построения профилей дифракционных рефлексов / К.Ч. Бжихатлов // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VII Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2015. – 392 с. – С. 357-361.

25. Сергеев, И.Н. Влияние сегрегации примесной серы на зернограничную прочность электротехнической меди / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.Р. Дадов, М.М. Кунтишев // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VII Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2015. – 392 с. – С. 69-73.
26. Бжихатлов, К.Ч. Программный модуль расчета поверхностного натяжения по данным ЭОС / К.Ч. Бжихатлов, Р.А. Хачетлов, А.О. Таашев // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы VIII Международной научно-технической конференции – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т. – 2016. – 442 с. – С. 426-430.
27. Сергеев, И.Н. Особенности формирования двумерного сульфида меди при поверхностной сегрегации серы на грани (111) Cu (по данным ЭОС, СХПЭЭ и ДМЭ) / И. Н. Сергеев, К. Ч. Бжихатлов, А. А. Шебзухов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: тр. VIII Междунар. Конф. / редкол.: Л.В. Кожитов (отв. ред.) [и др.]; ЮЗГУ; НИТУ «МИСиС» [и др.]; Курск. – 2011. – 986 с. – С. 543-549.
28. Сергеев, И.Н. Состав и электронные свойства двумерных сплавов Cu-Mn, полученных методом поверхностной сегрегации / И.Н. Сергеев, К.Ч. Бжихатлов, А.А. Шебзухов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: труды IX Международной конференции. – Астрахань: Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет». – 2012. – 564 с. – С. 489-497.
29. Подгорный, Г.К. Создание сверхтонких функциональных нанослоев методом межфазной сегрегации для использования в производстве приборов и изделий микро- и нанoeлектроники / Г.К. Подгорный, К.Ч. Бжихатлов // Материалы VI Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективные инновационные проекты студентов, аспирантов и молодых ученых» – Нальчик. – 2016. – 334 с. С. 19-23.
30. Бжихатлов, К.Ч. Программа для расчета термодинамических параметров поверхности монокристаллов по данным ЭОС / К.Ч. Бжихатлов // Международная конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника»: сборник трудов. – М.: МИЭТ. – 2017. – С. 149-153.
31. Бжихатлов, К.Ч. Программный модуль для расчета диффузионных характеристик в приповерхностном слое по данным ЭОС / К.Ч. Бжихатлов, И.А. Хуштов, Р.В. Болотоков // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IX Международной научно-технической конференции – Нальчик: Кабардино – Балкарский университет. – 2017. – С. 475 – 479.
32. Бжихатлов, К.Ч. Программный модуль для проведения количественного Оже анализа / К.Ч. Бжихатлов, А.В. Ногов, В.В. Нарожнов, С.З. Хуранов // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IX Международной научно-технической конференции – Нальчик: Кабардино – Балкарский университет. – 2017. – С. 480 – 484.