

C-181

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 539.1.074.55

13-85-276

**САНДУКОВСКИЙ**  
Вячеслав Григорьевич

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
В ЗАДАЧАХ ПРЕЦИЗИОННОЙ  
СПЕКТРОМЕТРИИ РАДИОНУКЛИДОВ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного  
института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Ц. Вылов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В. В. Волков

кандидат физико-математических наук

А. А. Ключников

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1985 г. в \_\_\_\_ час.  
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории  
ядерных проблем ОИЯИ, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1985 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

доктор физико-математических наук

Ю. А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Значительный прогресс в методике физического эксперимента в большой степени связан с применением полупроводниковых детекторов /ППД/, а также с заметно возросшим уровнем автоматизации измерений. Особенно сильно это сказалось в области физики низких энергий. На основе полупроводниковых детекторов интенсивно разрабатываются методы прецизионной спектрометрии и их применение для решения таких фундаментальных проблем как существование двойного безнейтринного бета-распада  $/2\nu_{00}/$ , природа и масса нейтрино и т.п., ведутся исследования свойств ядер, удаленных от полосы бета-стабильности.

Исключительно важным в проведении этих исследований является наличие детекторов, обладающих максимально возможным энергетическим /а в ряде задач и пространственным/ разрешением, высокой эффективностью и стабильностью спектрометрических характеристик. Заметно возросший в последние годы уровень технологии производства исходных полупроводниковых материалов, и в первую очередь высокочистого германия (HPGe), открыл возможности для разработок ППД с рекордными параметрами.

Однако, выпускаемые отечественной промышленностью ППД, пока не удовлетворяют требованиям прецизионной спектрометрии. При этом следует отметить, что на момент начала настоящей работы отечественные ППД на основе германия для спектрометрии X-излучений и заряженных частиц отсутствовали. Ведущие западные фирмы освоили выпуск стандартных полупроводниковых спектрометров с высокими параметрами, но значительная стоимость сдерживает их широкое экспериментальное использование.

Кроме того, остаются актуальными проблемы разработки специальных детекторов и спектрометров, не выпускаемых промышленностью, предназначенных для решения конкретных физических задач. Требуют дальнейших исследований вопросы, связанные с созданием и использованием позиционно-чувствительных ППД, которые начинают находить все более успешное применение как в области физики низких, так и высоких энергий.

С точки зрения современных теорий объединения сильных и электро-слабых взаимодействий важное значение имеет вопрос существования  $2\nu_{00}$ -распада. На сегодняшний день наиболее чувствительным способом его регистрации обладает техника полупроводниковой спектрометрии. Однако возможности традиционного подхода, по-видимому, исчерпаны, и актуальным

является поиск новых решений, позволяющих повысить чувствительность эксперимента и расширить круг изучаемых ядер.

Цель работы заключалась в решении следующих задач:

1. Разработка различных типов ППД из германия и кремния и создание на их основе специальных спектрометров для эффективного амплитудного и амплитудно-временного анализа заряженных частиц, X- и  $\gamma$ -излучений.
2. Разработка непрерывных позиционно-чувствительных детекторов и исследование возможностей их использования в задачах ядерной спектроскопии.
3. Исследование возможности поиска  $2\beta_{0\gamma}$ -распада с помощью многокристального HPGe-спектрометра совпадений.

#### Научная новизна

1. Разработаны оригинальные технологические методы и аппаратура, позволяющие изготавливать различные типы ППД из кремния и германия со спектрометрическими характеристиками, близкими к предельным.
2. Экспериментально показаны новые возможности применения Ge(Li)- и HPGe-детекторов в составе прецизионных спектрометров заряженных частиц и  $\gamma$ -излучения. Впервые создан спектрометр "мини-апельсин", в котором тороидальный магнитный фильтр используется в сочетании с HPGe-детектором и спектрометр для трехмерных амплитудно-временных измерений, в котором два детектора совмещены в одном криостате.
3. Предложен и реализован новый метод создания непрерывных позиционно-чувствительных детекторов, основанный на низкотемпературной диффузии лития в кремний. Впервые изготовлены радиально-чувствительные детекторы с линейной функцией отклика с использованием двух новых методов создания градиентных резистивных слоев.
4. Впервые экспериментально показана возможность использования непрерывных позиционно-чувствительных детекторов в составе магнитного  $\beta$ -спектрометра типа  $n\sqrt{2}$ .
5. Впервые с использованием методов прецизионной спектроскопии измерены распределения энергетических потерь электронов /400+1700 кэВ/ в поглотителях из алюминия и меди различной толщины. Выбрана аппроксимация функции распределения, совпадающая с 5% точностью с экспериментальными данными.
6. Впервые исследована возможность поиска  $2\beta_{0\gamma}$ -распада многокристальным телескопическим HPGe-спектрометром совпадений. С помощью

метода Монте-Карло получена функция отклика, на основании которой даны оценки чувствительности эксперимента для  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{76}\text{Ge}$  в случае спектрометра из 32 детекторов.

Практическая значимость работы. В результате проведенных исследований изготовлены различные ППД для энергетического и координатного анализа ядерных излучений, обладающие характеристиками на уровне лучших мировых образцов. Эти детекторы нашли широкое применение в исследованиях, проводимых как в лабораториях ОИЯИ, так и в ряде институтов СССР и других стран-участниц ОИЯИ /НРБ, ПНР, ЧССР/. Созданная методика может быть использована для освоения выпуска новых типов ППД.

Показанные в работе новые возможности использования детекторов из сверхчистого германия, а также непрерывных позиционно-чувствительных детекторов для регистрации заряженных частиц могут найти применение в ряде других экспериментов и, в частности, в измерениях короткоживущих нуклидов на пучках ускорителей.

Разработанный алгоритм моделирования спектров совпадения  $2\beta_{0\gamma}$ -распада может быть использован для исследования функции отклика полупроводниковых бета-спектрометров.

#### Автор защищает

1. Разработку методов изготовления Ge(Li) и HPGe-детекторов и создание на их основе спектрометра "мини-апельсин" и спектрометра для трехмерных амплитудно-временных измерений.
  2. Методику создания непрерывных позиционно-чувствительных детекторов на основе низкотемпературной диффузии лития.
  3. Разработку радиально-чувствительных ППД с линейной функцией отклика.
  4. Принцип постановки эксперимента по поиску  $2\beta_{0\gamma}$ -распада с помощью многокристального телескопического HPGe-спектрометра совпадений.
  5. Результаты измерения и аппроксимации функции распределения энергетических потерь электронов с энергией 400+1700 кэВ при прохождении вещества поглотителя.
  6. Метод моделирования спектров электронов и построения функции отклика HPGe-спектрометра совпадения для поиска  $2\beta_{0\gamma}$ -распада.
- Апробация работы. Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на международных совещаниях по полупроводниковым детекторам /Дубна, 1973; Дубна, 1974; Варна, 1976; Дубна, 1983/, на XXII, XXV и XXVIII Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра /Дубна, 1971; Ленинград, 1975; Алма-Ата, 1978/, на П Всесоюзном совещании по полупроводниковым детекторам /Киев, 1979/, Всесоюзной школе "Полупроводниковые детекторы в ядерной физике" /Рига, 1980/, опубликованы в

препринтах и сообщениях ОИЯИ, журналах ПТЭ, Nucl. Instr. and Meth. и др.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения; содержит 177 страниц машинописного текста, в том числе 77 рисунков и 16 таблиц. В конце каждой главы сформулированы краткие выводы. Список цитируемой литературы содержит 179 наименований. В каждой главе своя нумерация рисунков и литературы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработок полупроводниковых спектрометров для экспериментов в области физики низких энергий, сформулированы цели и задачи исследований, дана структура изложения материала.

Первая глава посвящена вопросам разработки полупроводниковых детекторов из Ge и Si, исследованию их характеристик и созданию на их основе специальных спектрометров для амплитудного и амплитудно-временного анализа дискретных излучений радионуклидов.

Проведена классификация детекторов с точки зрения их назначения для регистрации того или другого вида ионизирующих излучений, а также методики их изготовления. Сформулированы критерии отбора исходных монокристаллов, требования, предъявляемые к конструкционным и другим сопутствующим материалам, необходимым при изготовлении полупроводниковых спектрометров. Рассмотрено влияние внешних факторов /температуры, окружающей среды, ионизирующих излучений/, а также технологии изготовления ППД /обработка поверхности, создание  $n^+$  и  $p^+$ -контактов/ на спектрометрические свойства детекторов.

Описаны методика, технологические приемы и оборудование, разработанные для изготовления Si(Au), Si(Li), Ge(Li), Ge(Li,Au) и HPGe-детекторов с чувствительным объемом  $0,5+100 \text{ см}^3$  и рабочей поверхностью  $0,5+8 \text{ см}^2$ .

Разработанная установка для автоматического поддержания заданных режимов дрейфа лития в германии позволила за счет увеличения мощности, прикладываемой к изготавливаемому детектору, и хорошего теплоотвода проводить дрейф в материале с плохой подвижностью лития. Описаны установки для проведения выравнивающего дрейфа в Ge и Li в оптимальных режимах. Рассмотрены различные способы изготовления неинжектирующих  $n^+$ - и  $p^+$ -контактов: напылением, диффузией, имплантацией, окислением и с использованием сплавной технологии.

Исследованы электрофизические характеристики изготовленных детекторов. Для этой цели созданы измеритель малых токов при потенциале прибора относительно земли  $\leq 2 \text{ кВ}$  с диапазоном измерения  $10^{-6}-10^{-12} \text{ А}$  и измеритель емкости ППД с непрерывным показанием. Проведено изучение спектрометрических характеристик детекторов. Полученные результаты показывают, что раз-

работанная методика изготовления ППД из Ge и Si для энергетического анализа ядерных излучений /3+5000 кэВ/ позволяет иметь спектрометрические характеристики приборов на уровне лучших мировых достижений. Некоторые результаты измерения энергетического разрешения представлены в таблице. Таблица.

Детектор	Размер	Тип излучения	Энергия /кэВ/	E(FWHM) /кэВ/
Si(Au)	80 мм <sup>2</sup>	$\alpha$	5500	13
Si(Li)	80мм <sup>2</sup> х4мм	$\beta$	~100	0.9
Ge(Li,Au)	80мм <sup>2</sup> х5мм	$\beta$	661	1,6
Ge(Li)	50 см <sup>3</sup>	$\gamma$	1332	1,9
HPGe	50мм <sup>2</sup> х7мм	X	5,9	0.175
		$\alpha$	5500	11,5

Полученное для HPGe-детектора при регистрации  $\alpha$ -частиц энергетическое разрешение 11,5 кэВ показывает, что методика изготовления детекторов из сверхчистого германия позволяет иметь малые "входные" окна  $\sim 700 \text{ Я}$ .

На основе разработанных Ge(Li) и HPGe-детекторов показаны некоторые новые возможности их применения в составе специальных спектрометров. Описан спектрометр для изучения электронов внутренней конверсии /ЭВК/ типа "мини-апельсин", в котором впервые используется сочетание детектора из сверхчистого германия /50 мм<sup>2</sup>х7 мм/ с магнитным фильтром, состоящим из четырех постоянных магнитов /сплав SmCO<sub>2</sub>/, расположенных вокруг центрального поглотителя из вольфрама. Такой спектрометр позволяет значительно

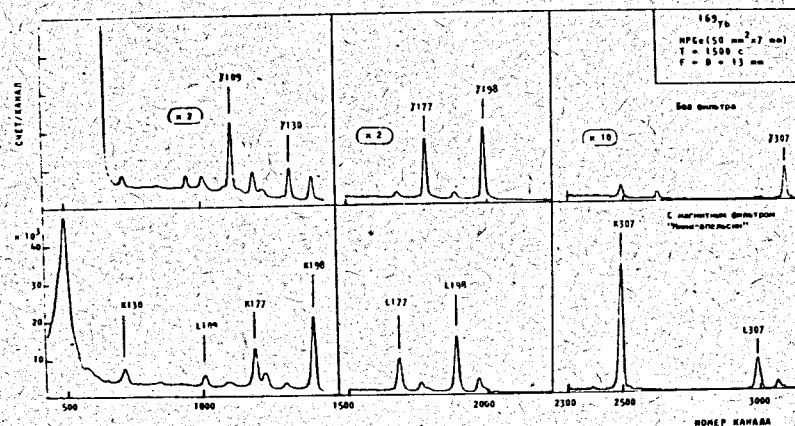


Рис. 1. Фрагменты спектра излучения  $^{169}\text{Yb}$ , полученные с помощью спектрометра "мини-апельсин". Спектры без магнитного фильтра даны для сравнения.



увеличить избирательность регистрации электронов в диапазоне 100+1000 кэВ и эффективность измерения при высоком энергетическом разрешении. Исследования функции пропускания спектрометра показали увеличение эффективности регистрации электронов в диапазоне энергий 300+600 кэВ в

8 раз по сравнению с геометрией источник-детектор без магнитного фильтра. Простота конструкции спектрометра позволяет легко перестраивать магнитную систему для получения нужной формы кривой пропускания и исследования ЭВК требуемых энергий: На рис. 1 в качестве примера приведены измерения ЭВК  $^{169}\text{Yb}$ , выполненные с помощью спектрометра.

В спектрометре для трехмерных амплитудно-временных измерений в зависимости от назначения использованы пара Ge(Li)-детекторов с чувствительным объемом  $\sim 50 \text{ см}^3$  или пара nрGe-детекторов /250 мм<sup>2</sup> x 6 мм/. Главной отличительной особенностью конструкции спектрометра является размещение детекторов в одном кристате. В случае nрGe-детекторов внутри кристата находится и радиоактивный источник, что обеспечивает возможность исследования e-γ, X-X, X-γ и e-e-совпадений. Возможности спектрометра с двумя Ge(Li)-детекторами показаны на рис.2.

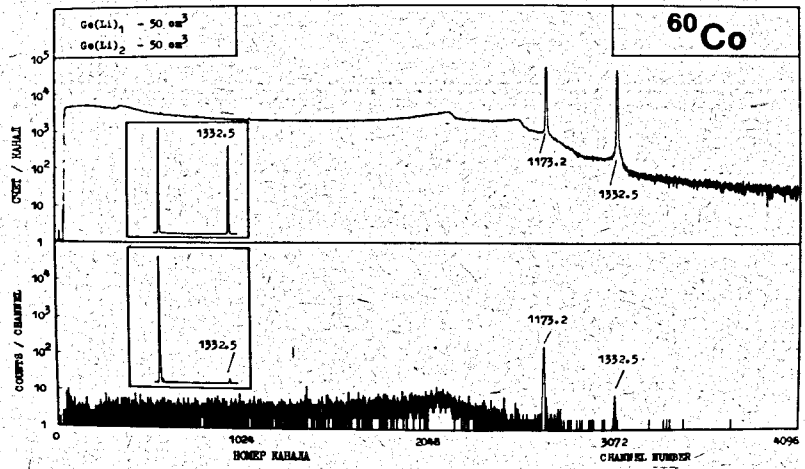


Рис.2. Одиночный спектр и спектр совпадения с γ-квантами 1332 кэВ при распаде  $^{60}\text{Co}$ .

Вторая глава посвящена полупроводниковым позиционно-чувствительным детекторам. Дана классификация полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов /ПЧД/ и сделан обзор последних достижений в облас-

ти создания таких детекторов. Рассмотрены преимущества и недостатки непрерывных ПЧД /использующих резистивное деление созданного частицей заряда/ в сравнении с детекторами дискретного типа.

Проведен анализ работы непрерывных ПЧД и теоретических ограничений на величину координатного разрешения и линейности функции отклика. Сформулированы требования, предъявляемые к основному элементу детектора - резистивному слою, а также к параметрам внешней электроники. Проведено сравнение амплитудного и временного методов обработки сигналов и показано преимущество первого для работы с непрерывными ПЧД. Показано также, что конкурирующий характер двух процессов: улучшение позиционного разрешения и возрастание нелинейности функции отклика детектора с увеличением сопротивления резистивного слоя требует оптимальной фильтрации сигнала основным усилителем, которая определяется потребностями конкретного эксперимента.

Рассмотрено влияние многократного рассеяния регистрируемых частиц на позиционную информацию. Проведенные с помощью метода Монте-Карло исследования процесса торможения электронов с энергией 300+1000 кэВ показали, что для энергий больше 1 МэВ можно ожидать вклада, преобладающего над другими источниками ухудшения позиционного разрешения.

Сделано описание разработанных методов изготовления непрерывных ПЧД различных типов. Экспериментально проверены различные способы создания резистивных слоев на монокристаллах кремния: с помощью имплантации, диффузии, напыления высокоомных металлов.

Предложен новый метод изготовления резистивного слоя - низкотемпературная диффузия лития - позволивший изготавливать резистивные слои с высокой степенью однородности /лучше 99%/, точно заданной величиной сопротивления и воспроизводимостью близкой к 100%. Представлен алгоритм расчета параметров низкотемпературной диффузии. Получено хорошее согласие величин сопротивлений резистивных слоев с расчетными оценками:

$$R_D = [(1 + 0,0018T)\exp(12,936 - 0,0308T) + 0,1274] / 2\sqrt{DT} \int_0^{z_j} \text{erfc}z dz. \quad (1)$$

Здесь:  $R_D$  - сопротивление квадрата диффузионного резистивного слоя;  $T$  - температура диффузии;  $D$  - коэффициент диффузии лития;  $t$  - время диффузии;  $z_j = x_j / \sqrt{2Dt}$ ;  $x_j$  - глубина, на которой концентрация лития равна исходной концентрации доноров /для n-Si/ или акцепторов /для p-Si/.

Исследованы частотные шумовые характеристики резистивных слоев, созданных напылением металлов, имплантацией и диффузией. Показано, что важную роль в получении хороших спектрометрических параметров детекторов играют омические контакты к резистивным слоям.

На основе метода низкотемпературной диффузии разработана техноло-

гия изготовления однокоординатных  $^{241}\text{Am}$  ( $^{207}\text{Bi}$ )-детекторов, предназначенных для регистрации длиннопробежных заряженных частиц, и показано преимущество разработанной методики по сравнению с другими способами получения координатных  $\text{Si}(\text{Li})$ -детекторов.

Представлены два новых метода создания градиентных резистивных слоев, на основе которых впервые реализовано изготовление радиально-чувствительных детекторов с линейной функцией отклика. Первый метод основан на получении с помощью специально разработанной установки требуемого градиента температуры вдоль радиуса образца  $n$ -кремния при создании диффузионного резистивного литиевого слоя. Представлен алгоритм расчета параметров диффузии, т.е. температуры в центре  $T_0$  и на конечном радиусе образца  $T_B$ , времени диффузии  $t$  в зависимости от необходимой величины сопротивления резистивного слоя  $R_D$ . На рис. 3 представлены линейные

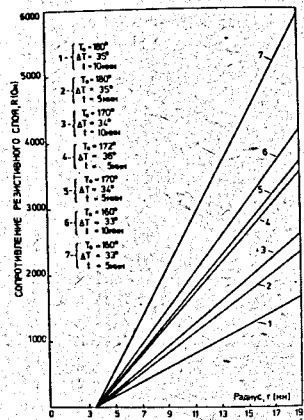


Рис. 3. Зависимости величин сопротивлений резистивных слоев радиальных детекторов для различных параметров градиентной диффузии  $T_0$ ,  $\Delta T$ ,  $t$ .

зависимости  $R$  от  $r$  для различных наборов параметров:  $\Delta T = T_B - T_0$  и  $t$ , которые были найдены с помощью программы минимизации на ЭВМ СДС-6500.

Сделанные расчеты величин  $R_D$  получили экспериментальное подтверждение с 10% точностью. В основу второго метода положено создание имплантированного резистивного слоя с градиентом дозы внедряемых ионов фосфора вдоль радиуса образца кремния. Требуемый градиент получен за счет облучения вращающегося образца через специальную диафрагму.

Измерения, проведенные с радиальными детекторами обоих типов показали нелинейность функции отклика по радиусу  $\leq 1\%$ .

Описана методика проведения испытаний изготовленных непрерывных ПЧД перед их использованием в эксперименте, включающая в себя измерение электрофизических и спектрометрических характеристик. Получение информации о величине позиционного и энергетического разрешения, линейности функции отклика проводилось с использованием амплитудного метода обработки сигналов, стандартных источников  $\alpha$ -частиц  $^{241}\text{Am}$  и ЭВК  $^{207}\text{Bi}$  и специальных масок, имеющих калиброванные размеры отверстий и расстояния между отверстиями.

Исследованы характеристики различных типов однокоординатных детекторов с размерами чувствительной области 25x5, 32x8, 50x8 мм; двухкоординатных имплантированных - с размерами чувствительной области 20x20 и 30x30 мм, радиальных - с внешним диаметром рабочей области 38 мм / всего около 80 ПЧД/. Различные типы изготовленных ПЧД показаны на рис. 4.

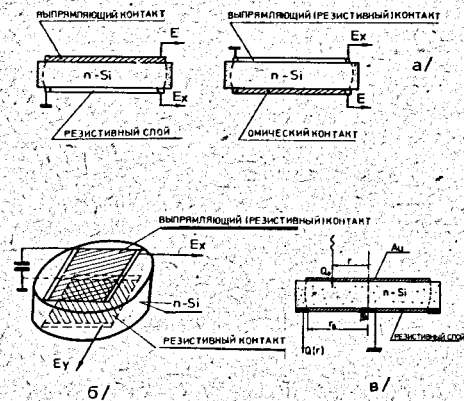
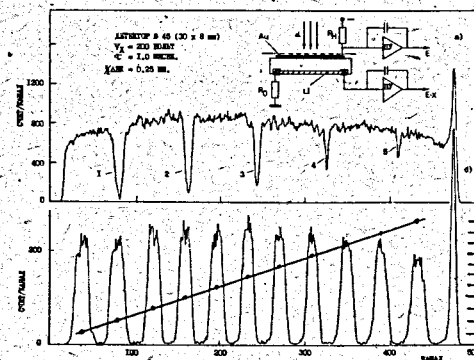


Рис. 4. Непрерывные позиционно-чувствительные детекторы: а - однокоординатные, б - двухкоординатные, в - радиальные.

Изготовленные детекторы имели нелинейность  $\leq 1\%$  и позиционное разрешение 0,5±1% от геометрических размеров ПЧД для  $\alpha$ -частиц /5,5 МэВ/. На рис. 5 представлен типичный результат измерения позиционного разрешения и линейности для однокоординатного детектора с литиевым резистивным слоем. Наклонная линия соединяет точки пересечения центров тяжести пиков и их истинного положения, определяемого маской.

Глава завершается примерами использования разработанных ПЧД в методике физического эксперимента: в фокальной плоскости  $\alpha$ -спектрографа Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ

Рис. 5. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{241}\text{Am}$ , измеренный позиционно-чувствительным детектором /30x8 мм/. а - схема измерения; б - нитевидная маска с диаметрами нитей от 0,1 мм /5/ до 0,46 мм /1/; в - маска с шириной щелей 2 мм и расстоянием между центрами 2,5 мм.



/получено разрешение 3 кэВ для  $\alpha$ -частиц  $^{211}\text{Rn}$ , при исследовании ядерных реакций на пучке циклотрона У-300. Показана возможность использования непрерывных ПЧД для спектрометрии ЭВК в составе магнитного  $\beta$ -спектрометра  $\pi\sqrt{2}$  /ИЯФ ЧСАН, Прага/, которое позволило получить разрешение по импульсу  $\Delta p/p = 0,2 \pm 0,3\%$  для электронов 300±1000 кэВ. При этом эффективность проведения измерений увеличилась за счет многоканальности более чем в 50 раз по сравнению с ранее использовавшимся одноканальным методом регистрации, а фон снизился в 5 раз.

Третья глава посвящена изучению возможностей постановки эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада  $2\beta_{00}$  с помощью полупроводникового спектрометра совпадений.

Рассматривается современная экспериментальная ситуация с проблемой поиска  $2\beta_{00}$ -процесса. Заметно возросший интерес к  $2\beta_{00}$ -распаду связан с развитием в последние годы теоретических представлений, в рамках которых, в частности, предсказывается несохранение лептонного заряда. Процесс  $2\beta_{00}$ -распада, идущий с изменением лептонного заряда на две единицы, — один из немногих, на сегодня доступных экспериментально исследованию, изучение которого может дать уникальную информацию о свойствах слабого взаимодействия и, прежде всего, о природе нейтрино /является ли нейтрино майорановской или дираковской частицей/ и его массе.

На основе анализа имеющихся данных сформулированы критерии проведения эксперимента с высокой чувствительностью, которые касаются выбора нуклидов — наиболее перспективных кандидатов на поиск  $2\beta_{00}$ -распада, влияния внешнего и внутреннего фона, роли энергетического разрешения и т.п. Обоснован выбор для поиска  $2\beta_{00}$ -процесса полупроводниковой методики. Главный аргумент — высокое энергетическое разрешение и эффективность ПЧД.

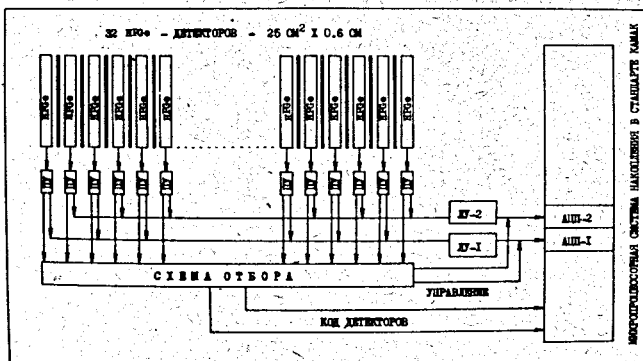


Рис. 6. Блок-схема эксперимента по поиску  $2\beta_{00}$ -распада с помощью HPGe-спектрометра совпадений. Между HPGe-детекторами расположены пленочные источники.

Разработанная методика создания HPGe-детекторов с высоким энергетическим разрешением и стабильными тонкими "входными" окнами позволила предложить эксперимент по поиску  $2\beta_{00}$ -распада с помощью многокристалльного HPGe-спектрометра совпадений, рис. 6. Предложена модель для оценки чувствительности такого спектрометра, учитывающая информацию о следующих процессах: а/ распределении энергии между электронами  $F(E)$ ; б/ угловой корреляции между направлениями вылета электронов  $f(\theta)$ ; в/ многократном рассеянии электронов в источнике и детекторе /распределение энергетических потерь, обратное рассеяние/; г/ регистрации электронов детектором /энергетическое разрешение, эффективность/; д/ фоне в области суммарно-энергетического спектра электронов.

Проведено прецизионное экспериментальное исследование процесса прохождения электронов с энергией 400±1700 кэВ /использовался HPGe-детектор и источник  $^{207}\text{Bi}$ / через алюминиевые и медные поглотители различной толщины /4,42±83,76 мг/см<sup>2</sup>/. Сделано сравнение полученных экспериментальных распределений энергетических потерь с расчетами, выполненными в рамках теории ионизационных потерь Ландау. Показано, что теория Ландау удовлетворительно описывает наиболее вероятные потери энергии  $\Delta E_w$ , но дает заниженные значения для величин флуктуаций потерь  $\Gamma$ . Включение в расчеты функции распределения потерь по Ландау  $\phi(\lambda)$  /резонансного фактора  $b^2$ / Блунка-Лейзеганга и использование аппроксимации  $\phi(\lambda)$  в виде суммы 9 гауссианов /согласно Финдли-Дю Сотоку/ значительно улучшает согласие расчетов с экспериментом для толщин поглотителя  $\leq 50$  мг/см<sup>2</sup> /см. рис.7/.

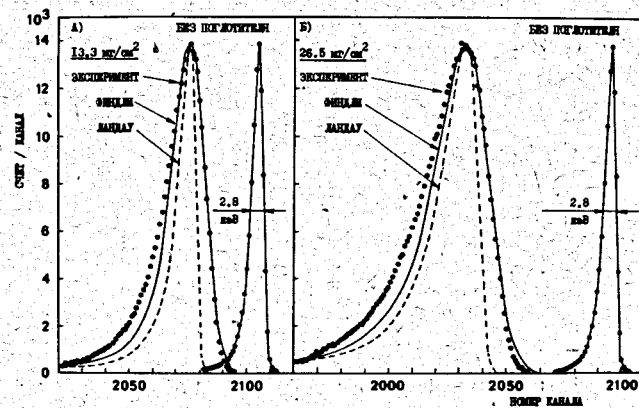


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и теоретических распределений потерь энергии электронов /975,7 кэВ/ при прохождении через алюминий.

$$\phi(\lambda) = \sum_{i=1}^9 \frac{c_i \gamma_i}{\sqrt{\gamma_i^2 + b^2}} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{\gamma_i + b^2}\right]. \quad (2)$$

Здесь  $c_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$  — параметры гауссианов.



Показано также, что учет резонансных эффектов приводит к росту значений  $\Gamma$  с увеличением  $Z$  поглотителя в отличие от поведения в рамках теории Ландау. Этот факт необходимо учитывать при выборе оптимальной толщины источника для нуклидов с большим  $Z$  ( $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ).

Исследовано обратное рассеяние электронов от германиевого детектора. С использованием метода Монте-Карло показано, что наиболее адекватной формулой, учитывающей угловую и энергетическую зависимость коэффициента обратного рассеяния, является формула Кузьминых и Воробьева:

$$P(z, E, \theta) = c\theta^d + P_0(z, E, \theta = 0), \quad (3)$$

где  $\theta$  - угол падения электронов,  $c$  и  $d$  - функции  $Z$  и  $E$ .

Представлен алгоритм расчетов, с помощью которого получена также эффективность регистрации электронов от распада  $^{76}\text{Ge}$  HPGe-детектором.

Описывается алгоритм моделирования эксперимента и построения функции отклика спектрометра из двух HPGe-детекторов  $/25\text{ см}^2 \times 0,6\text{ см}/$  в режиме совпадения. Проведено моделирование эксперимента по поиску  $^{230}\text{Th}$ -распада  $^{48}\text{Ca}$  для источников толщиной  $10\text{ мг/см}^2$  и  $25\text{ мг/см}^2$  и построены модельные спектры для различных угловых и энергетических распределений электронов, предсказываемых теорией. Показано, что для источника  $^{48}\text{Ca}$   $25\text{ мг/см}^2$  возможно получить энергетическое разрешение  $\Delta E = 30\text{ кэВ}$  в режиме совпадения /для угловой  $f(\theta)$  и энергетической  $F(E)$  корреляционных функций, соответствующих  $m \neq 0/$ , рис. 8.

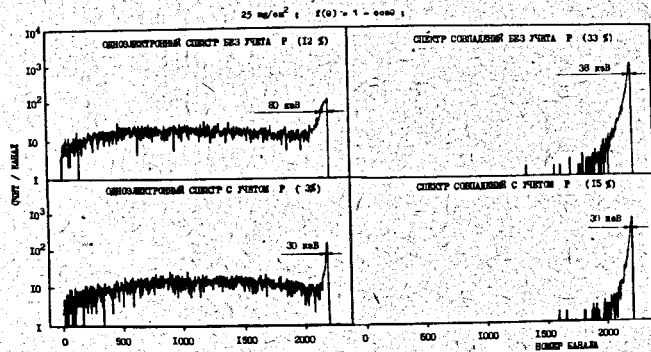


Рис. 8. Модельные спектры электронов  $^{230}\text{Th}$ -распада  $^{48}\text{Ca}$  /источник -  $25\text{ мг/см}^2/$ ,  $f(\theta) = 1 - \cos\theta$ ; спектры без учета коэффициента обратного рассеяния  $/P/$  даны для сравнения.

30 источников  $^{48}\text{Ca} /25\text{ мг/см}^2/$ . Исходя из имеющихся литературных данных об уровне радиоактивного фона в экспериментах по поиску  $^{230}\text{Th}$ -процесса и предполагая его дальнейшее снижение за счет применения метода совпадений, конфигурация кристалла детекторов, активной защиты и т.п., показано, что в предлагаемой постановке возможен поиск  $^{230}\text{Th}$ -распада  $^{48}\text{Ca}$  на уровне  $T_{1/2} \geq 10^{22}$  лет и  $^{76}\text{Ge}$  на уровне  $T_{1/2} \geq 3 \cdot 10^{23}$  лет при проведении измерений в течение одного года /при 68% сч/.

В заклучении сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Разработана и развита методика изготовления из германия и кремния различных типов ППД, предназначенных для прецизионного анализа энергий и интенсивностей заряженных частиц, X- и  $\gamma$ -излучений. Сформулированы и систематизированы критерии отбора исходных монокристаллов, а также требования, предъявляемые к конструкционным материалам и условиям эксплуатации ППД.

Созданные оригинальные технологические приемы и оборудование позволили изготавливать различные Si(Au)-, Si(Li)-, Ge(Li)-, Ge(Li,Au)- и HPGe-детекторы, имеющие спектрометрические параметры, близкие к предельно достижимым.

2. На основе Ge(Li) и HPGe-детекторов показаны новые возможности применения ППД в составе прецизионных спектрометров заряженных частиц и  $\gamma$ -излучения.

Создан спектрометр для исследований электронов внутренней конверсии типа "мини-апельсин", в котором впервые тороидальный фильтр из постоянных магнитов используется в сочетании с HPGe-детектором. Спектрометр позволяет значительно увеличить избирательность регистрации электронов и эффективность измерения в диапазоне  $100-1000\text{ кэВ}$  при высоком энергетическом разрешении. Применение HPGe-детектора дает возможность проводить в процессе измерения точную энергетическую калибровку с помощью внешних  $\gamma$ -источников.

Создан спектрометр совпадения для трехмерных амплитудно-временных измерений, совмещающий два Ge(Li)- или два HPGe-детектора в одном кристалле. Во втором случае радиоактивный источник находится внутри кристалла, что обеспечивает возможность исследования  $e-\gamma$ , X- $\gamma$ , X-X, X-e и e-e-совпадений.

3. Разработана и экспериментально реализована методика создания непрерывных позиционно-чувствительных детекторов /ПЧД/ из кремния, позволяющая изготавливать: однокоординатные /до  $50\text{ мм}/$ , двухкоординатные /до  $30 \times 30\text{ мм}/$  и радиальные /диаметром до  $40\text{ мм}/$  ПЧД, имеющие позиционное разрешение  $\sim 1\%$  геометрических размеров чувствительной области /для  $\alpha$ -частиц -  $5,5\text{ МэВ}/$  и нелинейность функции отклика  $\leq 1\%$ .

Сформулированы требования, предъявляемые к исходному материалу и

резистивному слою - основному элементу детектора, а также к параметрам внешней электроники. На примере электронов показано влияние многократно-го рассеяния заряженных частиц на координатное разрешение детекторов.

4. Предложен новый метод создания непрерывных ПЧД, основанный на низкотемпературной диффузии лития в *n*-кремний. Метод позволяет изготавливать непрерывные детекторы с высокой однородностью резистивного слоя /лучше 99%/ и высокой воспроизводимостью параметров. Сравнительно скромное по сравнению с другими методами /например, имплантацией/ технологическое оборудование делает разработанный метод легкодоступным. На основе метода низкотемпературной диффузии разработаны однокоординатные, компенсированные литием, детекторы из *p*-кремния, предназначенные для регистрации длиннопробежных заряженных частиц.

5. Предложены два новых метода получения резистивных слоев с градиентом проводимости, на основе которых впервые созданы радиально-чувствительные детекторы с линейной функцией отклика.

6. Показаны различные возможности использования разработанных непрерывных ПЧД для регистрации заряженных частиц. Впервые экспериментально реализовано применение непрерывных ПЧД в составе магнитного  $\beta$ -спектрометра типа  $n\sqrt{2}$ , позволившее получать разрешение по импульсу  $\Delta p/p = 0,3 \pm 0,2\%$  для электронов в диапазоне энергий  $300 \pm 1000$  кэВ. Эффективность измерения по сравнению с ранее использованным одноканальным методом регистрации /счетчик Гейгера-Мюллера/ увеличилась более чем в 50 раз при снижении фона в  $\sim 5$  раз.

7. Впервые проведены исследования возможностей поиска двойного безнейтринного бета-распада  $2\nu_{00}$  с помощью многокристального  $n\text{pGe}$ -спектрометра совпадений.

С помощью методов прецизионной спектрометрии экспериментально исследован процесс прохождения электронов с энергией  $400 \pm 1700$  кэВ через вещество. Показано, что наиболее адекватное описание экспериментальных данных дает аппроксимация Финдли-Дю Сотоя для функции распределения потерь по Ландау с учетом резонансного фактора, введенного Блунком и Лейзегангом.

8. На основе разработанной модели эксперимента по поиску  $2\nu_{00}$ -распада, используя метод Монте-Карло, построены суммарно-энергетические спектры электронов для  $^{48}\text{Ca}$ , и получена функция отклика  $n\text{pGe}$ -спектрометра совпадений, позволившая сделать оценку чувствительности предлагаемого эксперимента. Для спектрометра из 32 детекторов и 30 источников  $^{48}\text{Ca}$  получено:  $\lim T_{1/2}(^{48}\text{Ca}) \geq 10^{22}$  лет,  $\lim T_{1/2}(^{76}\text{Ge}) \geq 3 \cdot 10^{23}$  лет/при 68%СЛ/.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Вылов Ц., Егошин И.Н., Маринов М.Г., Муминов Т.М., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г., Срна Д., Юрковский Я. Изготовление и исследование  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов. - Дубна, 1972. - 18 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P-13-6759/.

2. Кузнецов В.В., Осипенко Б.П., Срна Д., Сандуковский В.Г., Юрковский Я. Чл  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектор. - XII совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. /Дубна, 22-25 июня 1971 г./: Тез. докладов. - Дубна, 1971, ОИЯИ, Д6-5783, с.183-184.

3. Береги Е., Вылов Ц., Егошин И.Н., Крацикова И., Ли Чен Сон, Осипенко Б.П., Пермякова Л.А., Сандуковский В.Г., Срна Д., Чан Тхонг, Юрковский Я. О некоторых работах, выполняемых в группе полупроводниковых детекторов ОИЯИ, по разработке и изготовлению полупроводниковых детекторов. - Совещание по полупроводниковым детекторам /Дубна, 25-27 июня 1974 г./: Тез. докладов - Дубна, 1974, ОИЯИ, 13-7098, с.32-40.

4. Вылов Ц., Егошин И.Н., Латушински А., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г., Юрковский Я. Полупроводниковые спектрометры мягкого гамма-излучения и электронов конверсии. - XXU совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра /Ленинград, 28-31 января 1975 г./: Тез. докладов. - Ленинград, "Наука", 1975, с.435-436.

5. Вылов Ц., Егошин И.Н., Муминов Т.М., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г., Юрковский Я. Поверхностно-барьерные германий-литиевые детекторы для спектрометрии излучений радиоактивных нуклидов. - Дубна, 1976. - 13 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-10056/.

6. Голиков В.М., Егошин И.Н., Жаргал Ч., Ким Зай Те, Ким Чан Хван, Ласкус Т., Латушински А., Маринов М., Осипенко Б.П., Ревенко А.В., Сандуковский В.Г., Слапа М., Юрковский Я. Детекторы из сверхчистого германия для спектрометрии гамма-излучения, изготовленные в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. - Дубна, 1983. - 10 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-83-669/.

7. Бруданин В.Б., Вылов Ц., Журавлев Н.И., Иванов А.И., Покровский В.Н., Рухадзе Н.И., Саламатин А.В., Сандуковский В.Г., Сидоров В.Т., Синаев А.Н. Спектрометр для трехмерных амплитудно-временных измерений. - Дубна, 1983. - 12 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-83-747/.

8. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы. Характеристики резистивных слоев. - Дубна, 1978. - 15 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-11355/, в кн.: Прикладная ядерная спектроскопия. М. Атомиздат, 1979, вып. 9, с. 19-25.

9. Амов Б., Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы с резистивными слоями. - Всесоюзное совещание по полупроводниковым детекторам /Киев, 12-17 сентября 1979 г./, ИЯИ АН УССР, 81-11, Киев, 1981, с.31-35.

10. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. Однокоординатные  $\text{Si}(\text{Li})$  позиционно-чувствительные детекторы. - Дубна, 1979. - 12 с.

/Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-12766/.

11. Сандуковский В.Г. Полупроводниковые позиционно-чувствительные детекторы ядерных излучений. - Дубна, 1982. - 17 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-82-90/.

12. Бельцаж Е., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г. О возможности получения радиального полупроводникового позиционно-чувствительного детектора с линейным откликом. - Дубна, 1982 - 5 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-82-91/.

13. Амов Б., Джаков А., Осипенко Б.П., Пенця Е., Сандуковский В.Г. Радиальный кремниевый позиционно-чувствительный линейный детектор с имплантированным резистором. - Дубна, 1983. - 3 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-83-35/.

14. Адам И., Венос Д., Куклик А., Осипенко Б.П., Сандуковский В.Г., Шпалек А. Использование полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов в магнитном  $\beta$ -спектрометре. - Дубна, 1984. - 6 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 6-84-711/.

15. Вылов Ц., Брианссон Ш., Бруданин В.Б., Вален Р., Громов К.Я., Здесенко Ю.Г., Маринов А., Минкова А., Покровский В.Н., Проjkова А., Сандуковский В.Г. О чувствительности эксперимента по поиску двойного безнейтринного бета-распада с помощью ППД. - Дубна, 1984. - 16 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: Р6-84-554/.

16. Маринов А., Брианссон Ш., Вылов Ц., Сандуковский В.Г. Моделирование эксперимента по поиску  $2\theta_{00}$ -распада с помощью спектрометра совпадения. - Дубна, 1985. - 13 с. /Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 13-85-99/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 апреля 1985 года.