

*На правах рукописи*

**Ян Лин Аунг**

**МЕТОД УГЛОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ АННИГИЛЯЦИОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ  
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СВИНЦА.**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор

Москва –2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования - Московский инженерно-физический институт (Государственный университет).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Беляев В.Н.

Официальные оппоненты: заведующий кафедрой «Прикладная ядерная физика», д.ф.-м.н, профессор Самосадный В.Т.

Зам. директора Московского центра качества образования, к.ф.-м.н. Татур А.О.

Ведущая организация: ФГУП ГНЦ РФ «Институт теоретической и экспериментальной физика»

Защита состоится "22" мая 2007 г. В 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в Московском инженерно-физическом институте (Государственном университете) по адресу:

115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел.324-84-98, 323-91-67

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан " " апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор

В.В.Дмитренко

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.**

### **Актуальность темы исследований.**

Сплавы на основе свинца широко используются в различных областях науки и техники, например, при изготовлении устройств коллиматоров в медицинской диагностике и терапии; в качестве перспективных теплоносителей для реакторов на быстрых нейтронах и т.д. Известно, что физико-химические свойства веществ определяются их электронной структурой. В данной работе приведены экспериментальные результаты, полученные методом позитронной диагностики для образцов двойных систем свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состоянии. Показана применимость теории свободного электронного газа для данных систем.

Метод позитронной диагностики интенсивно используются для исследования электронной структуры металлов и сплавов. Это связано с тем, что метод аннигиляции позитронов позволяет определять такие важные характеристики металлов, как распределение электронов по импульсам, энергию уровня Ферми  $\epsilon_f$ , число свободных электронов  $Z_c$ , приходящихся на один атом металла, и их концентрацию  $n_p$  в зоне проводимости. Эти характеристики во многом определяют механические, электрические и магнитные свойства металлов. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований методом угловых корреляций аннигиляционного излучения (УКАИ) для образцов сплавов свинец-висмут в поликристаллическом и жидком состоянии и рассмотрены особенности механизма аннигиляции в них.

### **Целью диссертационной работы является**

1. Разработка методики проведения экспериментов на спектрометре угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов с длиннощелевой геометрией для бинарных систем.

2. Разработка методики изготовления возобновляемого интенсивного источника медленных позитронов на основе  $(n,\gamma)$ -реакции в медной фольге и проведения экспериментов на автоматизированном спектрометре угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов, собранного на базе реактора МИФИ.

3. Разработка математических программ предварительной обработки и коррекции спектров угловых корреляций для бинарных систем, учитывающих распад источника позитронов и поглощение аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах

4. Получение новых экспериментальных данных для сплавов на основе свинца, расширяющих область применения методов позитронной диагностики.

### **Основные результаты работы**

1. На базе реактора МИФИ собран спектрометр угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов с длиннощелевой геометрией с использованием изотопа  $\text{Cu-64}$  в качестве источника позитронов и разработана методика проведения экспериментов по исследованию сплавов свинца в поликристаллическом и жидком состоянии.

2. Методом Монте-Карло проведены расчёты энергетического спектра позитронов, вылетающих с поверхности медной фольги, и показано его существенное отличие от спектра  $\beta$ -распада. Энергетический спектр вылетающих позитронов имеет колокообразный характер в диапазоне  $0.1 \div 0.58$  МэВ с максимумом в  $\sim 0.34$  МэВ. Полученные результаты позволяют более точно оценивать профиль позитронов в исследуемом образце и интерпретировать экспериментальные результаты при исследовании поверхностных и приповерхностных слоёв вещества.

3. Разработаны математические программы предварительной обработки и коррекции спектров угловых корреляций, учитывающих распад источника позитронов  $\text{Cu-64}$ , поглощение аннигиляционных гамма-квантов в

исследуемых образцах и изменение фоновых условий во время проведения экспериментов, что повысило точность и надёжность получаемых результатов.

4. Изучены зависимости параметров спектров угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состоянии.

5. Показана применимость теории свободного электронного газа для данных бинарных систем.

### **Научная новизна результатов работы**

1. Впервые изучены зависимости параметров спектров угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом состоянии при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$  и показана применимость теории свободного электронного газа для данных бинарных систем.

2. Впервые изучены зависимости параметров спектров угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут в жидком состоянии при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$ . Экспериментальные спектры имеют дополнительную гауссовую компоненту  $\sigma = 7,5$  мрад, близкую по значению к углу  $\Theta_F \sim 6$  мрад. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о частичной применимости теории свободного электронного газа для данного состояния сплава.

3. Получены экспериментальные данные о влиянии поглощения аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах на спектры угловых корреляций и предложен алгоритм коррекции возникающих искажений, на основании которого разработаны математические программы предварительной обработки и коррекции спектров угловых корреляций, учитывающих распад источника позитронов  $Cu-64$ , поглощение аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах и изменение фоновых условий во время проведения экспериментов, что повысило точность и надёжность получаемых результатов.

## Научная и практическая ценность работы.

1. Показано, что на собранном на базе реактора МИФИ спектрометре угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов с длиннощелевой геометрией при использовании разработанной методики проведения экспериментов можно проводить исследования металлов и сплавов в поликристаллическом и жидком состоянии. Отработан способ приготовления возобновляемого интенсивного источника медленных позитронов на основе  $(n,\gamma)$ -реакции в медной фольге с активностью до  $1,5 \cdot 10^{10}$  Бк. Это позволило не только существенно сократить время проведения экспериментов, но проводить исследования при различных температурах образцов (от 300К до 800К).

2. В результате проведенных исследований показано, что в сплавах свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состояниях при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$  значения энергии Ферми близки к предсказаниям теории свободного электронного газа.

3. Полученные экспериментальные результаты могут найти применения в различных областях науки и техники при исследовании структуры металлических сплавов и интерметаллитных соединений, возникающих, например, при наводораживании; при изготовлении различных коллимационных устройств, токопроводящих и защитных покрытий в медицинском приборостроении; в качестве перспективных теплоносителей для ядерно-энергетических установок на быстрых нейтронах.

4. Полученные экспериментальные данные о влиянии поглощения аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах и предложенный уточнённый алгоритм коррекции поглощения совместно с коррекцией спектров угловых корреляций на распад источника позитронов  $Cu-64$  и изменение фоновых условий во время проведения экспериментов позволили повысить точность измерения импульса Ферми электронов и надёжность получаемых результатов.

### **На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Методика изготовления возобновляемого интенсивного источника медленных позитронов на основе  $(n,\gamma)$ -реакции в медной фольге и проведения экспериментов на автоматизированном спектрометре угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов, собранного на базе реактора МИФИ.

2. Алгоритм коррекции искажений спектров угловой корреляции, возникающих из-за поглощения аннигиляционных гамма-квантов в образце, распада короткоживущего источника позитронов  $Cu-64$  и изменения фоновых условий во время проведения эксперимента.

3. Результаты экспериментального изучения методом аннигиляции позитронов электронной структуры сплавов свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состояниях при изменении концентрации  $Pb$  в сплаве от 0% до 100%.

### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на научных семинарах и конференциях МИФИ (2006, 2007 гг.), школе – семинаре ИТЭФ (2007г)

### **Публикации.**

Материал диссертации основан на работах, опубликованных в период с 2006 по 2007 гг. в российских журналах и сборниках научных конференций МИФИ. Количество работ по теме диссертации, опубликованных за этот период и использованных в диссертации 5, все приведены в автореферате.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В конце каждой главы содержатся выводы, основные выводы диссертации приведены в заключении. Материал изложен на 96 страницах, включая 15 таблиц и 32 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 40 наименований. Полный объем диссертации 100 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Позитронная диагностика - одно из современных направлений прикладной ядерной физики, находящейся на стыке физики твердого тела, химии и физики элементарных частиц - обладает высокой информативностью и чувствительностью к изменению электронной структуры исследуемых материалов. Она включает в себя как изучение поведения позитронов в различных средах (диффузия, термализация, механизмы аннигиляции), так и использование этих явлений для исследования свойств вещества.

В диссертации обосновывается актуальности работы; формулируется цель и конкретные задачи исследования; изложены полученные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В приведенном литературном обзоре, показано, что метод аннигиляции позитронов обладает высокой чувствительностью к равновесным и неравновесным структурным дефектам, способным захватывать позитроны. Применение трех различных экспериментальных методик: а) измерение времени жизни позитронов, б) измерение параметров угловой корреляции аннигиляционного излучения (метод УКАИ) и в) измерение доплеровского уширения аннигиляционной линии - позволяет получить качественные и количественные данные об электронной структуре вещества.

Рассмотрены экспериментальные и теоретические работы по электронной структуре металлов и сплавов и особенности аннигиляции позитронов в этих материалах. Показана эффективность применения метода УКАИ при исследовании этих объектов.

Сформулированы основные требования к спектрометрам УКАИ, методике проведения экспериментов и программам математической обработки получаемых результатов.

В диссертации приведено описание автоматизированного спектрометра УКАИ с длиннощелевой геометрией, собранного на базе реактора МИФИ,

рассмотрен вопрос изготовления и использования радиоизотопных источников позитронов в методе угловой корреляции аннигиляционного излучения.

Применение в системе управления спектрометром ЭВМ и системы КАМАК позволило осуществить набор экспериментальных спектров с одновременным контролем рабочих параметров электронного тракта спектрометра, а также сократить потери эффективного рабочего времени, обусловленные сбоями напряжения питания, резким изменением температуры, отказом в работе электронных блоков и т.д.

Сцинтилляционный блок, состоящий из стандартного цилиндрического кристалла  $NaJ(Tl)$  с размерами  $\varnothing 100 \times 100$  мм, сочленённого с ФЭУ-49 Б имеет  $\sim 90\%$  эффективность регистрации аннигиляционных гамма-квантов.

Электронный тракт установки обеспечивает работу с разрешающим временем схемы совпадений  $\sim 100$  нсек, что существенно снижает фон случайных совпадений.

Конструкция центра спектрометра позволяет проводить эксперименты в температурном диапазоне от 300К до 800К

Система автоматики на базе ЭВМ управляет работой спектрометра угловых корреляций через контроллер крейта «КАМАК» и осуществляет запоминание экспериментальной информации.

В диссертации рассмотрен вопрос эффективного использования в спектрометрах угловых корреляции с длиннощелевой геометрией кремниевых полупроводниковых детекторов небольших размеров и показана принципиальная возможность их параллельного соединения в линейную структуру.

Рассмотрены вопросы использования различных источников позитронов в методе аннигиляции позитронов. Показано, что наиболее подходящими источниками в методе угловой корреляции являются *Медь-64* и *Натрий-22*.

Проведённые расчёты методом Монте-Карло показали, что энергетический спектр позитронов, вылетающих с поверхности медной фольги, существенно отличающегося от спектра  $\beta$ -распада (см. рис. 1) - имеет колокообразный характер в диапазоне 0.1 ÷ 0.58 МэВ с максимумом в  $\sim 0.34$  МэВ, что позволяет, в принципе, более точно оценивать профиль позитронов в исследуемом образце и интерпретировать экспериментальные результаты при исследовании поверхностных и приповерхностных слоёв вещества. Результаты расчёта также показали, что оптимальная толщина медной фольги составляет 60 – 80 мкм.

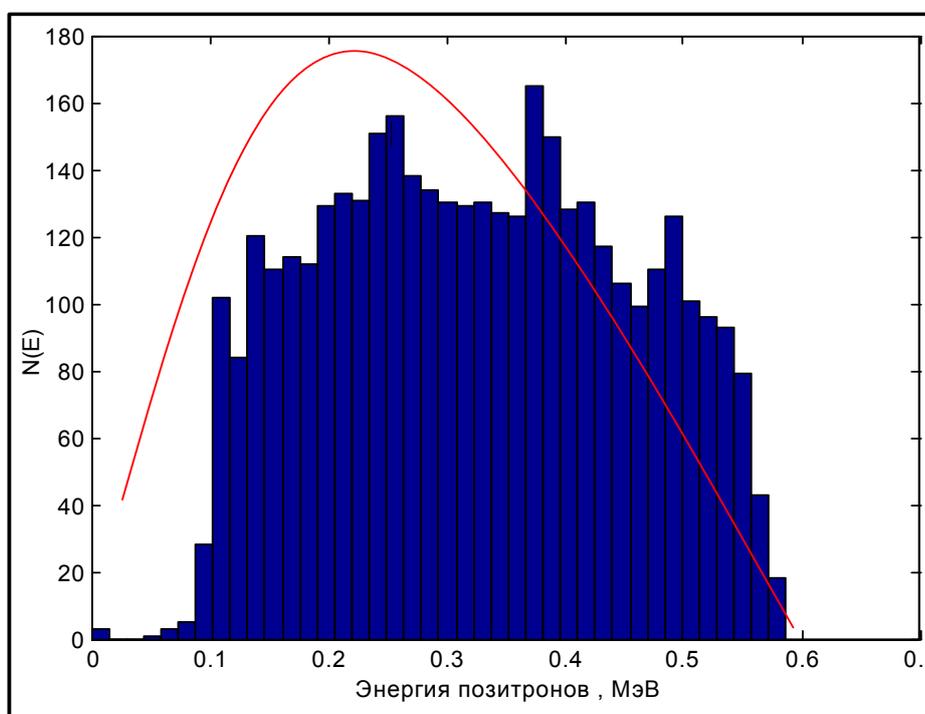


Рис.1

Приводится описание методики изготовления возобновляемого интенсивного источника позитронов на основе  $(n, \gamma)$ -реакции в медной фольге.

Разработана методика измерения полного спектра угловой корреляции, заключающаяся в наборе нескольких спектров с небольшой статистикой, что позволило при последующей обработке существенно снизить влияние таких факторов, как распад источника позитронов во время набора спектров,

нестабильность работы электронного тракта спектрометра, особенности фоновых условий на реакторе.

Анализ измеренных данных показал, что искажения экспериментальных спектров, возникающие из-за поглощения аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах, существенно ухудшают точность получаемых результатов. Расчеты и эксперименты показали, что с увеличением плотности и размеров образцов эти искажения увеличиваются. Предложенный алгоритм линейной и нелинейной коррекции, основанный на изменении загрузок детектора подвижного плеча, позволил существенно снизить влияние этого фактора.

Разработаны математические программы предварительной обработки и коррекции спектров угловых корреляций, учитывающих распад источника позитронов  $\text{Cu-64}$ , поглощение аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах и изменение фоновых условий во время проведения экспериментов, что повысило точность и надёжность получаемых результатов, в частности, определение энергии Ферми электронов. Качество коррекции проверялось с использованием программы ACARFIT (описание спектров УКАИ суммой параболы и гауссиана). Величина *variance of the fit* для откорректированных спектров снижалась с 5 – 9 до значений 1,2 – 1,7.

После предварительной обработки и коррекции окончательная математическая обработка спектров УКАИ проводилась с помощью программы ACARFIT, позволяющей определять параметры параболической и гауссовых компонент с учётом функции разрешения спектрометра.

Характерной особенностью спектров угловой корреляции аннигиляционных гамма-квантов в металлах и их сплавах является наличие параболической компоненты, отвечающей за аннигиляцию позитронов с электронами проводимости, и гауссовых компонент, возникающих при аннигиляции позитронов с валентными электронами.

Впервые были изучены зависимости параметров спектров угловой корреляции аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут и свинец-олово с концентрацией свинца  $0\% < C_{Pb} < 100\%$ . в поликристаллическом и жидком состояниях.

Полученные результаты показали, что в поликристаллических сплавах свинец-висмут образуется единая зона проводимости, а спектр УКАИ описывается суммой параболической и одной гауссовой компонентами. Величина угла отсечки  $\theta_p$  (угол Ферми) параболической компоненты линейно изменяется от 6,03 мрад до 6,15 мрад при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$  (энергия Ферми меняется от 9,29 эВ до 9,6 бэВ, соответственно), а вероятность аннигиляции позитронов с электронами проводимости практически не зависит от концентрации компонент сплава и равна  $\sim 63\%$ . Значение  $\sigma_g$  для сплавов изменялось немонотонно в пределах 12,1 – 14,7 мрад.

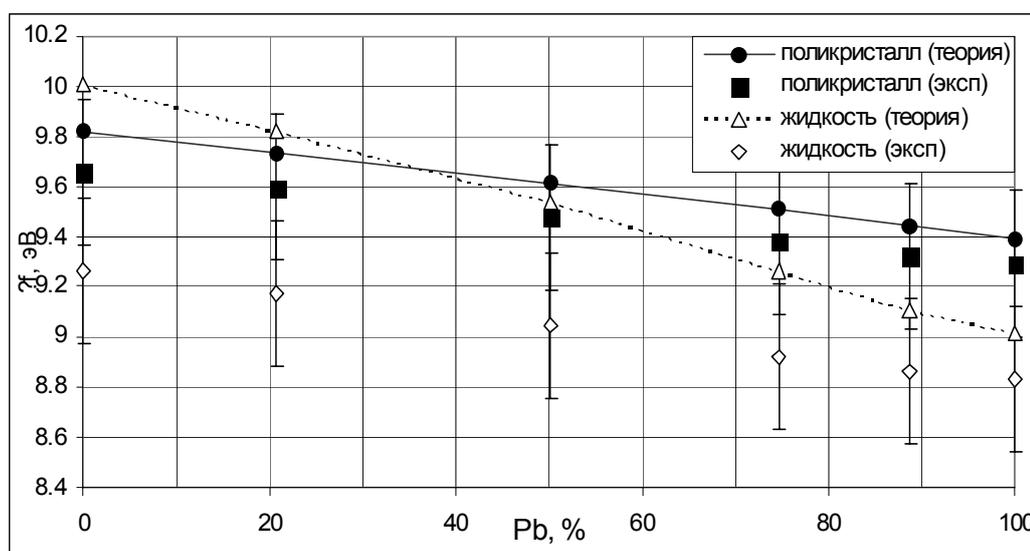


Рис. 2.

Проведённые оценки в рамках теории свободного электронного газа показали хорошее согласие расчётных и экспериментальных данных. На рис.2 показано изменение энергии Ферми в зависимости от состава  $Pb-Bi$  сплава для поликристаллического и жидкого состояний, а на рис. 3 - изменение эффективной валентности.

При сопоставлении экспериментальных результатов для бинарных сплавов свинца и висмута с расчетными значениями соответствующих параметров предполагалось, что каждый из металлов отдает все валентные электроны в общую зону проводимости. В рамках сделанных предположений получено хорошее согласие измеренных и рассчитанных значений концентрации электронов (и, соответственно, энергии Ферми) в зоне проводимости. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в этих сплавах существуют только металлические связи. Наличие неметаллических (ковалентных) связей должно приводить к уменьшению экспериментально измеренных значений концентрации электронов зоны проводимости по сравнению с их расчетными значениями, так как часть валентных электронов пойдет на образование неметаллических (ковалентных) связей.

Достаточно высокая интенсивность параболической компоненты по сравнению с гауссовой свидетельствует, о том, что в поликристаллических образцах позитрон за счет кулоновского притяжения вызывает увеличение локальной концентрации электронов проводимости в области аннигиляции.

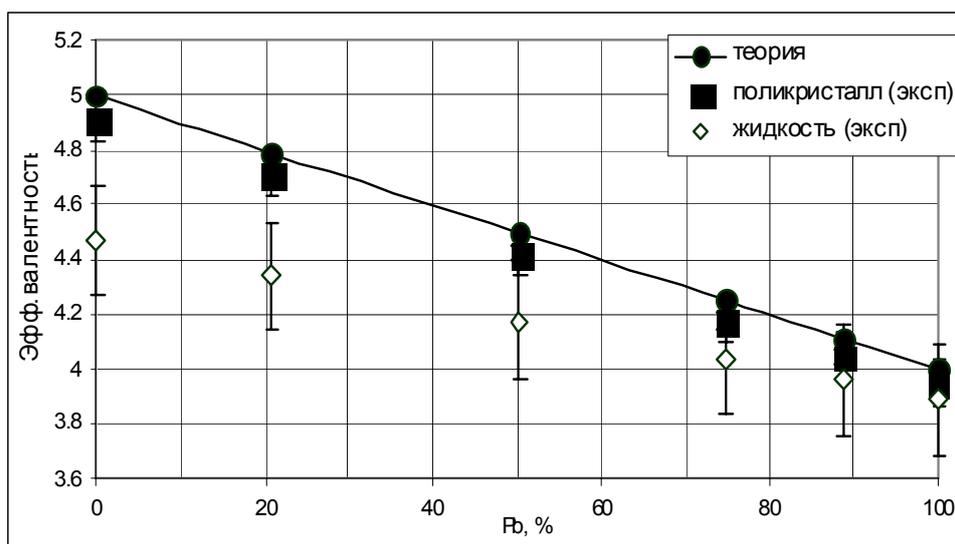


Рис. 3

Полученная зависимость параметров спектров УКАИ в сплавах свинец-олово показала, что величина угла отсечки  $\theta_p$  параболической компоненты

изменяется от  $\sim 5,8$  мрад до  $\sim 6,0$  мрад при изменении концентрации свинца от 100% до нуля (энергия Ферми меняется от 9,46 эВ до 10,21 эВ, соответственно).

Впервые изучена зависимость параметров спектров угловой корреляции аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$ . в жидком состоянии. Было показано, что в сплавах в жидком состоянии также образуется единая зона проводимости, однако спектр УКАИ описывается суммой 3-х компонент - параболической и двух гауссианов, один из которых, по-видимому, отвечает за аннигиляцию позитронов с валентными электронами «ближнего» порядка, а второй - с валентными электронами «дальнего» порядка.

Величина угла отсечки  $\theta_p$  параболической компоненты линейно изменяется от 5,88 мрад до 6,02 мрад при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Pb} < 100\%$ . (энергия Ферми меняется от 8.74 эВ до 9.26 эВ, соответственно), а вероятность аннигиляции позитронов с электронами проводимости изменяется немонотонно в пределах  $40 \pm 10\%$ . При этом сигма узкого гауссиана оставалась постоянной  $\sim 7,5$  мрад, а его интенсивность изменялась также в пределах (30 – 50) %; сигма широкого гауссиана изменялась линейно от  $\sim 14,6$  мрад до  $\sim 12,6$  мрад при постоянной интенсивности  $\sim 26\%$ .

Полученные результаты показали, что данные сплавы в жидком состоянии имеют значение энергии Ферми примерно на 5%, а эффективную валентность на (4–8) % меньше, чем предсказывает теории свободного электронного газа (рис. 1-2). Это означает, что оценки параметров, полученных в рамках модели свободного электронного газа, для данных бинарных систем в жидком состоянии отличаются от экспериментально измеренных на 5-10 %.

### **Основные результаты и выводы диссертационной работы.**

1. Показано, что на собранном на базе реактора МИФИ спектрометре угловых корреляций аннигиляционных гамма-квантов с длиннощелевой геометрией при использовании разработанной методики проведения

экспериментов можно проводить исследования металлов и сплавов в поликристаллическом и жидком состоянии:

- реализован способ приготовления возобновляемого интенсивного источника медленных позитронов на основе  $(n,\gamma)$ -реакции в медной фольге активностью до  $1,5 \cdot 10^{10}$  Бк;

- проведены расчёты методом Монте-Карло энергетического спектра позитронов, вылетающих с поверхности медной фольги, показавшие существенное отличие от спектра  $\beta$ -распада (см. рис. 1), что позволяет, в принципе, более точно оценивать профиль позитронов в исследуемом образце и интерпретировать экспериментальные результаты при исследовании поверхностных и приповерхностных слоёв вещества. Результаты расчёта также показали, что оптимальная толщина медной фольги составляет 60 – 80 мкм.

- использование изотопа Cu-64 позволило получить возобновляемый интенсивный источник позитронов, что существенно сократило время проведения экспериментов и дало возможность проводить исследования при различных температурах образцов;

- автоматизированный измерительный комплекс, управляемый ЭВМ, осуществляет управление спектрометром и накопление экспериментальной информации;

- конструкция центра спектрометра позволяет проводить эксперименты в температурном диапазоне от 300К до 800К;

- методика измерения полного спектра угловой корреляции, состоящего из набора нескольких спектров с небольшой статистикой, позволила существенно снизить влияние таких факторов, как распад источника позитронов во время набора спектров, нестабильность работы электронного тракта спектрометра и фоновых условий на реакторе.

2. Разработаны математические программы предварительной обработки и коррекции спектров угловых корреляций, учитывающих распад

источника позитронов  $Cu-64$ , поглощение аннигиляционных гамма-квантов в исследуемых образцах и изменение фоновых условий во время проведения экспериментов, что повысило точность и надёжность получаемых результатов, в частности, энергии Ферми электронов.

3. Впервые изучена зависимость параметров спектров угловой корреляции аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут при концентрации  $Pb\ 0\% < C_{Pb} < 100\%$  в поликристаллическом состоянии:

- показано, что в этих сплавах образуется единая зона проводимости, причём энергия Ферми монотонно меняется от 9,29 эВ (для 100% Pb) до 9,66 эВ (для 100% Bi);

- вероятность аннигиляции позитронов с электронами проводимости практически не зависит от концентрации компонент сплавов и равна  $\sim 63\%$ ;

- получено хорошее согласие экспериментальных данных с расчётными в рамках теории свободного электронного газа .

4. Впервые изучена зависимость параметров спектров угловой корреляции аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-висмут при концентрации  $Pb\ 0\% < C_{Pb} < 100\%$ . в жидком состоянии:

- показано, что в сплавах в жидком состоянии также образуется единая зона проводимости, энергия Ферми меняется от 8,74 эВ (для 100% Pb) до 9,26 эВ (для 100% Bi);

- вероятность аннигиляции позитронов с электронами проводимости немонотонно изменяется в зависимости от концентрации компонент сплавов в пределах  $35 \pm 10\%$ ;

- вклад остовных электронов описывается суммой двух гауссов, что указывает на более сложную электронную структуру в жидких сплавах;

- показано, что теория свободного электронного газа для данных сплавов в жидком состоянии даёт завышенное значение энергии Ферми.

5. Изучена зависимость параметров спектров угловой корреляции

аннигиляционных гамма-квантов в сплавах свинец-олово при концентрации  $Pb$   $0\% < C_{Sn} < 100\%$  в поликристаллическом состоянии:

- энергия Ферми в этих сплавах монотонно меняется от 9,46 эВ (для 100% Pb) до 10,21 эВ (для 100% Sn);

- вероятность аннигиляции позитронов с электронами проводимости практически не зависит от концентрации компонент сплавов и равна  $\sim 63\%$ ;

- в пределах точности эксперимента показана применимость теории свободного электронного газа для данных бинарных сплавов.

### **Основные материалы диссертации опубликованы в 5 работах.**

1. Графутин В.И., Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг и др. "Аннигиляция позитронов в сплавах висмута и свинца», Научная конференция МИФИ, Москва, 23-27 января 2006, Сборник научных трудов, Т. 5, стр.32-33.
2. Дубов Л.Ю., Клёмин С.Н., Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг "Многоэлементный полупроводниковый детектор альфа-частиц», Инженерная физика, 2005, №4, стр.16-20.
3. Беляев В.Н., Графутин В.И., Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг и др. "Аннигиляция позитронов в  $Pb-Bi$  сплавах в твёрдой и жидкой фазе», Научная конференция МИФИ, Москва, 22-26 января 2007, Сборник научных трудов, Т. 5, стр.21-23.
4. Штоцкий Ю.В., Мьо Зо Хтут, Ян Лин Аунг, "Восстановление симметричности спектров угловой корреляции аннигиляционного излучения в поликристаллических  $Pb-Bi$  сплавах», Научная конференция МИФИ, Москва, 22-26 января 2007, Сборник научных трудов, Т. 5, стр.50-52.
5. Беляев В.Н., Графутин В.И., Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг "Аннигиляция позитронов в сплавах висмута и свинца», Инженерная физика, 2007, № 3, 6 стр.