

На правах рукописи

**МБОУ ХТТУТ**

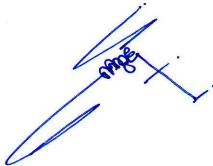
**АННИГИЛЯЦИЯ ПОЗИТРОНОВ  
В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И СВИНЦА**

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines, positioned to the right of the word 'Автор:'.

Москва - 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: доцент кафедры «Медицинская физика» НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н. Штоцкий Ю.В.

Официальные оппоненты: профессор кафедры «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ, д.т.н. Самосадный В.Т.  
ст.н.с. ИОНХ РАН, к.ф.-м.н. Бардышев И.И.

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

Защита состоится «13» октября 2010 г. в 16<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.212.130.07 в НИЯУ МИФИ, по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, телефон 323-91-67, в конференц-зале ауд. К608.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «10» сентября 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, диссертационный совет, Улину С.Е.

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



Улин С.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований.

Современный научно-технический прогресс невозможен без создания новых материалов с заранее заданными свойствами. Физико-химические свойства веществ определяются их электронной структурой. Для изучения этих свойств, а также структурных и радиационных дефектов в твердых телах широко используются методы позитронной диагностики. В металлах и сплавах метод аннигиляции позитронов позволяет определять импульсное распределение электронов и энергию уровня Ферми  $\varepsilon_F$ , которые во многом определяют их механические, электрические и магнитные свойства.

В настоящее время особенное внимание уделяется проблемам, связанным с атомной энергетикой. Это, прежде всего, надежность и безопасность работы ядерно-энергетических установок, зависящих от конструкционных материалов, работающих в интенсивных полях ионизирующего излучения.

В данной работе приведены экспериментальные результаты, полученные методом позитронной диагностики для ряда чистых металлов и сплавов на основе свинца, а также образцов высоколегированной стали с различной концентрацией азота. Кроме этого, приведены результаты моделирования методом Монте-Карло процессов взаимодействия позитронов и аннигиляционных  $\gamma$ -квантов с веществом.

### Целью данной работы является:

1. Создание системы управления спектрометром угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, обеспечивающей долговременное проведение экспериментов, а также сбор и накопление информации.

2. Разработка методики проведения экспериментов на спектрометре угловых корреляций и программ коррекции спектров с использованием результатов моделирования методом Монте-Карло процессов, происходящих при аннигиляции позитронов в исследуемых материалах.

3. Разработка конструкции высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов на базе реактора НИЯУ МИФИ.

4. Получение новых экспериментальных результатов, расширяющих область применения позитронной диагностики вещества.

### Основные результаты работы:

1. Разработано специализированное устройство автоматизированного управления спектрометром угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, обеспечивающее долговременное проведение экспериментов: сбор и накопление информации. Использование ЭВМ позволяет проводить обработку поступающей информации непосредственно в течение эксперимента и корректировать его ход.

2. Разработан комплекс программ моделирования методом Монте-Карло основных процессов, происходящих при аннигиляции позитронов с учётом геометрических размеров и формы образца и распределения позитронов по его глубине. Это позволило ввести коррекцию измеряемых спектров угловых корреляций и, тем самым, повысить точность и надёжность получаемых результатов.

3. Предложена оригинальная конструкция конвертора  $n^0 - \gamma - e^+$  и с помощью метода Монте-Карло рассчитаны характеристики высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов ( $\sim 10^{10} e^+/c$ ), который может быть использован при создании современного центра позитронной спектроскопии на базе реактора НИЯУ МИФИ.

4. Определены основные параметры спектров угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образцах высоколегированной аустенитной стали X20Г16Н10А с концентрацией азота от 0,064 % до 0,77 %. Обнаружена параболическая компонента с углом Ферми  $\Theta_F \approx 5,65$  мрад интенсивностью  $I_F \sim 10$  %, отвечающей за аннигиляцию позитронов с электронами проводимости с энергией Ферми 8,2 эВ и две гауссовы компоненты  $\sigma_{g1} \sim 5,1$  мрад ( $I_{g1} \sim 60$  %) и  $\sigma_{g2} \sim 7,2$  мрад ( $I_{g2} \sim 30$  %), отвечающие за аннигиляцию с валентными электронами атомов, расположенными на границе зёрен и электронами ионного остова зерна. Увеличение концентрации азота уменьшает вероятность аннигиляции позитронов с электронами ионного остова зерна и увеличивает вероятность аннигиляции позитронов с валентными электронами

атомов, расположенных на границах зёрен или вблизи структурных дефектов. С помощью метода угловых корреляций измерены энергии Ферми в сплавах свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состоянии, а также в ряде чистых металлов. На основании полученных данных показана применимость теории свободного электронного газа для данных металлов и сплавов.

### **Научная новизна работы:**

На основе моделирования методом Монте-Карло спроектирован оригинальный конвертор  $n^0 - \gamma - e^+$  для высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов ( $\sim 10^{10} e^+/c$ ) на базе реактора НИЯУ МИФИ, необходимого при исследовании гетероструктур.

Впервые определены параметры спектров угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образцах высоколегированной аустенитной стали X20Г16Н10А с концентрацией азота от 0,064 % до 0,77 % и уточнены значения энергии Ферми в ряде чистых металлов и сплавов на основе свинца.

Впервые обнаружено, что увеличение концентрации азота уменьшает вероятность аннигиляции позитронов с электронами ионного остова зерна и увеличивает вероятность аннигиляции позитронов с валентными электронами атомов, расположенных на границах зёрен или вблизи структурных дефектов; что указывает на влияние возникающих азотосодержащих комплексов на распределение легирующих элементов внутри зерна и незначительно изменяют дефектную структуру при увеличении концентрации азота.

### **Научная и практическая значимость:**

Разработано специализированное устройство автоматизированного управления спектрометром угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов на основе ЭВМ и платы счётчиков-таймеров и ввода/вывода цифровой информации типа ЛА-ТМР, обеспечивающее долговременный сбор и накопление информации. Система позволяет проводить обработку поступающей информации непосредственно во время эксперимента и корректировать его ход. Данное устройство является

универсальным и применимо при решении широкого круга задач автоматизации физических экспериментов.

Разработанные программы математического моделирования методом Монте-Карло основных процессов, происходящих при аннигиляции позитронов в образцах с учётом физических характеристик и реальных геометрических размеров, позволяют проводить коррекцию искажений, возникающих при измерении спектров угловых корреляций, и, следовательно, уточнить значения измеряемых параметров спектров угловой корреляции, в частности, значение энергии Ферми металлов и сплавов.

Предложена на основе моделирования методом Монте-Карло оригинальная конструкция конвертора  $n^0 - \gamma - e^+$  для высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов ( $\sim 10^{10} e^+/c$ ) с изменяемой энергией на базе реактора НИЯУ МИФИ для исследования микро- и нано-объектов.

Полученные результаты экспериментальных исследований высоколегированной аустенитной стали X20Г16Н10А с различной концентрацией азота, а также сплавов на основе свинца могут найти применения в различных областях науки и техники: при разработке и усовершенствовании технологии изготовления конструкционных материалов, работающих в интенсивных полях ионизирующего излучения, а также при создании перспективных теплоносителей для ядерно-энергетических установок на быстрых нейтронах.

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

1. Специализированное устройство автоматизированного управления спектрометром угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, обеспечивающее долговременный сбор и накопление информации.

2. Результаты моделирования методом Монте-Карло основных процессов, происходящих при аннигиляции позитронов в веществе с учётом физических характеристик и реальных геометрических параметров исследуемых образцов.

3. Конструкция оригинального конвертора  $n^0 - \gamma - e^+$  для высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов ( $\sim 10^{10} e^+/c$ ) с изменяемой энергией на базе реактора НИЯУ МИФИ.

4. Результаты экспериментального изучения методом аннигиляции позитронов электронной структуры ряда чистых металлов, сплавов на основе свинца, а также образцов высоколегированной стали с различной концентрацией азота.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах и ежегодных конференциях НИЯУ МИФИ (2007-2010 гг.) и школе – семинаре ИТЭФ (2007 г).

### **Публикации.**

Материал диссертации основан на работах, опубликованных в период (2007-2010 гг.) в российских журналах, включенных ВАК РФ, и в сборниках научных конференций НИЯУ МИФИ. Количество работ по теме диссертации, опубликованных за этот период и использованных в диссертации - 7, список работ приведен в конце автореферата.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, пяти приложений и списка литературы. В конце каждой главы содержатся выводы, а основные выводы диссертации приведены в заключении. Материал изложен на 154 страницах, включая 14 таблиц и 65 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 103 наименований. Полный объем диссертации 197 страниц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, определена цель работы, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов и др.

**Первая глава** включает в себя обзор основных требований, предъявляемых к конструкционным материалам установок атомной энергетики, а также современных методов их диагностики. Рассмотрены основы метода аннигиляции позитронов, физические свойства позитрона и атома позитрония, механизмы аннигиляции позитронов в веществе. Проведено сравнение возможностей неразрушающего метода аннигиляции позитронов с другими методами исследования и показаны его преимущества при исследовании электронной структуры и радиационных дефектов в металлах и сплавах; возможности метода для проведения измерений при различных температурах исследуемых образцов; высокая чувствительность к локальным изменениям электронной плотности и т.д. Практическое использование метода аннигиляции позитронов связано с разработкой и усовершенствованием экспериментальных установок, совершенствованием методики проведения экспериментов и математической обработки получаемых экспериментальных данных. Показано, что использование традиционных методик позитронной спектроскопии не позволяет в полной мере решать вопросы диагностики микро- и нано-объектов. Это связано и с длительным временем набора информации, невозможностью исследования приповерхностных слоёв, сложностью анализа данных, полученных разными методиками. Рассмотрены способы совершенствования традиционных методик и направления развития новых методов позитронной диагностики. Показано, что наиболее перспективным направлением развития позитронной спектроскопии является создание позитронных фабрик, оснащённых высокоинтенсивными ( $\sim 10^{12}$   $e^+/c$ ) пучками позитронов с изменяемой энергией.

**Во второй главе** представлено описание спектрометра угловых корреляций аннигиляционного излучения с длиннощелевой геометрией, «КВАНТ-ТМР», модернизированного на основе созданного ранее на базе реактора НИЯУ МИФИ спектрометра «Квант-ИТЭФ». Сцинтилляционные детекторы на основе кристаллов  $\text{NaI(Tl)}$   $\varnothing 100 \times 100$  мм и ФЭУ-49Б имеют  $\sim 90\%$



эффективность регистрации аннигиляционных  $\gamma$ -квантов, а малое разрешающее время схемы совпадений  $\sim 100$  нс существенно снижает фон случайных совпадений. Разработанное специализированное устройство автоматизированного управления спектрометром на основе ЭВМ и платы счётчиков-таймеров и ввода/вывода цифровой информации типа ЛА-ТМР обеспечивает управление подвижным плечом спектрометра, долговременное проведение экспериментов, а также сбор и накопление информации с детекторов. Использование компьютера позволяет контролировать рабочие параметры электронного тракта спектрометра, сократить потери рабочего времени, обусловленные сбоями напряжения питания, резким изменением температуры, отказом в работе электронных блоков и т.д., а также проводить обработку поступающей информации непосредственно в течение эксперимента и корректировать его ход. Рассмотрены методические вопросы проведения экспериментов с учётом необходимости последующей коррекции измеряемых спектров, связанной с распадом источника позитронов за время набора спектров, изменением фоновых условий и т.д.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы математического моделирования взаимодействия  $\beta$ -частиц с веществом. Разработанная в среде MATLAB программа «PDDS» позволила смоделировать методом Монте-Карло профили распределения моноэнергетических позитронов с энергией  $0,1 \div 2,0$  МэВ по глубине образцов Al, Ni, Mo, Ag, Ta и Pb и определить экстраполированные пробеги в этих металлах. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с литературными данными с точностью до 10 %. Получены энергетические и угловые распределения позитронов для источников  $^{22}\text{Na}$ , защищённого титановой фольгой толщиной 10 мкм, и  $^{64}\text{Cu}$ , изготовленного в виде медной фольги толщиной  $4 \div 500$  мкм; рассчитаны профили распределения и линейные коэффициенты поглощения позитронов от этих источников в ряде металлов. Вычислены значения коэффициентов обратного рассеяния позитронов  $\beta$ -спектра источников  $^{22}\text{Na}$  и  $^{64}\text{Cu}$  для металлов с различным  $Z$  и определено, что они достаточно хорошо описываются зависимостью  $q_{\text{pac}}(Z) \approx \text{const} \cdot \sqrt{Z}$ .

Моделирование процессов, происходящих при измерении спектров угловых корреляций аннигиляционного излучения показало, что для эффективной коррекции спектров необходимо максимально точно задавать геометрические параметры образца: его размеры, форму, шероховатость поверхности и т.д. Использование рассчитанных коэффициентов коррекции (рис. 1) существенно уменьшает асимметричность измеренных спектров УКАИ (например, для образца Pb размером 20x20 мм с 15 % до 1,3 %).

На основе моделирования методом Монте-Карло рассчитаны параметры конвертора  $n^0 - \gamma - e^+$  для высокоинтенсивного источника медленных позитронов ( $\sim 10^{10} e^+/c$ ) на базе реактора НИЯУ МИФИ (рис. 2). Конвертор состоит из 125 спиральных секций, изготавливаемых из полосок вольфрамовой фольги шириной 2 мм и толщиной 25 мкм.

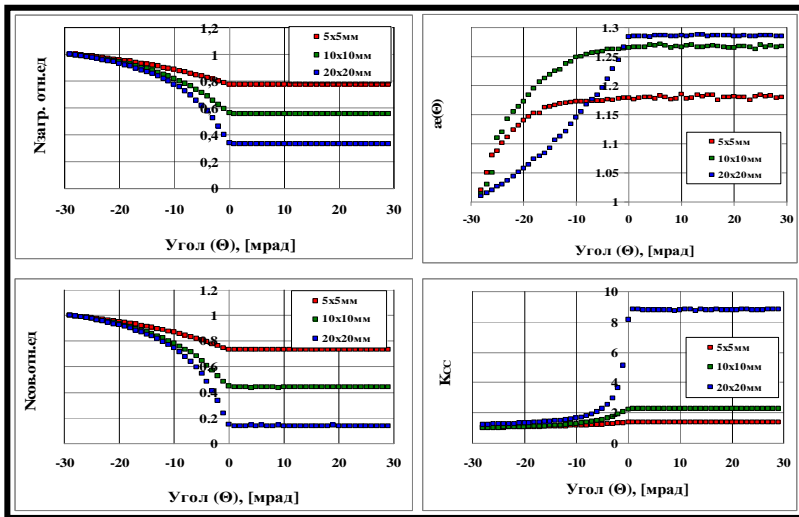


Рис. 1. Влияние размеров образца на изменение загрузок  $N_{\text{загр}}$ , совпадений  $N_{\text{совп}}$  и коэффициентов коррекции  $\alpha$  и  $K_{\text{cc}}$

**В четвертой главе** описана программа «ACARCOR», разработанная для коррекции спектров угловой корреляции аннигиляционного излучения и приведены экспериментальные результаты, полученные методом позитронной диагностики для

образцов стали с различной концентрацией азота, сплавов на основе свинца, а также ряда чистых металлов.

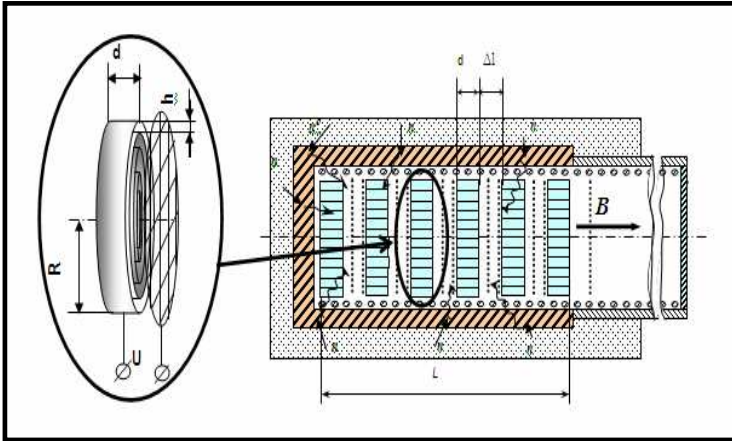


Рис. 2. Конструкция  $n^0 - \gamma - e^+$  конвертора

Программа предварительной коррекции (восстановления симметричности) спектров УКАИ включает в себя коррекцию на распад источника позитронов  $^{64}\text{Cu}$  и поглощение аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образце. Показано, что учёт экспериментально измеряемых изменений загрузок подвижного детектора  $k_f(\Theta)$  и величины  $\alpha(\Theta)$ , получаемой из результатов моделирования, позволяет улучшить симметричность спектров и точнее определить угол Ферми  $\Theta_p$  и параметры гауссовых компонент.

Измерены спектры угловой корреляции аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образцах аустенитной стали X20Г16Н10А с различной концентрацией азота на спектрометре с разрешением в 1 мрад. Экспериментальные спектры кроме параболической компоненты с  $\Theta_p \sim 5,5 \div 6,0$  мрад, отвечающей за аннигиляцию позитронов с электронами проводимости, имеют две гауссовы компоненты  $\sigma_{g1} \sim 5,1$  мрад и  $\sigma_{g2} \sim 7,2$  мрад, отвечающие за аннигиляцию с электронами ионного остова. Для всех измеренных спектров проводилась предварительная коррекция на поглощение аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образце, позволившая улучшить их симметричность и точнее определить угол Ферми  $\Theta_p$  и полуширины гауссовых компонент. Необходимо отметить, что результаты математической обработки, полученные для разных

образцов без фиксации подгоняемых параметров ( $fit$  0,8÷1,3) давали значительный разброс параметров относительно средних значений. Поэтому при окончательной обработке для всех образцов фиксировались значения угла отсечки  $\Theta_p \approx 5,65$  мрад ( $\varepsilon_F \approx 8,2$  эВ) и полуширина узкого гаусса  $FWHM_{g1} \approx 12,0$  мрад ( $\varepsilon_{g1} \approx 10,0$  эВ). Из приведённых данных следует, что интенсивность параболической компоненты  $I_p = 10 \pm 1$  % и остаётся практически постоянной. Интенсивность узкой гауссовой компоненты  $I_{g1}$  изменяется в пределах  $58 \pm 3$  % и наблюдается некоторая тенденция к её увеличению с  $\sim 55$  % до  $\sim 65$  %. Одновременно наблюдается уменьшение интенсивности широкой гауссовой компоненты  $I_{g2}$  от  $\sim 35$  % до  $\sim 25$  % при увеличении концентрации азота от 0,064 % до 0,770 %. Полуширина широкого гаусса  $FWHM_{g2}$  изменяется в пределах  $17 \pm 1$  мрад ( $\varepsilon_{g2} \sim 20$  эВ).

Исследование Pb-Vi и Pb-Sn сплавов показало, что в них образуется единая зона проводимости, отличие измеренных значения энергии Ферми от расчетных по модели свободного электронного газа не превышает 5 % для поликристаллического состояния и 10 % для жидкого состояния. Наблюдаемое уменьшение значений энергии Ферми на  $\sim 0,5$  эВ для Pb и Vi при переходе от поликристаллического в жидкое состояние связано с уменьшением концентрации электронов проводимости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработано специализированное устройство автоматизированного управления спектрометром угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов на базе ЭВМ и платы счётчиков-таймеров и ввода/вывода цифровой информации типа LA-TMP и программа управления и накопления экспериментальных данных. Автоматизированная система обеспечивает:

- перемещение подвижного детектора на программно заданный угол, накопление и запоминание поступающей информации;
- визуальный контроль за ходом эксперимента на экране дисплея, сигнализация о неисправностях в работе установки, автоматическое устранение сбоев в работе спектрометра;
- предварительную обработку поступающей информации непосредственно в течение эксперимента и корректировку его хода.

Разработанная система достаточно проста в практической реализации и легко применима при решении задач автоматизации многих физических экспериментов. Её внедрение позволит заменить громоздкую систему модульной электроники стандарта КАМАК на современную компактную электронику с малым энергопотреблением, что повысит надёжность работы спектрометра и расширит возможности его модернизации.

2. Разработан комплекс программ в пакете MATLAB, моделирующих методом Монте-Карло основные процессы, происходящие при аннигиляции позитронов в веществе для спектрометра угловых корреляций с длиннощелевой геометрией, что позволило учесть физические характеристики и реальные геометрические параметры исследуемых образцов и, следовательно, повысить точность и надёжность получаемых результатов. Комплекс позволил:

- смоделировать распределение позитронов от  $\beta$ -источников  $^{22}\text{Na}$  и  $^{64}\text{Cu}$  по глубине и рассчитать линейные коэффициенты поглощения позитронов для различных материалов;

- определить значения коэффициентов обратного рассеяния позитронов  $\beta$ -спектра источников  $^{22}\text{Na}$  и  $^{64}\text{Cu}$  для Al, Fe, Mo, Ag, Ta и Pb; из полученных зависимостей значений коэффициентов обратного рассеяния позитронов  $\beta$ -спектра от атомного номера  $Z$  металлов определено, что эта зависимость достаточно хорошо

аппроксимируется аналитической зависимостью  $q_{pac}(Z) = C \cdot \sqrt{Z}$ ;

- вычислить на основе результатов моделирования методом Монте-Карло функцию коррекции экспериментальных спектров с учётом распределения позитронов по глубине образца и поглощения аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в исследуемом образце. Результаты моделирования показывают, что для эффективной коррекции необходимо максимально точно задавать геометрические параметры образца: его размеры, форму, шероховатость поверхности и т.д. Использование расчетных коэффициентов коррекции позволило существенно улучшить симметричность экспериментально измеренных спектров и повысить точность результатов измерения, в частности, значения энергии Ферми электронов в металлах и сплавах.

3. Предложена на основе моделирования методом Монте-Карло оригинальная конструкция конвертора  $n^0 - \gamma - e^+$  для

высокоинтенсивного источника моноэнергетических позитронов ( $\sim 10^{10} \text{ e}^+/\text{с}$ ) на базе реактора НИЯУ МИФИ. На его основе может быть создан центр диагностики микро- и нано-объектов, оснащённый высокоинтенсивными пучками позитронов с изменяемой энергией и современными методиками позитронной спектроскопии.

4. Изучены зависимости параметров спектров угловых корреляций аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образцах аустенитной стали X20Г16Н10А с концентрацией азота от 0,064 % до 0,77 %, в сплавах свинец-висмут и свинец-олово в поликристаллическом и жидком состоянии, а также в ряде чистых металлов. Экспериментальные спектры кроме параболической компоненты с  $\Theta_p \sim 5 \div 7$  мрад, отвечающей за аннигиляцию позитронов с электронами проводимости, имеют дополнительно одну или две гауссовы компоненты с  $\sigma_g \sim 7 \div 15$  мрад, отвечающие за аннигиляцию с электронами ионного остова. Для всех измеренных спектров проводилась предварительная коррекция на распад источника и поглощение аннигиляционных  $\gamma$ -квантов в образце, позволившая улучшить их симметричность и точнее определить угол Ферми  $\Theta_p$  и полуширину гауссовой компоненты. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о частичной применимости теории свободного электронного газа для данных металлов и сплавов. Показано, что:

- спектры угловых корреляций образцов азотистой стали X20Г16Н10А содержат параболическую компоненту с  $\Theta_p \approx 5,65$  мрад интенсивностью  $I_p = 10 \pm 1$  %, отвечающей за аннигиляцию позитронов с электронами проводимости с энергией Ферми 8,2 эВ и две гауссовы компоненты  $\sigma_{g1} \approx 5,1$  мрад ( $I_{g1} \sim 60$  %) и  $\sigma_{g2} \approx 7,2$  мрад ( $I_{g2} \sim 30$  %), соответствующие энергиям  $\varepsilon_{g1} \approx 10,0$  эВ и  $\varepsilon_{g2} \approx 20$  эВ, отвечающие за аннигиляцию с валентными электронами атомов, расположенными на границе зёрен и электронами ионного остова зерна, соответственно;

- увеличение концентрации азота в стали от 0,064 % до 0,77 % уменьшает вероятность аннигиляции позитронов с электронами ионного остова зерна и увеличивает вероятность аннигиляции позитронов с валентными электронами атомов, расположенных на границах зёрен или вблизи структурных дефектов; что указывает на то, что возникающие азотосодержащие комплексы влияют на

распределение легирующих элементов внутри зерна и изменяют дефектную структуру при увеличении концентрации азота;

- висмут и свинец в поликристаллическом состоянии имеют энергию Ферми 9,7 эВ и 9,4 эВ, а в жидком состоянии 9,3 эВ и 8,7 эВ, соответственно; уменьшение энергии Ферми на  $\sim 0,5$  эВ связано с уменьшением концентрации электронов проводимости в жидком состоянии; в сплавах *Pb-Bi* и *Pb-Sn* образуется единая зона проводимости и отличие измеренных значений энергии Ферми от расчетных по модели свободного электронного газа не превышает 5 % для поликристаллического и 10 % для жидкого состояний;

- использование коррекции позволило получить уточнённые значения величины энергии Ферми электронов для металлов с высоким  $Z$  и больших размеров, которые составили для олова -  $10,08 \pm 0,29$  эВ, для свинца -  $9,39 \pm 0,29$  эВ, для висмута -  $9,66 \pm 0,29$  эВ.

Результаты исследований могут найти применения в различных областях науки и техники – при разработке и усовершенствовании технологии изготовления конструкционных материалов, создании перспективных теплоносителей для ядерно-энергетических установок на быстрых нейтронах, в медицине, при разработке защитных покрытий и т.д.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Беляев В.Н., Графутин В.И., *Мьо Зо Хтут*, Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг, и др. // Позитронная диагностика сплавов Pb-Bi и Pb-Sn, // Журнал «Вопросы атомной науки и техники», 2008, №1, стр. 35-49.
2. Беляев В.Н., Дубов Л.Ю., *Мьо Зо Хтут*, Штоцкий Ю.В. // Конвертор  $n^0 - \gamma - e^+$  для высокоинтенсивного источника медленных позитронов», // Журнал «Инженерная физика», 2008, №1, стр. 9-15.
3. Беляев В.Н., Дубов Л.Ю., *Мьо Зо Хтут*, Штоцкий Ю.В. // Автоматизированная система управления спектрометром угловых корреляций «КВАНТ-ТМР», // Журнал «Ядерные измерительно-информационные технологии», 2009, №1, стр. 39-43.
4. *Мьо Зо Хтут*, Штоцкий Ю.В., Ян Лин Аунг. // Восстановление симметричности спектров угловой корреляции аннигиляционного излучения в поликристаллических Pb-Bi сплавах, // Тезисы конференции МИФИ, 2007, Т. 5, стр. 50-52.
5. Графутин В.И., *Мьо Зо Хтут*, Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В., Хмелевский Н., Штоцкий Ю.В. // Исследование позитронной аннигиляции в порошках кварца, // Тезисы конференции МИФИ, 2008, Т. 3, стр. 29.
6. Беляев В.Н., Графутин В.И., Дубов Л.Ю., *Мьо Зо Хтут*, Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В. // Спектрометр угловых корреляций «КВАНТ-ТМР», // Тезисы конференции МИФИ, 2009, Т. 1, стр. 136.
7. Аунг Лин, Дубов Л.Ю., *Мьо Зо Хтут*, Штоцкий Ю.В. // Коррекция спектров УКАИ с помощью метода Монте-Карло, // Тезисы конференции НИЯУ МИФИ, 2010, Т. 1, стр. 109.