

На правах рукописи

Альсурайхи Абдулазиз Салех Али

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА
ЛЕГКОПЛАВКИХ СПЛАВОВ БИНАРНЫХ
И ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СИСТЕМ
С УЧАСТИЕМ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ**

01.04.07 Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НАЛЬЧИК – 2015

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
Хоконов Хазратали Бесланович

Официальные оппоненты: **Дохов Магомед Пашевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский
государственный аграрный университет
им. В.М. Кокова», профессор кафедры
технической механики и физики

Кутуев Руслан Азаевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент, Комплексный НИИ
им. Х.И. Ибрагимова РАН,
зав. лабораторией экспериментальной физики
Ведущая организация: НИИ физики ФГАОУ ВПО
«Южный Федеральный университет»,
(г. Ростов – на – Дону)

Защита состоится «24» июня 2015 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.076.02 на базе ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

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

Автореферат разослан «___» мая 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ахкубеков Анатолий Амишевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование в области физики поверхностных явлений в конденсированных средах охватывает строение и фундаментальные свойства границы раздела фаз, такие как поверхностные энергия и натяжение, работа выхода электрона и адсорбции компонентов системы, структура и состав переходного слоя, смачиваемость материалов, адгезия и др. Особое внимание заслуживают легкоплавкие и щелочные металлы, их сплавы, которые обладают уникальными свойствами как самые низкие значения плотности и вязкости, поверхностного натяжения (ПН) и работы выхода электрона (РВЭ), низкие температуры плавления, высокие значения тепло- и электропроводности. Эти свойства обеспечивают условия для использования их в энергетике как лёгкие теплоносители, в материаловедении как малую добавку для придания композиционным материалам высокую механическую прочность, в радиационной физике как эффективную защиту от тепловых нейтронов и γ -излучений и др.

Представляет интерес получение тонкоплёночных систем, содержащих щелочные металлы в качестве модификаторов поверхностного слоя материалов и тонкоплёночных покрытий, обеспечивающих смачиваемость поверхности и защиту её от коррозии.

В последнее время в КБГУ разработаны оригинальные методы, собраны и широко применяются новые приборы и установки для исследования строения и поверхностных свойств материалов, имеются современные установки, в том числе рентгеновский фотоэлектронный спектрометр (РФЭС) системы K-Alpha. В данной работе решаются достаточно сложные и актуальные задачи: получение тонкоплёночных систем, содержащих щелочные металлы; измерение работы выхода электрона плёнок и сплавов бинарных систем легкоплавких и щелочных металлов; построение уравнений изотерм РВЭ, ПН и адсорбций компонентов, а также проведение соответствующих численных расчётов.

Степень разработанности темы диссертации. Экспериментальное исследование поверхностных свойств сплавов и тонкоплёночных систем, содержащих щелочные металлы, весьма сложно. В литературе имеются сведения о плотности, РВЭ, ПН для жидких бинарных сплавов щелочных металлов; имеются экспериментальные данные по ПН трехкомпонентных сплавов только для одной системы Na–K–Cs, полученные в КБГУ. Данные по поверхностному натяжению сплавов в твёрдом состоянии для этих систем вообще отсутствуют. Отсюда следует, что проблема разработки и создания экспериментальных и аналитических методов изучения поверхностных свойств многокомпонентных систем с участием щелочных металлов весьма актуальна. В данной работе получены экспериментальные и аналитические результаты по поверхностным свойствам сплавов бинарных систем легкоплавких и щелочных металлов, предложен способ построения уравнения изотерм ПН и адсорбции компонентов сплавов через РВЭ.

Цель работы. Исследование поверхностных свойств легкоплавких сплавов бинарных и тонкопленочных систем с участием щелочных металлов.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ и выбор методов получения плёнок, определение их элементного состава методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), расчёт концентраций основных компонентов плёнок Sn–Na и In–Na после очистки их поверхности от адсорбированных примесей.

2. Измерение РВЭ плёнок Sn–Na и In–Na в зависимости от концентрации натрия методом Фаулера, а также плёнок лития высокой чистоты.

3. Построение уравнений изотерм и проведение вычислений РВЭ и ПН плёнок и бинарных систем Sn–Pb, In–Na, Pb–Na, Sn–Na, Na–Cs, Pb–Li и In–Li.

4. Расчёты адсорбций $\Gamma_B^{(N)}(x)$ и поверхностных концентраций x_B^{ω} добавляемых компонентов в сплавах бинарных систем щелочных металлов Na, K, Rb и Cs, а также в системах Sn – Bi (Pb), In–Cs (Rb, K, Na, Li), Pb–Li, в плёнках Sn–Na и In–Na.

5. Установление уравнения связи поверхностного натяжения и работы выхода электрона металлических сплавов, вычисление ПН тонких плёнок через РВЭ.

Научная новизна полученных результатов:

1. Методика получения пленочных систем на базе олова и индия с добавкой натрия, определение концентраций элементов и примесей методом РФЭС.

2. Впервые экспериментально определена работа выхода электрона тонких плёнок (ТП) Sn–Na и In–Na методом Фаулера в зависимости от концентрации натрия во всем концентрационном интервале. Обнаружены на изотермах РВЭ плёнок минимумы в области малых концентраций 15–25 ат. % Na и максимум в области 55–65 ат. % Na и дано им объяснение.

3. Получены уравнения изотерм РВЭ плёнок Sn–Na и In–Na без учета и с учетом наличия химических соединений компонентов; результаты расчётов РВЭ плёнок находятся в хорошем согласии с полученными экспериментальными данными.

4. Составлены аппроксимационные уравнения изотерм ПН и РВЭ сплавов бинарных систем легкоплавких и щелочных металлов, результаты расчётов которых без учета и с учётом особенностей фазовых диаграмм согласуются с экспериментальными данными.

5. Построены изотермы адсорбций натрия в тонких плёнках Sn–Na и In–Na и добавляемых компонентов в системах Sn–Bi, Sn–Pb, Pb–Li, In–Li и щелочных металлов Na–K(Rb, Cs), K–Rb(Cs), Rb–Cs.

6. Впервые получены уравнения изотерм поверхностного натяжения пленок и бинарных систем через РВЭ, которые позволяют построить изотермы ПН и адсорбций компонентов сплавов бинарных и тонкопленочных систем в жидком и твердом состояниях.

Теоретическая и практическая значимость. Модернизированная экспериментальная установка и отработанные методики проведения опытов по

определению РВЭ тонких плёнок используются в научно-исследовательской лаборатории и в лабораториях по спецдисциплинам «Физика тонких плёнок» и «Физика межфазных явлений в конденсированных средах» для студентов по направлениям 03.02.03 – физика, бакалавр и 03.04.03 физика, магистр физики.

Полученные результаты позволяют судить о характере концентрационных зависимостей работы выхода электрона тонких плёнок олово–натрий и индий–натрий; установленное уменьшение РВЭ тонких плёнок Sn–Na около $x_{\text{Na}} = 25,8\%$ и 15% ат. % Na в In–Na позволяет в перспективе использовать их как фотокатоды. Результаты расчётов ПН и РВЭ через составленные уравнения изотерм подтвердили возможность получения данных достаточно высокой достоверности расчетным путём для сплавов бинарных систем. Использование полученных аналитических уравнений ПН позволяет исключить трудности расчётов адсорбций $\Gamma_{\text{В}}^{(\text{N})}(x)$ графическим способом.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований вошли в спецкурсы по физике межфазных явлений и в выпускные работы магистров.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование поверхностных свойств бинарных сплавов и тонкоплёночных систем, содержащих щелочные металлы, требует создания совершенных приборов и устройств. Сложная задача построения теории поверхностных свойств сплавов двух и многокомпонентных систем. Продолжаются многочисленные попытки по разработке теоретических методов, однако приходится пользоваться полуэмпирическими и аппроксимационными методами.

В данном исследовании для измерения работы выхода электрона использован усовершенствованный метод Фаулера, а для получения тонкоплёночных систем использовался метод термовакuumного напыления, который является универсальным и наиболее подходящим методом получения плёночных структур для легкоплавких материалов, что важно для данной работы. Определение элементного состава тонкоплёночных систем проведено на установке РФЭС системы K–Alpha, точность определения концентраций химических элементов оценивалась около $\pm 0,05$ ат. %, а энергии связи электрона в атомах определялись с точностью до $0,1 \div 0,2$ эВ. Для построения изотерм ПН, РВЭ и адсорбции компонентов бинарных сплавов и тонких плёнок использовались разработанные нами уравнения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика получения тонкоплёночных систем и экспериментальное определение их элементного состава; методика и результаты расчетов концентраций основных компонентов плёнок после очистки их поверхностных слоев от примесей.

2. Экспериментальное определение работы выхода электрона тонких плёнок Sn-Na, In-Na и лития; методика и результаты построения уравнения изотермы РВЭ сплавов бинарных систем.

3. Уравнения изотерм и результаты расчётов РВЭ и ПН сплавов бинарных систем с участием Sn, In и Pb, а также Na, Cs и Li.

4. Методика и результаты расчетов изотерм адсорбций $\Gamma_B^{(N)}(x)$ компонентов сплавов бинарных систем Sn–Pb и Sn–Bi в области температур 250–500 °С и щелочных металлов Na–K (Rb,Cs), K–Rb (Na,Cs), Rb–Cs в интервале температур около 400 К.

5. Изотермы поверхностного натяжения $\sigma(x)$ и адсорбций $\Gamma_B^{(N)}(x)$ тонких плёнок Sn–Na и In–Na и бинарных сплавов In–Cs (Rb, K, Na) через РВЭ.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследований по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», включающей теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов. Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1 и 2 Паспорта специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Степень достоверности результатов. В экспериментах в качестве исходных материалов использовались высокочистые металлы индий, олово, натрий и подложки из монокристаллического кремния; осаждение тонкоплёночных систем производилось в вакууме $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ Па и условиях вымораживания потока паров масла из насоса ловушкой с жидким азотом. Определение элементного состава тонкоплёночных систем проводилось на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре РФЭС К–Alpha.

РВЭ плёнок определена методом Фаулера, относительная погрешность измерений $\sim 1,0$ %.

Приборы, на которых получены экспериментальные результаты, проходили систематическую поверку метрологической службы КБГУ.

Результаты расчётов изотерм ПН сплавов систем Sn–Pb и Na–Cs показали средние отклонения 0,20 % и 0,92 %; результаты расчётов РВЭ Na–Cs и In–Na показали отклонения от средних 0,15 % и 0,71 %. Результаты расчётов изотерм РВЭ сплавов системы Pb–Na с учётом наличия химических соединений дали отклонение от экспериментальных данных $\sim 1,5$ %.

Адсорбции компонентов вычислены по проверенным формулам.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, физически обоснованы и не противоречат современным представлениям.

Личный вклад автора. Задачи получения тонкоплёночных систем, исследования их строения, элементного состава, определения РВЭ, ПН и адсорбции компонентов плёнок и легкоплавких бинарных сплавов поставлены научным руководителем Хоконовым Х.Б., который принимал участие в выборе методов решения, обсуждении полученных результатов. Проведение экспериментов, сбор данных и их обработка, описание методики экспериментов, получение уравнений изотерм ПН и РВЭ, расчёты поверхностных

свойств тонких плёнок и бинарных сплавов лёгкоплавких и щелочных металлов, их анализ, выводы и следствия из них, а также подготовка результатов исследований для публикации принадлежат автору.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на симпозиумах и конференциях: II, III и IV Международные междисциплинарные симпозиумы «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (Ростов на Дону, Нальчик, Лоо, Туапсе, 2012–2014 г.); «Баксанская молодежная школа по экспериментальной и теоретической физике (БМШ ЭТФ) – 2012» (Нальчик – Приэльбрусье, 2013г); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива–2013» (Нальчик, 2013 г.); Всероссийская научная конференция по фундаментальным вопросам адсорбции с участием иностранных ученых (Тверь, ТГТУ, 2013 г); VI Международная научно-техническая конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», (Нальчик, КБГУ, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 статей, 3 из них в журналах, рекомендуемых ВАК Российской Федерации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даются обоснование актуальности темы и степень её разработки, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определена научная и практическая ценность результатов и их обоснованность, приводятся выносимые на защиту положения, сведения о публикациях и личный вклад автора в работу.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней приводятся методы получения тонких плёнок, экспериментальные методы определения работы выхода электрона (РВЭ), методы расчетов поверхностного натяжения (ПН) и адсорбции, физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, а также методики расчётов концентраций компонентов в поверхностном слое. Показано, что методы термовакuumного напыления являются одними из наиболее универсальных методов получения плёночных структур. Метод используется для получения плёнок в данной работе.

Фотоэлектронный метод Фаулера является более подходящим для определения РВЭ тонких плёнок лёгкоплавких металлических сплавов с участием щелочных металлов. Уравнение связи между ПН и РВЭ многокомпонентных металлических систем используется нами при составлении уравнения изотермы ПН тонких плёнок лёгкоплавких и щелочных металлов через РВЭ. Метод РФЭС, обладая рядом преимуществ перед другими методами, используются для решения аналитических задач в области диагностики элементного и химического состава твердотельных наносистем и тонких плёнок. В заключении отмечены состояние исследований и актуальность темы, способы решения поставленных задач.

Во второй главе диссертации приводятся описание экспериментальной установки и методики для получения тонкоплёночных систем, результаты определения концентраций компонентов в плёночных образцах Sn–Na–Sn и In–Na–In и их поверхностных слоях, энергии связи электронов в атомах изученных систем методом РФЭС. Приводятся также методика и результаты определения РВЭ плёнок Sn–Na и In–Na в зависимости от концентрации натрия и расчетов изотерм РВЭ сплавов бинарных систем Sn–Na и In–Na, а также экспериментального определения РВЭ плёнок лития высокой чистоты.

Для приготовления тонкоплёночных систем в качестве исходных материалов использовали олово марки ОВЧ, индий марки ИН-00, натрий с ТУ 48-4-445-83 и подложки из монокристаллического кремния марки КДБ-10 размерами $10 \times 7 \times 0,46$ мм³ и кристаллографической ориентацией поверхности (100). Осаждение плёнок производилось на установке УВН-2 методом вакуумно-термического (резистивного) испарения в вакууме $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ Па. Пленки осаждались слоями в последовательности олово–натрий–олово и индий–натрий–индий. В качестве резистивных испарителей применялись лодочки из молибдена, вольфрама, нихрома и тантала для олова и индия. В качестве материала испарителя для натрия выбрана фольга из тантала толщиной 0,1 мм. В напылительной камере имелись два независимых испарителя, в которых отдельно помещались олово (или индий) и натрий. Подводя испаритель под подложку, проводился процесс осаждения олова (или индия). Затем, поменяв испаритель, вторым слоем наносился натрий. Возвращая первый испаритель под подложку третьим слоем наносилось олово (или индий). Длительность напыления олова, индия и натрия составляла –25 секунд.

Определение элементного состава тонкоплёночных систем Sn–Na–Sn и In–Na–In методом РФЭС

Изучение элементного состава поверхностного слоя тонкоплёночных систем (ТПС) проводилось на установке РФЭС с выдержкой 24 часа в условиях атмосферы. За это время на поверхность плёнки осаждались кислород, азот, углерод в свободном состоянии или в виде соединений. Изучены 8 образцов плёнок олово–натрий–олово и 5 образцов индий–натрий–индий. Результаты анализа обзорных спектров концентраций основных элементов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что кроме основных элементов Sn, In и Na обнаружены O, C, Cr, Ta, N, K, W, Mn, Zn, Ni, Cl и Si.

Методом РФЭС определены энергии связи электронов в атомах, число отсчётов которых позволяет определить процентный состав поверхностного слоя образца. Измеренные значения энергии связи электронов представлены в табл. 2 в виде арифметического среднего $\varepsilon = (E_{cp} - E_{сн})/E_{cp} \cdot 100$ %. Легко заметить, что измеренные на опыте значения энергии связи превосходят справочные. Это свидетельствует о том, что атомы кислорода и углерода, а также олова, индия и натрия находятся в состоянии сильного взаимодействия с другими компонентами, находящимися на поверхности исследуемых образцов.

Таблица 1

Результаты определения элементного состава поверхностного слоя плёночных систем Sn–Na–Sn и In–Na–In методом РФЭС

Обнаруженные компоненты, ат. %					
1. Система олово–натрий–олово					
№ образца	Sn	Na	O	C	Другие элементы
1	24,86	2,09	32,85	39,32	Cr(0,88)
2	20,59	5,87	32,48	31,81	Ta(8,07), Ge(0,93)
3	19,66	6,84	40,33	33,16	
4	12,04	7,10	40,69	39,96	
5	11,07	10,76	42,80	33,99	N(1,37)
6	6,82	16,29	40,15	34,23	K(2,17)
7	6,12	16,22	37,29	36,76	W(2,61), Sm(0,99)
8	5,45	14,64	40,57	39,10	
2. Система индий–натрий–индий					
№ образца	In	Na	O	C	Другие элементы
1	28,97	1,5	33,46	35,94	Mn(0,13)
2	16,68	8,45	33,81	37,27	Zn(1,23), N(1,35), Cl(1,21)
3	9,54	6,24	25,35	58,87	
4	6,22	7,91	29,20	56,67	
5	1,62	9,04	31,10	55,11	Si(3,13)

Таблица 2

Результаты измерений энергий связи электронов в атомах основных компонентов ТПС Sn–Na–Sn и In–Na–In

Энергия связи, эВ	Система Sn–Na–Sn			
	Sn 3d	Na 1s	O 1s	C 1s
E_{cp}	488,25	1073,59	533,20	287,18
$E_{сп}$	484,95	1071,40	531,60	284,40
ϵ , в %	0,679	0,204	0,301	0,977
Энергия связи, эВ	Система In–Na–In			
	In 3d	Na 1s	O 1s	C 1s
E_{cp}	446,18	1072,02	533,19	287,14
$E_{сп}$	443,60	1071,40	531,60	284,40
ϵ , в %	0,582	0,058	0,299	0,963

Расчёт концентраций Sn, In и Na в плёнках после очистки их ионным облучением внутри камеры, в которой проводились измерения РВЭ

Для определения исходного содержания основных компонентов тонкоплёночных систем обрабатывались данные табл. 1 по известной методике. Очевидно, что при переносе образца из высоковакуумной камеры (ВВК), где образец приготовлен, в камеру РФЭС на его поверхности адсорбируются

компоненты газовой среды – кислород, азот, углерод и др. При этом не происходит изменение количества атомов основных компонентов (Sn и Na или In и Na) самого образца. Поместив образец в камеру РФЭС и проводив откачку, происходила десорбция адсорбированных молекул из газовой среды. Теперь РФЭ спектрометр будет регистрировать сигналы от присутствующих молекул в слое толщиной до 2,0–2,5 нм. Обозначим через x'_1 и x'_2 концентрации основных компонентов в поверхностном слое. При очистке поверхностного слоя ионным облучением наиболее вероятным является уход компонентов примесей с поверхности образцов. Тогда средние концентрации основных компонентов x_1 и x_2 сохраняются неизменными. При этом соотношения концентраций компонентов до и после очистки сохраняются, то есть

$$\frac{x'_2}{x'_1} = \frac{x_2}{x_1} = a, \quad (1)$$

где x'_1 и x'_2 – концентрации основных компонентов сплава x_{Sn} и x_{Na} (x_{In} и x_{Na}) до удаления примесей облучением (табл. 1), а x_1 и x_2 – после очистки (табл. 3). Здесь x_1 концентрация Sn или In, а x_2 концентрация Na в плёнках, при этом $x_2 = ax_1$. Имея в виду очевидное соотношение

$$x_1 + x_2 = 1, \quad (2)$$

то получим:

$$x_1 = \frac{1}{1+a}, \quad x_2 = \frac{a}{1+a} \quad (3)$$

для основных компонентов бинарного сплава. Используя формулы (1) и (3), вычислены значения x_1 и x_2 . Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рассчитанные по (3) концентрации Sn, In и Na
в пленках Sn–Na и In–Na (в ат. %)

№ образца	Концентрации компонентов плёночных систем, ат. %		
	a	Sn	Na
1	0,084	92,3	7,7
2	0,285	77,8	22,2
3	0,348	74,2	25,8
4	0,59	62,9	37,1
5	0,972	50,7	49,3
6	2,39	29,5	70,5
7	2,65	27,4	72,6
8	2,69	27,1	72,9
№ образца	a	In	Na
1	0,0518	95,1	4,9
2	0,507	66,4	33,6
3	0,654	60,5	39,5
4	1,27	44,1	55,9
5	5,58	15,2	84,8

Отметим, что мы получили концентрации x_1 и x_2 в плёнках достаточной толщины до 2–2,5 нм, то есть x_1 и x_2 являются по существу «объёмными» концентрациями в бинарных сплавах изучаемых образцов.

Определение РВЭ плёнок Sn–Na и In–Na в зависимости от концентрации натрия методом Фаулера

Измерение РВЭ тонких плёнок Sn–Na и In–Na проводилось на установке, блок-схема которой показана на рис. 1, в условиях сверхвысокого вакуума $\approx 10^{-6}$ Па при температуре 300К после очистки поверхности плёнки ионным облучением (Ar^+ , $E = 500$ эВ), отжига при температурах от 180 °С до 225 °С и времени от 25 до 65 минут.

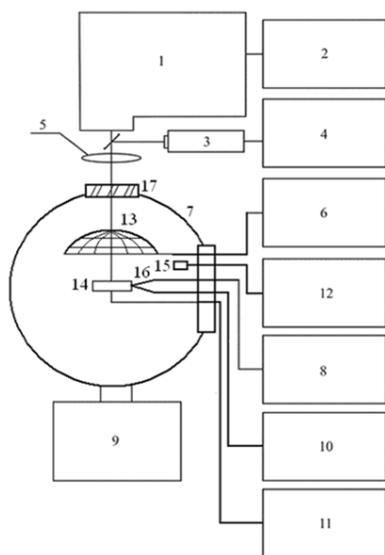


Рис. 1. Блок-схема узла экспериментальной установки для измерения РВЭ металла по методу Фаулера:

- 1 – монохроматор МДР-23;
- 2 – источник света;
- 3 – фотоумножитель ФЭУ-39А;
- 4 – блок питания и измерения интенсивности света;
- 5 – кварцевая линза;
- 6 – электрометрический усилитель У5-6;
- 7 – измерительная ячейка,
- 8 – измерение температуры;
- 9 – вакуумный пост;
- 10 – батарея сухих элементов;
- 11 – система напуска газа,
- 12 – вакуумметр ВИ-14;
- 13 – анодная сетка, 14 – образец;
- 15 – датчики вакуума; 16- термопара;
- 17 – кварцевое окно

Измерения работы выхода электрона плёнок Sn–Na и In–Na проведены с соблюдением всех требований для реализации метода Фаулера.

Результаты определения РВЭ ТП Sn–Na и In–Na представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 2, на изотерме РВЭ системы Sn–Na обнаружены минимум около 25 ат. % Na и изгиб вблизи 70 ат. % Na, которые отражают имеющиеся на фазовой диаграмме интерметаллические соединения Sn_3Na и $SnNa_3$. Изотерма РВЭ системы In–Na проходит через пологий минимум около 15 ат. % Na (рис. 3), который связан с высокой поверхностной активностью компонента Na в системе индий–натрий. Пологий максимум изотермы около 55 ат. % Na охватывает интервал между соединениями $InNa$ и $InNa_2$.

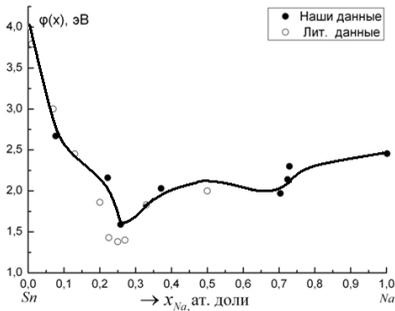


Рис. 2. РВЭ плёнок Sn–Na при 300 К
● – наши экспериментальные данные,
○ – экспериментальные данные [1]

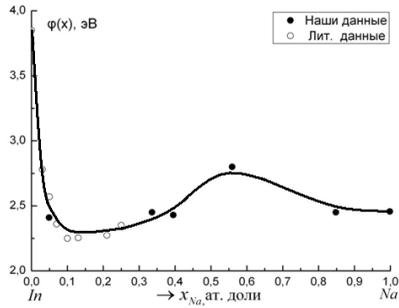


Рис. 3. РВЭ плёнок In–Na при 300 К
● – наши экспериментальные данные,
○ – экспериментальные данные [2]

Уравнение для расчёта изотермы РВЭ двойной системы, предложенное Калажаковым Х.Х и др., запишем в виде:

$$\varphi(x) = \alpha \frac{(F-1)(1-x)x}{1+(F-1)x} + \varphi_A(1-x) + \varphi_B x, \quad (4)$$

где α и F – постоянные, которые определяются из уравнения (4) подстановкой двух известных из экспериментов значений $\varphi(x_1)$ и $\varphi(x_2)$ при $x = x_1$ и x_2 , φ_A и φ_B – работы выхода электрона компонентов А и В, x – концентрация добавляемого компонента В.

На изотермах РВЭ тонких плёнок Sn–Na и In–Na имеются особенности около $x_{Na} = 25,8$ ат. % для плёнок Sn–Na (рис. 4) и около $x_{Na} = 55,9$ ат. % для плёнок In–Na (рис. 5). Сначала построим уравнения (5) и (6) изотерм РВЭ плёнок без учёта этих особенностей

$$\varphi(x) = 4 - 1,54x - 27,822(1-x)x / (1 + 9,207x), \quad (5)$$

$$\varphi(x) = 3,85 - 1,39x - 95,227(1-x)x / (1 + 56,495x). \quad (6)$$

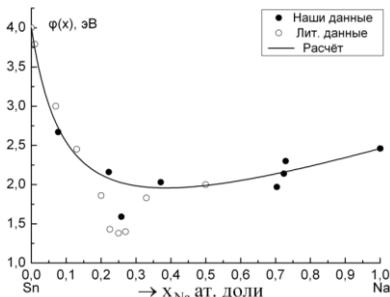


Рис. 4. Изотермы РВЭ плёнок Sn–Na.
Сплошная линия расчёты по (5)

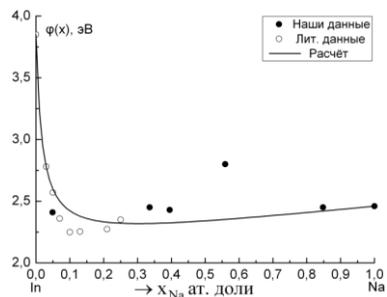


Рис. 5. Изотермы РВЭ плёнок In–Na.
Сплошная линия расчёты по (6)

На рис. 4 и 5 приводятся наши экспериментальные и расчётные по уравнениям (6) и (7) и литературные данные для плёнок Sn–Na In–Na. Легко видеть, что результаты наших расчётов отражают экспериментальные данные лишь качественно.

Теперь построим уравнения $\varphi(x)$ с учетом на изотермах максимумов и минимумов. Для этого интервал концентрации Na делим на два участка $0 - x_{Na}$ и $x_{Na} - 1$, где x_{Na} – концентрация, соответствующая составу соединения или другой особенности фазовых диаграмм. Входные данные для составления по два уравнения изотерм $\varphi(x)$ (7)–(10) каждой плёнки Sn–Na и In–Na в интервалах $0 \leq x_{Na} \leq 1$ и $x_{Na} \leq x \leq 1$ определяются из данных экспериментов. $x_{Na} = 0,258$ ат. доли плёнки Sn–Na и $x_{Na} = 0,559$ ат. доли плёнки In–Na. Получены уравнения изотермы $\varphi(x)$ плёнок Sn–Na соответственно интервалам $0-0,258$ и $0,258-1$ ат. доли Na

$$\varphi(x) = 4,0 - 21,67x - 24,84(1 - 3,876x)/(1 + 15,547x), \quad (7)$$

$$\varphi(x) = 1,287 + 1,173x - 0,09014(1 - x)(x - 0,258)/(3,331 - 9,034x). \quad (8)$$

Уравнения $\varphi(x)$ плёнки In–Na для интервалов $0-0,559$ и $0,559-1$ ат. доли Na

$$\varphi(x) = 3,85 - 1,878x - 70,514(1 - 1,789x)/(1 + 32,498x), \quad (9)$$

$$\varphi(x) = 3,231 - 0,771x - 0,458(1 - x)(x - 0,559)/(2,628 - 2,913x). \quad (10)$$

На рис. 6 и 7 показаны графики уравнений изотерм $\varphi(x)$ плёнок Sn–Na и In–Na с учетом особенности хода изотерм. Как видно, уравнения (7)–(10) систем Sn–Na и In–Na хорошо отражают особенности фазовых диаграмм обеих систем.

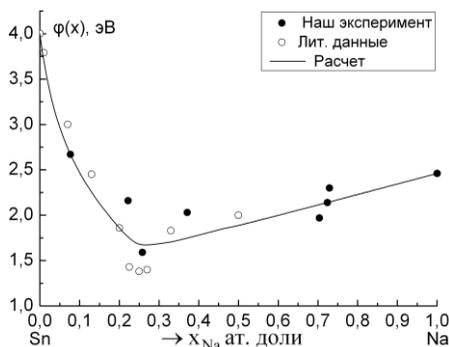


Рис. 6. РВЭ пленок Sn–Na при $T = 300$ К в интервалах $x_{Na} 0 - 0,258$ и $0,258 - 1$

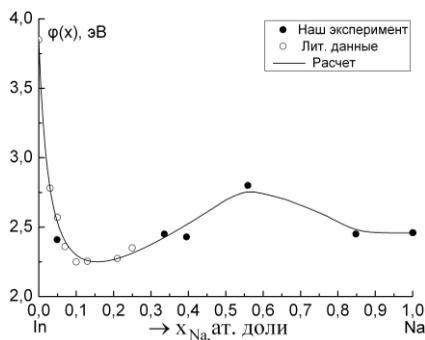


Рис. 7. РВЭ пленок In–Na при $T=300$ К в интервалах $x_{Na} 0 - 0,559$ и $0,559 - 1$

Определение работы выхода электрона поликристаллических плёнок лития

Работа выхода электрона лития измерена абсолютным фотоэлектрическим методом Фаулера на поликристаллических пленочных образцах Li, которые наносились методом термического распыления при температуре около 900К на полированную поверхность стали 12Х18 Н9Т. Погрешность определения РВЭ составила 1,5 %. Исследуемые образцы лития марки ЛЭ-1 предварительно подвергались дополнительной очистке перегонкой в сверхвысоком вакууме при температурах около 900 К.

Температурная зависимость РВЭ лития удовлетворительно описывается линейным уравнением

$$\varphi_{Li}(T) = 2,54 + 9,85 \cdot 10^{-5} T, \quad T \text{ в } ^\circ\text{C}. \quad (11)$$

При комнатной температуре и температуре плавления РВЭ лития составила, соответственно, 2,54 и 2,56 эВ. Температурный коэффициент $d\varphi/dT > 0$ и уменьшается с повышением температуры.

Показано, что в результате фильтрации жидкого лития через молибденовую сетку и трехкратной термической дистилляции в сверхвысоком вакууме РВЭ лития повышается на 10 % (до 2,64 эВ) в сравнении с РВЭ исходного лития ЛЭ-1 технической чистоты (2,38 эВ), а температурный коэффициент уменьшается в шесть раз по абсолютной величине.

В третьей главе приводятся составленные уравнения изотерм ПН, РВЭ, адсорбций $\Gamma_B^{(N)}(x)$ и поверхностных концентраций $x_i^{\text{по}}$ добавляемых компонентов в бинарных системах с участием Sn, In, Pb, Bi, Li и других щелочных металлов; составлены уравнения и проведены расчёты изотерм ПН и адсорбции компонентов тонких плёнок Sn–Na и In–Na через РВЭ.

Для бинарной системы металлов А–В аппроксимационное уравнение изотерм поверхностного натяжения имеет вид [3]:

$$\sigma(x) = \beta \frac{(F-1)(1-x)x}{1+(F-1)x} + \sigma_A(1-x) + \sigma_B x, \quad (12)$$

где β и F – постоянные для данной системы, σ_A и σ_B – ПН чистых компонентов сплава А и В, x – концентрация добавляемого компонента В.

Методика применения уравнения (12) для построения изотерм $\sigma(x)$ подобна изложенной выше для $\varphi(x)$ по уравнению (4), требует значения ПН $\sigma(x)$ двух сплавов произвольных концентраций x_1 и x_2 . Их поочередная подстановка в (12) позволяет определить постоянные β и F и получить уравнение $\sigma(x)$.

Результаты построения уравнения изотерм ПН для бинарных систем Sn–Pb и Na–Cs показывают универсальность применения уравнений типа (12), что подтверждено на примерах построения уравнений для изотерм ПН систем Sn–Pb при 350 и 500 °С, Na – Cs при 100 °С и других.

Расчёт изотермы работы выхода электрона бинарных систем лёгкоплавких и щелочных металлов

Составим теперь уравнения изотерм РВЭ типа (4) бинарных систем Na–Cs, Pb–Na, In–Na, Pb–Li и In–Li, используя наши и литературные экспериментальные данные. Для системы Na–Cs получено уравнение

$$\varphi(x) = 2,39 - 0,45x - 9,947(1 - x)x / (1 + 21,53x). \quad (13)$$

На рис. 8 представлена изотерма $\varphi(x)$ (13). Согласие результатов расчетов с данными экспериментов хорошее. Среднее отклонение составило 0,15 %.

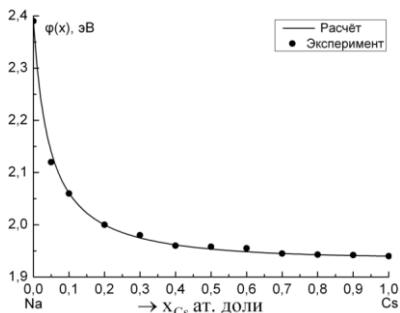


Рис. 8. Работа выхода электрона системы Na–Cs при $T = 100^\circ\text{C}$
 ● – экспериментальные данные
 — — расчет по уравнению (13)

Изотерма РВЭ системы Pb–Na обнаруживает резкий спад РВЭ в интервале концентраций натрия от 0,00 – 0,15 ат. доли, переходящий в пологий минимум в интервале 0,25 – 0,70 ат. доли Na (рисунок 9). Уравнения изотерм РВЭ для системы Pb–Na без учета особенностей уравнение (14) и с их учетом уравнения (15) и (16):

во всем интервале 0,0–1,0 x_{Na}

$$\varphi(x) = 3,607 - 1,178x - 19,621(1 - x)x / (1 + 7,251x), \quad (14)$$

в интервале 0,0–0,5 ат. доли Na

$$\varphi(x) = 3,607 - 3,108x - 43,976(1 - 2x)x / (1 + 25,762x), \quad (15)$$

в интервале 0,5–1,0 x_{Na}

$$\varphi(x) = 1,677 + 0,752x - 1,937(1 - x)(x - 0,5) / (0,821 + 0,358x). \quad (16)$$

На рис. 9 и 10 представлены изотермы $\varphi(x)$ без и с учетом особенностей хода изотерм в виде резкого уменьшения РВЭ, переходящего в пологий минимум. Средние отклонения расчётных от экспериментальных данных составляют без учета особенностей 4,54 % и с их учётом 1,52 %.

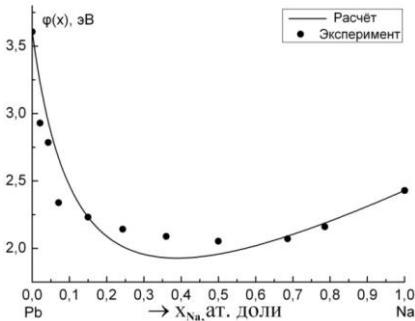


Рис. 9. Работа выхода электрона системы Pb–Na при $T = 300\text{ K}$

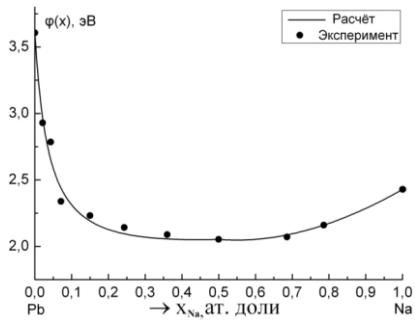


Рис. 10. РВЭ системы Pb–Na в интервалах x_{Na} (0 – 0,5) и (0,5 – 1)

Литий и бинарные системы с его участием представляют значительный интерес. Жидкий Li эффективный теплоноситель ядернокосмической и компонент лёгких авиаматериалов, придавая им высокие механические и тепловые свойства. Сплав LiPb является эффективной защитой от потока тепловых нейтронов, превосходя свинец по защите в 10^4 раз и т.д.

На рис. 11 представлены изотермы РВЭ сплавов бинарных систем Pb–Li и In–Li, на базе которых построены уравнения изотерм (17) и (18) при 300 K

$$\varphi(x) = 4,00 - 1,46x - 11,39(1 - x)/(1 + 1,91x), \quad (17)$$

$$\varphi(x) = 3,85 - 1,31x - 9,36(1 - x)/(1 + 0,60x). \quad (18)$$

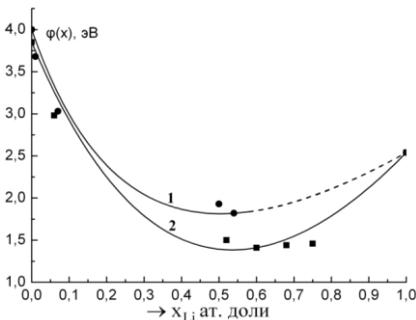


Рис. 11. Работа выхода электрона бинарных систем при $T = 300\text{ K}$: 1 – Pb–Li, 2 – In–Li.

● и ■ – экспериментальные
— — расчетные данные

Как видно уравнения (17) и (18) описывают экспериментальные изотермы РВЭ обеих систем удовлетворительно, достоверность результатов расчётов оценивается около 2–2,5 %. В области $x_{\text{Li}} \approx 70$ ат. % на фазовой диаграмме свинец – литий имеются химические соединения, влияние которых нам пока не известно (рис. 11, пунктир на изотерме 1).

Адсорбции компонентов бинарных сплавов легкоплавких и щелочных систем по N- варианту Гуггенгейма–Адама

Расчёты адсорбции $\Gamma_2^{(N)}$ компонентов системы обычно проводятся по формуле Гуггенгейма–Адама в N-варианте

$$\Gamma_B^{(N)} = -\frac{(1-x)x}{RT} \left(\frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} \right)_{P,T}. \quad (19)$$

При расчетах адсорбции компонентов сплавов важно наличие уравнений изотерм ПН для определения частной производной $(\partial \sigma(x)/\partial x)_{P,T}$. Беря производную $\sigma(x)$ по уравнению (12) и подставляя ее в (19), получим:

$$\Gamma_B^{(N)} = \frac{(1-x)x}{RT} \left[\beta(F-1) \frac{1-2x-(F-1)x^2}{[1+(F-1)x]^2} - (\sigma_A - \sigma_B) \right], \quad (20)$$

где x – концентрация добавляемого компонента В, β и F – постоянные, σ_A и σ_B – ПН чистых компонентов сплава А – В.

По уравнению (20) проведены расчеты изотерм адсорбций $\Gamma_B^{(N)}(x)$ добавляемых компонентов 6-ти бинарных систем Na–Cs (К, Rb), K–Rb(Cs) и Rb–Cs, составив уравнения изотерм ПН всех двойных систем по типу уравнения (12). Как пример приведем составленное уравнение изотермы ПН Na – К (21) и рассчитанную изотерму адсорбции Na (22):

$$\sigma(x) = 205,00 - 91,40x - 357,78(1-x)x/(1+4,02x), \quad (21)$$

$$\Gamma_B^{(N)}(x) = 3,224 \cdot 10^{-10}(1-x)x \left[\frac{357,78(1-2x-4,02x^2)}{(1+4,02x)^2} - 91,4 \right]. \quad (22)$$

На рис. 12 приводятся изотермы адсорбции добавляемых компонентов щелочных металлов всех 6-ти бинарных систем.

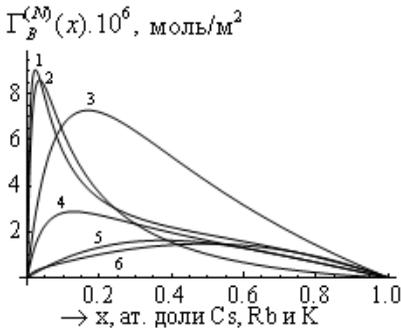


Рис. 12. Изотермы адсорбции добавляемых компонентов в бинарных сплавах:
1 – Na–Cs; 2 – Na–Rb;
3 – Na–K; 4 – K–Cs;
5 – Rb–Cs; 6 – K–Rb

Из рис. 12 видно, что максимальные величины адсорбций добавляемых компонентов бинарных сплавов больше чем дальше находится добавляемый компонент от растворителя в таблице Менделеева. В натриевых системах максимальная величина адсорбции увеличивается с увеличением порядкового номера атома добавляемого компонента.

Поверхностная концентрация вычисляется по следующей формуле:

$$x_2^0 = \frac{x_2 + \omega_{01}^* \Gamma_2^{(N)}}{1 - (\omega_{02}^* - \omega_{01}^*) \Gamma_2^{(N)}}, \quad (23)$$

где $\omega_{0i}^* = \frac{\omega_{0i}}{n} = \frac{V_{0i}^{2/3} N_A^{1/3}}{n}$, V_{0i} – молярный объём i -го компонента, N_A – число Авогадро, n – число монослоев в поверхностном слое раствора.

Проведены расчеты зависимости поверхностных концентраций x_2^0 от объёмных концентраций x_2 для Na–Cs(Rb,K), K–Cs (Rb) и Cs –Rb. На рис. 13 представлены характерные графики x_B^0 от x_B для системы K–Cs.

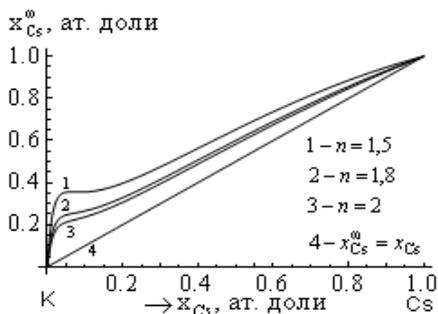


Рис. 13. Зависимость x_{Cs}^0 от x_{Cs} в бинарных сплавах системы K–Cs

Также выполнены расчеты адсорбций V_i и Pb бинарной системы Sn– V_i и Sn– Pb при температурах от 250 до 500 °C по уравнению (20), по 6-ти уравнений изотерм ПН для каждой системы.

На рисунке 14 приводятся характерные изотермы адсорбций V_i и Pb при температурах 250 и 450 °C для каждой системы. Из общих результатов следует : а) величины адсорбций имеют наибольшие значения в области малых концентраций V_i и Pb ; б) с повышением температуры величина адсорбции уменьшается, в) ход изотермы адсорбции осложняются в области концентрации добавляемых компонентов больше 40–50 ат. %; г) максимальное значение адсорбции изменяются линейно в области температур 250–500 °C с температурным коэффициентом $\beta_T = -5,6 \cdot 10^{-3}$ мкмоль/(м²·K).

По уравнению (23) проведены расчеты зависимости поверхностных концентраций $x_{\text{В}}^{\text{о}}$ от объёмных $x_{\text{В}}$ при $T = 350$ и 450 °С. Характерные результаты расчётов $x_{\text{Вi}}^{\text{о}}$ приведены на рис. 15 при $T = 350$ °С. С увеличением температуры уменьшается поверхностная концентрация $x_{\text{В}}^{\text{о}}$, что объясняется повышением испарения с поверхности образца и увеличением коэффициента растворимости поверхностноактивного компонента в объеме расплава.

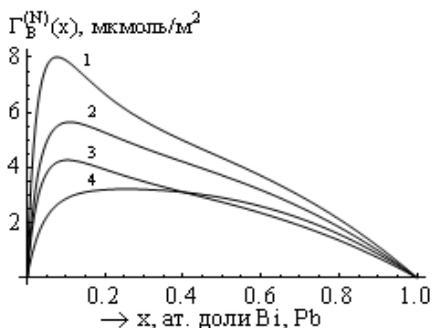


Рис. 14. Адсорбции компонентов Bi и Pb в системах Sn–Bi и Sn–Pb. 1 и 2 – Bi; 3 и 4 –Pb при $T = 250$ и 450 °С

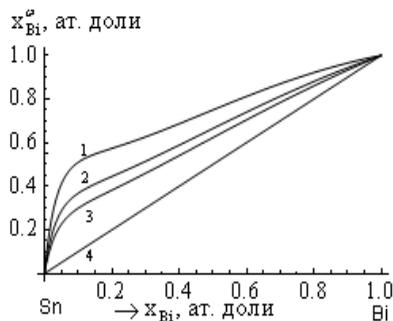


Рис. 15. Зависимость $x_{\text{Вi}}^{\text{о}}$ от $x_{\text{Вi}}$ в бинарных сплавах Sn–Bi при $T = 350$ °С

Расчёт поверхностного натяжения сплавов бинарных систем в твердом состоянии через работу выхода электрона

Физически обоснованное уравнение связи между поверхностным натяжением и работой выхода электрона бинарных металлических систем дано Задумкиным С.Н., Ибрагимовым Х.И. и Хоконовом Х.Б. в виде

$$\sigma(x) = \frac{\sigma_{01}}{\varphi_{01}} \varphi(x) x_1^{1/3} \left(1 + \frac{z_2 x_2}{z_1 x_1} \right) \left(1 + \frac{V_2 x_2}{V_1 x_1} \right), \quad (24)$$

где σ_{0i} , V_{0i} , φ_{0i} – поверхностное натяжение, мольный объём и РВЭ i -го компонента, z_i – среднее число валентных электронов на атом.

Используя (24), вычислить входные данные $\sigma(x_1)$ и $\sigma(x_2)$ бинарной системы через РВЭ, определить F и β и по уравнению (12) построить изотерму ПН бинарной системы Sn–Pb:

$$\sigma(x) = 693 - 80,1x - 3251,81(1-x)x/(1+14,862x). \quad (25)$$

Как показано на рис. 16 изотерма ПН бинарной системы Sn–Pb, рассчитанная по уравнению (25) хорошо согласуется с данными экспериментов, среднее отклонение около 1,6 %.

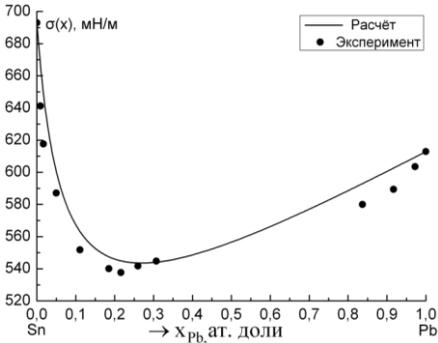


Рис. 16. Поверхностное натяжение системы Sn–Pb в твёрдом состоянии при $T = 300 \text{ K}$

На основе уравнения (24) определены соответствующие входные данные и построены уравнения (26) и (27) плёнок Sn–Na и In–Na при $T = 300 \text{ K}$:

$$\sigma(x) = 671 - 457,2x - 4483 (1 - x)x / (1 + 5,54x), \quad (26)$$

$$\sigma(x) = 631 - 417,18x - 9701,5 (1 - x)x / (1 + 18,053x). \quad (27)$$

На рис. 17 приведены изотермы ПН тонких плёнок Sn–Na и In–Na, построенные по уравнениям (26) и (27). Рассчитаны изотермы адсорбции натрия для плёнок Sn–Na и In–Na, используя уравнения (26) и (27). Величины адсорбций натрия в плёнках Sn–Na и In–Na в области концентрации $x_{\text{Na}} \leq 50 \text{ ат. \%}$ положительные, а в области $x_{\text{Na}} \geq 50 \text{ ат. \%}$ отрицательные, что связано с наличием минимумов на изотермах ПН (рис. 17).

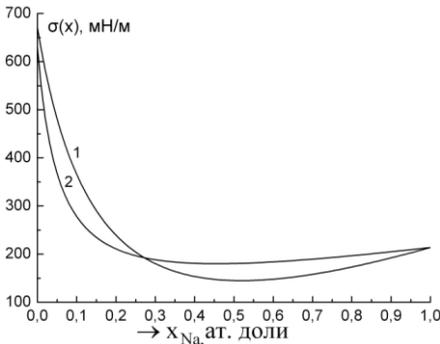


Рис. 17. Изотермы ПН плёнок: 1 – Sn–Na по (26), 2 – In–Na по (27)

Расчёт адсорбции добавляемых компонентов в плёнках Sn–Na и In–Na и бинарных сплавах In–Na(K, Rb, Cs) через РВЭ

Для расчёта адсорбции компонента сплавов в твёрдом состоянии воспользуемся формулой, связывающей ПН $\sigma(x)$ с работой выхода $\varphi(x)$ в твёрдом состоянии

$$\sigma(x) = \sigma_A + \frac{\sigma_A + \sigma_B}{\varphi_A - \varphi_B} (\varphi(x) - \varphi_A), \quad (28)$$

где σ_A , σ_B , φ_A и φ_B – ПН и РВЭ чистых компонентов сплавов системы А–В, $\varphi(x)$ – изотерма РВЭ системы А–В. Продифференцировав (30) по x имея в виду (4), получим формулу для расчёта адсорбции компонентов

$$\Gamma_2^{(N)}(x) = -\frac{(1-x)x}{RT} \frac{\sigma_A - \sigma_B}{\varphi_A - \varphi_B} \left[\alpha \frac{(F-1)(1-2x(F-1)x^2)}{[1+(F-1)x]^2} - (\varphi_A - \varphi_B) \right]. \quad (29)$$

По уравнению (29) вычислены изотермы адсорбции Na в тонких плёнках Sn–Na и In–Na через РВЭ. Результаты расчетов адсорбции натрия в плёнках Sn–Na и In–Na представлены на рис. 18.

Из рис. 18 видно, что численные значения адсорбции натрия в плёнках Sn–Na больше чем в плёнках In–Na как в области малых концентраций Na ($\Gamma_{Na}^{(N)} > 0$), так и в области больших концентраций Na ($\Gamma_{Na}^{(N)} < 0$). Адсорбции натрия в плёнках Sn–Na достигает максимума при концентрации (в ат. %) $x_{Na} = 7,2$, а в плёнках In–Na – при $x_{Na} = 2,1$.

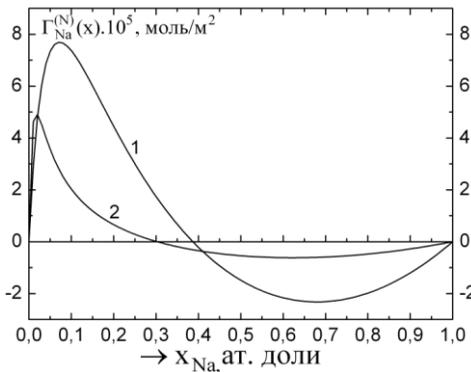


Рис. 18. Адсорбция натрия в плёнках при $T = 300$ К:
1 – Sn–Na; 2 – In–Na

По уравнению (29) вычислены изотермы адсорбции Na, K, Rb и Cs в сплавах системы In – Na, K, Rb и Cs в интервале $0 < x_i < 0,14$, используя расчетные данные составленных 4-х уравнений и экспериментальные данные [2]. Результаты расчетов адсорбций для 4-х двойных систем представлены на рис. 19.

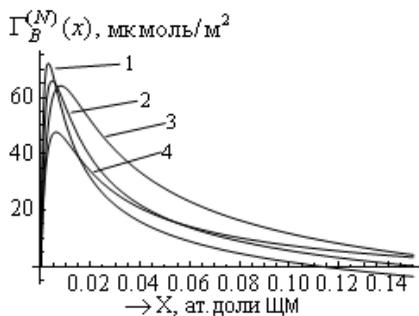


Рис. 19. Адсорбции компонентов щелочных металлов в сплавах систем индий – щелочной металл: 1 – Cs; 2 – Rb; 3 – K; 4 – Na

Значения максимумов адсорбций Γ_m , и соответствующие x_m показаны на рис. 19. Оказалось, что максимальная адсорбция Γ_m возрастает с увеличением относительного атомного радиуса добавляемых компонентов. Это связано с тем, что щелочные металлы на поверхности сплавов систем индий – щелочной металл значительно деформируют кристаллическую решетку индия. Чем больше размер добавляемого атома, тем больше вероятность выталкивания атома-добавки на поверхность раствора.

Выводы

1. Анализ многочисленных методов получения тонких плёнок показал, что для планируемых в работе тонкопленочных систем более подходящими являются варианты термовакuumного напыления. Поэтому подготовлена экспериментальная установка УВН-2 и отработана методика для получения тонкопленочных систем Sn–Na–Sn и In–Na–In методом термовакuumного напыления в вакууме $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ Па.

2. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии определены элементный состав поверхностного слоя плёнок и величины энергий связи электронов в атомах In, Sn, Na, O и C в изученных системах. Величины энергий связи электронов заметно смещены в сторону больших значений, чем для свободных атомов. На основе полученных данных рассчитаны концентрации основных элементов в плёнках Sn–Na и In–Na после очистки их поверхности от примесей.

3. Измерена работа выхода электрона (РВЭ) тонких плёнок в зависимости от концентрации натрия методом Фаулера при $T = 300$ К. На изотермах РВЭ плёнок Sn–Na и In–Na обнаружены минимумы около $x_{Na} = 25$ и 15 ат. % Na и пологие максимумы около $x_{Na} = 70$ и 60 ат. % Na. Они связаны с поверхностной активностью натрия в области малых концентраций натрия и с особенностями фазовых диаграмм указанных систем.

4. Построены уравнения изотерм РВЭ для плёнок Sn–Na и In–Na и бинарной системы Pb–Na в зависимости от x_{Na} без и с учетом особенностей их фазовых диаграмм способом деления концентрационного интервала на две области. Сравнения результатов наших расчетов и экспериментов показали хорошие согласия при учёте химических соединений и других особенностей на фазовых диаграммах, тогда как без учёта получены лишь качественное согласие результатов.

5. Построены уравнения изотерм и проведены вычисления ПН сплавов бинарных систем Sn–Pb и Na–Cs, а также РВЭ Na–Cs, In–Na, In–Li и Pb–Li. Сравнения результатов расчетов ПН и РВЭ бинарных систем с экспериментальными данными дали удовлетворительные согласия. Установлено, что построенные аппроксимационные уравнения с достаточной точностью описывают изотермы ПН и РВЭ изученных двойных металлических систем.

6. Вычислены адсорбции K, Rb и Cs в сплавах 6-ти бинарных систем Na–K (Rb, Cs), K–Rb (Cs), Rb–Cs, используя предложенную нами методику. Обнаружено, что величины адсорбции компонентов бинарных сплавов тем больше чем дальше находится добавляемый компонент от растворителя в таблице Менделеева. В натриевых системах максимальное значение адсорбции увеличивается с увеличением порядкового номера атома добавляемого компонента.

7. Построены изотермы адсорбций свинца и висмута системы Sn–Pb и Sn–Bi при температурах от 250 до 500 °С. Адсорбции Pb и Bi положительные и проходят через максимумы около концентрации $x_i = 0,1$ ат. доли в растворе и уменьшаются с увеличением температуры, что связано с ростом интенсивности испарения адсорбированных компонентов в газовую фазу и увеличением степени растворения их в расплаве при более высоких температурах.

8. Рассчитаны поверхностные натяжения и адсорбции Na в сплавах плёнок Sn–Na и In–Na через РВЭ. Оказалось, что в области малых концентраций x_{Na} адсорбция $\Gamma_{\text{Na}}^{(N)} > 0$, а в области больших концентраций x_{Na} адсорбция $\Gamma_{\text{Na}}^{(N)} < 0$.

9. Вычислены адсорбции Na, K, Rb и Cs в системах индий – щелочной металл через РВЭ. Изотермы адсорбций проходят через максимумы Γ_m , причём величины адсорбций компонентов Γ_m в системах индий – щелочной металл на порядок выше, достигая около $50 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2}$ в области концентраций $x_i < 1$ ат. %, чем адсорбции этих же компонентов в сплавах бинарных систем из щелочных металлов; максимальная адсорбция Γ_m возрастает с увеличением относительного атомного радиуса r_i/r_p , где r_i – атомные радиусы добавляемых компонентов, а r_p – атомный радиус индия.

Цитируемая литература

1. Онищенко, А.В. Работа выхода электрона двойных металлических сплавов с натрием / А.В. Онищенко, Ю.И. Малов, В.Б. Лазарев // ФММ. – 1981. – Т. 51, Вып. 3. – С. 659–661.

2. Малов, Ю.И. Работа выхода электрона бинарных сплавов индий – щелочной металл / Ю.И. Малов, М.Д. Шебзухов // Физическая химия поверхности расплавов. – Тбилиси: Мецниереба. – 1977. – С. 200–205.

3. Калажоков, З.Х. К расчету концентрационной зависимости поверхностного натяжения сплавов металлических систем / З.Х. Калажоков, К.В. Барсокова, Заур Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, Т.М. Таова // Труды Международного междисциплинарного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» (LDC–2). – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2010. – С. 104–107.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али.** К расчету изотерм поверхностного натяжения и работы выхода электрона бинарных металлических систем / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, З.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Известия КБГУ. – 2013. – Т. 3, № 3. – С. 5–11 (из перечня ВАК).

2. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али.** Определение элементного состава поверхностного слоя тонкоплёночных систем Sn–Na–Sn и In–Na–In на поверхности кремния / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, С.Ж. Гонов, З.Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Известия КБГУ. – 2013. – Т. 3, № 4. – С. 9–12 (из перечня ВАК).

3. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али.** Определение адсорбции натрия в тонкоплёночных системах олово-натрий и индий-натрий / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, З.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Известия КБГУ. – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 5–9 (из перечня ВАК).

4. Калажоков, З.Х. Расчёт поверхностных концентраций и адсорбций компонентов бинарных и трёхкомпонентных металлических сплавов / З.Х. Калажоков, К.В. Зихова, Заур.Х. Калажоков, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, Б.С. Карамурзов, Х.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2012. – С. 39–42.

5. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али.** Получение и исследование состава и свойства тонкоплёночных систем Sn–Na–Sn и In–Na–In на поверхности кремния / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, С.Ж. Гонов, З.Х. Калажоков,

Х.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2013. – С. 93–96.

6. Алчагиров, Б.Б. Работа выхода электрона поликристаллических плёнок лития / Б.Б. Алчагиров, Л.Х. Афаунова, Ф.Ф. Дышекoва, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, Х.Б. Хоконов, Т.М. Таова // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2013. – С. 5–10. (работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13–08–00121 а.)

7. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али**. О расчете изотерм поверхностного натяжения и работы выхода электрона бинарных металлических систем / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи** // Труды Баксанской молодёжной школы физики – 2012. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2013. – С. 24–32.

8. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али**. К расчету изотерм поверхностного натяжения и работы выхода электрона бинарных металлических систем / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи** // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива –2013». – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2013. – Т. IV. – С. 94–98.

9. Калажоков, З.Х. Расчёт изотерм адсорбций компонентов бинарных сплавов систем щелочных металлов / З.Х. Калажоков, Заур Х. Калажоков, З.В. Карданова, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, К.В. Зихова, А.М. Дзакуреев, Х.Х. Калажоков, Т.М. Таова // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2013. – С. 100–102.

10. Калажоков, З.Х. Расчет изотерм адсорбций компонентов бинарных сплавов систем щелочных металлов / З.Х. Калажоков, Заур Х. Калажоков, З.В. Карданова, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, А.М. Дзакуреев, Х.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Сборник трудов участников Всероссийской научной конференции по фундаментальным вопросам адсорбции с участием иностранных ученых. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2013. – С. 102–104.

11. Калажоков, З.Х. Температурная зависимость адсорбция свинца и висмута в системах Sn–Pb и Sn–Bi / З.Х. Калажоков, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, Х.Х. Калажоков // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2013. – С. 87–89.

12. Калажоков, З.Х. Адсорбция щелочных металлов в системах индий – щелочной металл / З.Х. Калажоков, З.Х. (мл.) Калажоков, **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, З.В. Карданова, К.В. Зихова, З.А. Кучменова, Х.Х. Калажоков // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2013. – С. 85–86.

13. **Альсурайхи, Абдулазиз Салех Али**. Работа выхода электрона тонких плёнок олово–натрий и индий–натрий в зависимости от концентрации натрия / **Абдулазиз Салех Али Альсурайхи**, З.Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, Х.Б. Хоконов // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ. АПСН, 2014. – С. 148–153.

14. **Альсурайхи, Абдулазиз салех Али**. Изотерма работы выхода электрона и адсорбции натрия в плёночных системах Sn–Na и In–Na / **Альсурайхи, Абдулазиз салех Али** // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы VI Международной научно-технической конференции. – Нальчик: КБГУ, 2014. – С. 86–92.

В печать 17.04.2015. Тираж 100 экз. Заказ № 7274
Полиграфический участок ИПЦ КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.