

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На правах рукописи  
УДК 539.1

**ГУСЕВ**  
Константин Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ  
В НИЗКОФОНОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2009

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,

В.Г. Сандуковский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.С. Барабаш  
(ИТЭФ, г. Москва)

кандидат физико-математических наук

Н.И. Замятин  
(ЛФВЭ ОИЯИ, г. Дубна)

Ведущая организация:

Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет),  
г. Москва

Защита диссертации состоится” \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 2009 г. в ” \_\_\_\_ “ часов на засе-  
дании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядер-  
ных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан ” \_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 2009 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** С момента своего возникновения и по настоящее время полупроводниковые детекторы остаются незаменимым инструментом экспериментаторов в ядерной физике и физике элементарных частиц. Однако, при использовании традиционных (стандартных промышленно выпускаемых) детекторов из кремния и германия в процессе планирования и проведения экспериментов в современной неускорительной физике, часто возникают проблемы, не имеющие тривиальных решений.

Одной из ключевых задач нейтринной физики является поиск двойного безнейтринного бета-распада. Интерес к таким экспериментам обусловлен тем, что, по сути, это единственный способ определить, является нейтрино дираковской или майорановской частицей. Существует два экспериментальных подхода к исследованию двойных бета-процессов. Первый – эксперименты с «активным источником», в которых детектор одновременно является и источником искомых событий. Второй – это эксперименты с внешним «пассивным» источником (тонкий слой источника помещается между регистрирующими детекторами). В обоих случаях на применяемые детекторы накладывается ряд важных требований. Детекторы должны иметь низкий внутренний радиоактивный фон, обладать хорошим энергетическим разрешением, высокой эффективностью регистрации и стабильностью спектрометрических характеристик. Этим требованиям в полной мере отвечают полупроводниковые детекторы из особо чистого германия (HPGe). Однако, и в том, и в другом случае не представляется возможным использовать ни традиционные, промышленно выпускаемые HPGe-детекторы, ни обычные методы их эксплуатации.

Так, при разработке детекторов и криостата для полупроводникового спектрометра TGV-2 (Телескоп Германиевый Вертикальный), который относится к классу экспериментов с пассивным источником, стала очевидной неприменимость в данном случае существующих методик капсулирования детекторов, обеспечения электрических контактов к ним и охлаждения  $^{32}$ -детекторной сборки до рабочей температуры. После запуска TGV-2 в эксплуатацию назрела необходимость увеличения массы изотопа-кандидата на  $2\beta$ -процесс без значительной переделки спектрометра, что потребовало разработки методики изготовления планарных HPGe-детекторов, имеющих тонкие нечувствительные слои с двух сторон.

В другом классе экспериментов по поиску  $2\beta$ -распада – экспери-

ментах с активным источником используются коаксиальные детекторы, изготовленные из обогащенного изотопа  $^{76}\text{Ge}$ . Наилучший, на сегодняшний день, предел на период полураспада  $2\beta 0\nu$ -процесса получен именно в таких экспериментах. Однако, для достижения принципиально новых результатов в германиевых экспериментах нового поколения GERDA и Majorana, уже недостаточно просто увеличить массу детекторов. Необходимо значительно понизить радиоактивный фон. Основным источником фоновых событий в экспериментах подобного рода является высокоэнергетическое  $\gamma$ -излучение от конструкционных материалов окружающих детектор. Гамма-квант с энергией более 2,25 МэВ, попав в детектор и испытав многократное комптоновское рассеяние, затем может покинуть его. При этом энергетические потери такого кванта суммируются, а результирующий сигнал вполне может имитировать интересующий нас процесс: регистрацию двух электронов с суммарной энергией  $\sim 2,039$  МэВ. Решить проблему представляется возможным, если разделить детектор на отдельные сегменты. Двойной  $\beta$ -распад – это процесс, происходящий в “одной точке”, поэтому регистрация двух электронов с высокой долей вероятности произойдет лишь в одной секции, в то время как фоновый  $\gamma$ -квант в результате многократного комптоновского рассеяния оставит энергетический след в нескольких секциях. Следовательно, разработка простой методики секционирования имеет принципиальное значение для успеха будущих экспериментов по поиску  $2\beta 0$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ .

Стандартные детекторы из кремния и германия давно и широко используются. Однако при их применении в нетрадиционных условиях порой возникают неожиданные трудности. Так, в экспериментах по изучению реакций ядерного синтеза в зарядово-несимметричном мюонном комплексе  $\mu d^3\text{He}$  ( $\mu d^3\text{He} \rightarrow \alpha(3,5 \text{ МэВ}) + p(14,64 \text{ МэВ})$ ) Si(Li)-детекторы должны были функционировать при температуре 34 К. Оказалось, что работы, посвященные изучению поведения полупроводниковых детекторов при температурах ниже 77 К, в основном выполнены в 60-70-е годы и содержат неполные, а иногда и противоречивые сведения. Очевидно, что с тех пор произошел заметный прогресс в технологии получения чистых монокристаллов кремния и германия, в методике создания детекторов, а также в качестве спектрометрической аппаратуры. Таким образом, назрела необходимость проведения нового исследования наиболее часто используемых в экспериментальной физике детекторов в условиях низких температур.

Из вышесказанного следует, что задачи разработки и применения полупроводниковых детекторов для исследования редких процессов в

низкофоновых экспериментах в настоящее время, несомненно, являются актуальными.

**Цель работы:**

1. Разработка и создание детекторов из особо чистого германия для спектрометра TGV-2.
2. Исследование радиоактивного фона спектрометра TGV-2.
3. Измерение периода полураспада различных ветвей двухнейтринного двойного захвата  $^{106}\text{Cd}$ .
4. Разработка методики двухсторонней имплантации планарных HPGe-детекторов.
5. Разработка методики секционирования германиевых детекторов.
6. Получение новой экспериментальной информации о поведении характеристик детекторов из кремния и германия в температурном диапазоне 1-77 К.

**Научная новизна:**

1. Получены новые ограничения на период полураспада для различных ветвей распада  $^{106}\text{Cd}$  на основное и первое возбужденное состояние дочернего ядра. Значение  $T_{1/2}$  для  $2\nu 2\text{K}$  моды распада на основное состояние дочернего ядра более чем на порядок лучше достигнутого в ранее выполненных экспериментах.
2. Разработана методика двухсторонней имплантации HPGe-детекторов, позволяющая существенно уменьшить их мертвые слои.
3. Разработана методика секционирования детекторов из особо чистого германия, предназначенная для идентификации фоновых событий в будущих экспериментах по поиску двойного  $\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ .
4. Впервые показано, что Si(Li)-детекторы могут использоваться при температуре ниже 30 К, сохраняя при этом спектрометрические свойства.

**Практическая ценность** работы определяется следующим:

1. Применение HPGe-детекторов, изготовленных по разработанной методике двухсторонней имплантации, в спектрометре TGV-2 приведет к увеличению массы исследуемого изотопа практически в два раза.
2. Методику секционирования, отработанную на планарных п.п.д., планируется использовать при создании нового поколения экспериментов с активным источником по поиску  $2\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ .
3. По результатам проведенных исследований температурный диапазон применимости некоторых типов полупроводниковых детекторов

можно расширить до 1 К.

**Апробация работы и публикации.**

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и докладывались на Международных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Санкт-Петербург-2000, Петергоф-2005), на II Баксанской молодежной школе Экспериментальной и Теоретической Физики (Баксан-2001), на II Международной летней школе по Физике Нейтрино памяти Б. Понтекорво (Алушта-2003), на VIII Международной научной конференции молодых ученых и специалистов (Дубна-2004), а также на семинарах в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Материалы, являющиеся основой диссертации, изложены в 8 публикациях.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В первой главе описывается спектрометр TGV-2 и приводятся полученные на нем результаты.

Во второй главе представлены разработанные методики имплантации и секционирования планарных детекторов из особо чистого германия.

В третьей главе изложены результаты исследования поведения характеристик широко используемых полупроводниковых детекторов из кремния и германия при температурах ниже 77 К.

Диссертация содержит 77 страниц печатного текста, 36 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 49 наименований. Полный объем 82 страницы.

**КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обосновывается актуальность научных проблем, изучению которых посвящена работа. Изложены цели и методы исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации описывается многокристальный спектрометр TGV-2 для изучения двойных  $\beta$ -процессов. Телескоп состоит из 32 планарных HPGe-детекторов. В качестве материала для их изготовления применялся германий  $p$ -типа проводимости с разностной

концентрацией примесей  $|N_a - N_d| = 0,7 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Омический контакт детекторов создавался имплантацией ионов бора, а *pn*-переход – посредством диффузии лития. Толщина входного окна детектора (омического контакта) не более 0,1 мкм, в то время как глубина залегания *pn*-перехода при данном способе изготовления превышает 600 мкм. Этот факт обусловил возможность регистрации электронов (или рентгеновского излучения) только со стороны омического контакта. Диаметр чувствительной области каждого из детекторов составляет 60 мм, толщина – 6,5 мм. Полный активный объем и полная масса HPGe-детекторов телескопа TGV-2 составляет около 400 см<sup>3</sup> и 3 кг соответственно. Все детекторы были предварительно протестированы в криостате обычного типа. Напряжения обеднения детекторов лежат в диапазоне 150-300 В, энергетическое разрешение для энергии  $\gamma$ -излучения 1332,2 кэВ (<sup>60</sup>Co) не хуже 3,5 кэВ.

Низкофоновый криостат U-типа для спектрометра TGV-2 изготовлен фирмой Canberra и усовершенствован в ЛЯП ОИЯИ.

Детекторы монтировались попарно в специально изготовленные оправки из низкофонового сплава Al с 1 % Si с содержанием U + Th < 0,1 ppb. Первый и 32 детекторы упакованы в одиночные оправки. В двойных оправках детекторы располагаются входными окнами наружу. Между соседними оправками размещены фольги из изотопа-кандидата на 2 $\beta$ -процесс. Толщина фольги в случае <sup>106</sup>Cd составляет ~ 50 мкм, а для <sup>48</sup>Ca – порядка 350 мкм. Для достижения максимальной эффективности регистрации расстояние между источником и детекторами сделано минимально возможным (около 1,5 мм). Конструкция телескопа позволяет легко разъединять оправки для замены источников. Сборка из оправок расположена на медном основании и накрыта полированной медной крышкой (тепловым экраном), соединенной с основанием. Для контроля температуры используются два платиновых термометра, расположенных в месте соединения гибкого хладопровода с медным основанием и на крышке детекторной сборки. Рабочая температура внутри системы составляет от 93 до 95 К. Как тепловые контакты между оправками, так и электрические контакты к детекторам осуществлены без использования традиционной индиевой фольги. Общий вид детекторной части спектрометра TGV-2 представлен на рис. 1.

Для уменьшения естественного радиоактивного фона в установке использована пассивная защита, состоящая из: а) меди (толщина > 20 см); б) стального герметичного бокса, защищающего от проникновения радона; в) свинца (слой > 10 см); г) нейтронной защиты из борированного полиэтилена (16 см). Кроме того, установка TGV-2 располагается

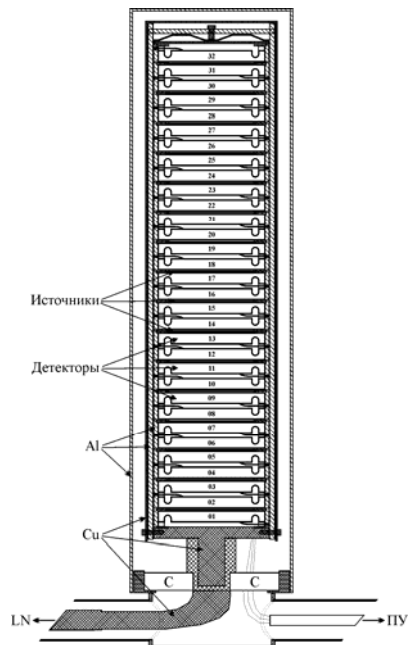


Рис. 1. Детекторная часть спектрометра TGV-2 в сборе

Учитывая эффективность и полученные фоновые характеристики после годового измерения 10 г  $^{48}\text{Ca}$  будет уточнено значение  $T_{1/2}$  для  $2\beta 2\nu$ -моды и улучшена оценка для  $2\beta 0\nu$ -моды двойного  $\beta$ -распада данного изотопа (ожидаемое значение не хуже  $2 \times 10^{22}$  лет).

На спектрометре TGV-2 начато исследование двойного электронного захвата  $^{106}\text{Cd}$  на основное состояние дочернего ядра. Из предварительной обработки данных, накопленных за 3400 ч измерений 10 г обогащенного  $^{106}\text{Cd}$  (обогащение 75%) получены новые ограничения (на 90%-ном уровне достоверности) для различных ветвей распада  $^{106}\text{Cd}$  на основное и первое возбужденное ( $2^+$ , 512 кэВ) состояния дочернего ядра. Они составляют соответственно  $T_{1/2}^{2\nu\beta^+EC} \geq 4,1 \times 10^{19}$  лет и  $T_{1/2}^{2EC2\nu} \geq 5,6 \times 10^{19}$  лет для переходов  $0^+ \rightarrow 0^+$ , g.s. и  $T_{1/2}^{2\nu\beta^+EC} \geq 5,8 \times 10^{19}$  лет и  $T_{1/2}^{2EC2\nu} \geq 2,1 \times 10^{19}$  лет для переходов на уровень 512 кэВ. Ожидаемая оценка на  $2EC2\nu$ -переход на основное состояние дочернего ядра за 1 год измерений составит не менее  $10^{20}$  лет.

Вторая глава диссертации посвящена разработке методик создания специальных типов детекторов для экспериментального исследования двойных  $\beta$ -процессов.

в подземной лаборатории Фрежус (Модан, Франция) на глубине 4800 м водного эквивалента.

В спектрометре TGV-2 применяются два варианта электронной схемы в зависимости от исследуемого процесса – изучения двойного  $\beta$ -распада, либо двойного электронного захвата. В обоих случаях неизменными остаются 32 предусилителя, 32 спектрометрических усилителя, блок высокого напряжения и блок питания предусилителей. Значительное понижение фона достигается за счет регистрации событий в режиме совпадений и анализа импульсов от детекторов.

После установки спектрометра в Моданской подземной лаборатории были проведены тестовые измерения радиоактивного фона без источников между детекторами.



Описана методика изготовления планарных детекторов, имеющих тонкие нечувствительные слои с обеих сторон, предназначенных для усовершенствования п.п.д.-телескопа TGV-2. Материалом для изготовления детекторов служил монокристаллический германий  $p$ - и  $n$ -типа проводимости с разностной концентрацией легированных примесей:  $|N_a - N_d| \sim 0,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Размеры образцов: диаметр 26 мм, толщина 3 мм ( $p$ -тип) и 6 мм ( $n$ -тип). Внедрение ионов фосфора (P) и бора (B) в качестве  $n^+$ - и  $p^+$ -контактов проводилось последовательно при энергиях 35, 25 кэВ (P) и 25, 17 кэВ (B).

Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики детекторов приведены на рис. 2.

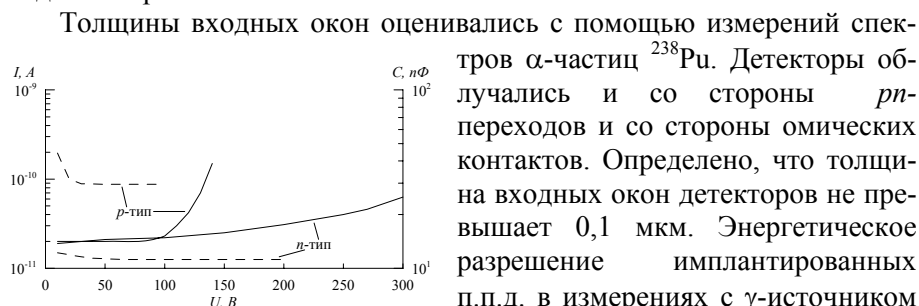


Рис. 2. Зависимости обратных токов (сплошные линии) и емкостей (штриховые) имплантированных детекторов от приложенного напряжения

Толщины входных окон оценивались с помощью измерений спектров  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$ . Детекторы облучались и со стороны  $pn$ -переходов и со стороны омических контактов. Определено, что толщина входных окон детекторов не превышает 0,1 мкм. Энергетическое разрешение имплантированных п.п.д. в измерениях с  $\gamma$ -источником  $^{60}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 1332,5$  кэВ) с предусилителем с охлаждаемым первым каскадом составило 1,7 кэВ для  $p$ -типа и 1,9 кэВ для  $n$ -типа.

Предлагаемая методика позволяет рассчитывать на получение планарных HPGe-детекторов с активной площадью  $2040 \text{ мм}^2$  с тонкими входными окнами, необходимых для развития и модернизации спектрометра TGV-2.

Далее изложены результаты разработки методики секционирования HPGe-детекторов и изучения их характеристик. Исходным материалом для изготовления двух п.п.д. с секционированным имплантированным  $pn$ -переходом служил германий  $n$ -типа проводимости с разностной концентрацией примесей  $|N_a - N_d| = 0,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

Геометрические размеры образцов: толщина – 6 мм, диаметр активной области – 28 мм. Процесс имплантации бора осуществлялся через крестообразную маску, что позволило создать переход, состоящий из четырех секторов (рис. 3). Расстояние между соседними секторами 2,0 мм. У первого детектора омический контакт был сделан ионной имплантацией фосфора, а у второго – диффузией лития.

Исследование спектротрических характеристик детекторов производилось с помощью  $\gamma$ -источника  $^{57}\text{Co}$  (облучалась вся поверхность детектора). В табл. 1 для  $\gamma$ -линии с  $E = 122$  кэВ указаны значения полного числа событий  $N$  под пиком и энергетического разрешения  $FWHM$ , полученные в различных режимах работы детектора № 1. Там же приведена сумма событий, измеренных на всех секциях ( $\Sigma_{1-4}$ ). Из таблицы видно, что число отсчетов при подключении всего детектирующего объема (режим НСП (несекционированный) в табл. 1) практически совпадает с суммой  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных отдельно каждым сегментом. Исследования детектора № 2 дали аналогичные результаты.

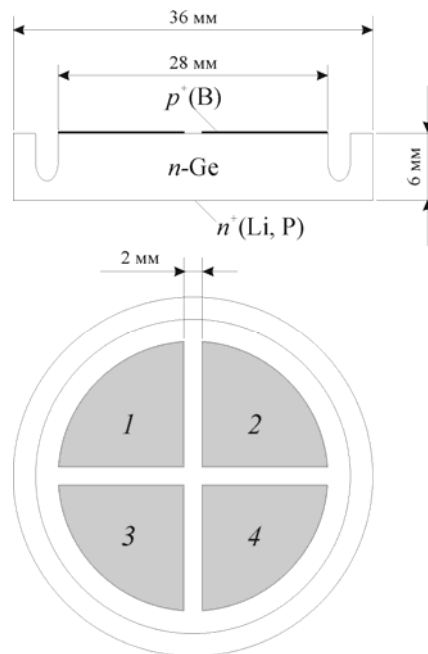


Рис. 3. Структура секционированного HPGe-детектора с имплантированным  $p$ -переходом

Таблица 1

Параметры	Режим работы					
	Секция 1	Секция 2	Секция 3	Секция 4	$\Sigma_{1-4}$	НСП
N	1358	1460	1479	1212	5509	5608
FWHM, кэВ	1,2	1,2	1,4	1,3		2,9

При изучении вопроса взаимовлияния секций использовался источник  $\alpha$ -частиц и коллиматор, позволяющий осуществить точное позиционирование источника над одним из секторов. Эффект наведенного сигнала для исследованной структуры практически полностью отсутствовал. Аналогичные данные были получены при измерениях с источником, находящимся над другими секторами п.п.д. № 2, а также для детектора № 1.

Для изготовления детектора с литиевым диффузионным контактом использовался сверхчистый германий  $p$ -типа проводимости с  $|N_a - N_d| = 1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Разбиение п.п.д. на две секции осуществлялось с помощью канавок, которые вырезались со стороны диффузионного слоя на глубину  $\sim 2/3$  толщины образца. Напряжение полного обеднения состав-

вило 100 В. Результаты измерений с источником  $^{57}\text{Co}$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Режим работы			
	Секция 1	Секция 2	$\Sigma_{1-2}$	НСР
N	53266	15017	68283	65516
FWHM, кэВ	1,7	1,2		2,4

Взаимовлияния кольцевых секций не обнаружено.

Таким образом, предложена методика создания секционированных HPGe-детекторов как с имплантированными, так и диффузионными выпрямляющими контактами. Изготовленные детекторы имеют хорошие спектрометрические характеристики, при этом взаимного влияния отдельных регистрирующих сегментов п.п.д. друг на друга не наблюдается. Следовательно, разработанная методика может быть применена для секционирования германиевых детекторов с целью идентификации фоновых событий в будущих экспериментах по поиску двойного  $\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$ .

В третьей главе изложены результаты исследования поведения характеристик широко используемых полупроводниковых детекторов из кремния и германия при температурах ниже 77 К. Выполнен краткий обзор публикаций, посвященных теме исследования. Показано, что имеющихся данных недостаточно для однозначного ответа на вопрос о работоспособности п.п.д. при низких температурах.

Изучение работы детекторов при криогенных температурах проводилось с помощью гелиевого криостата с электронной системой стабилизации температуры, позволявшего охлаждать образцы до 1 К. В отличие от исследований, выполненных ранее, криостат обеспечивал возможность варьировать величину температуры детектора в интервале 1-77 К и поддерживать её с точностью  $\pm 0,1$  К в течение длительного времени (более суток). Детекторы облучались через коллиматор ( $\varnothing$  3 мм)  $\alpha$ -частицами от источника  $^{148}\text{Gd}$ - $^{244}\text{Cm}$  с энергиями 3,2, 5,7, 5,8 МэВ.

Было исследовано 6 детекторов: Si(Li), три поверхностно-барьерных из кремния *n*- и *p*-типов, имплантированный из *n*-кремния, HPGe-детектор из *p*-германия. Si(Li)-детектор был изготовлен из *p*-кремния, имел активную площадь 5 см<sup>2</sup> и толщину 2,3 мм. Толщина нечувствительного литиевого слоя  $\sim 300$  мкм. Максимально возможная напряженность поля в детекторе составляла 12500 В/см. Поверхностно-

барьерный детектор Si(Au), изготовленный из  $n$ -кремния ( $\rho \approx 8$  кОм $\times$ см) имел активную площадь 8 см<sup>2</sup> и толщину 400 мкм. Два поверхностно-барьерных детектора Si(Ge,Al) из  $p$ -кремния с  $\rho \approx 75$  кОм $\times$ см и  $\rho \approx 150$  кОм $\times$ см имели активную площадь 3 см<sup>2</sup> и толщины 0,75 мм и 2,5 мм соответственно. Детектор Si(B,P), изготовленный из  $n$ -кремния ( $\rho \approx 6$  кОм $\times$ см) по планарной технологии, имел активную область 4 см<sup>2</sup> и толщину 300 мкм. HPGe-детектор был изготовлен из сверхчистого германия  $p$ -типа с разностной концентрацией примесей  $|N_a - N_d| = 2 \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Активная площадь детектора – 1 см<sup>2</sup>, толщина – 5 мм. Перед проведением эксперимента все детекторы измерялись в обычных условиях работы и имели спектрометрические характеристики близкие к оптимальным для детекторов данного типа.

Съем спектрометрической информации с детекторов осуществлялся с помощью стандартного тракта, для контроля стабильности работы которого использовался генератор точной амплитуды. Цифровой осциллограф позволял детально исследовать форму сигнального импульса. Кроме того, имелась возможность измерять вольт-фарадные характеристики детекторов.

При температуре 4,2 К все исследованные детекторы демонстрируют эффект независимости емкости от приложенного напряжения. Полное обеднение возникает при минимальном напряжении. Этот эффект возникает вследствие вымерзания свободных носителей заряда на ловушках.

Зависимость амплитуды сигнала от температуры для Si(Li)-детектора, полученная при облучении со стороны  $p^+$ -контакта (изучалась, в основном, электронная составляющая сигнала) представлена на рис. 4. Заметное уменьшение амплитуды сигнала при низкой напряженности поля в детекторе соответствует литературным данным (кривые 1, 2). При  $E = 6000$  В/см (кривая 3) изменение амплитуды уже не столь значительно. При максимально возможной в нашем случае напряженности  $E = 12500$  В/см (кривая 4) уменьшение амплитуды составляет  $\leq 30\%$ , но сигнал не исчезает вплоть до 1,5 К.

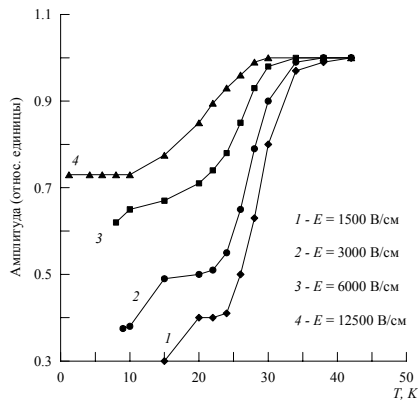


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала Si(Li)-детектора от температуры при различных напряженностях поля

Низкотемпературное поведение Si(Li)-детекторов может быть объяснено с помощью теории захвата-испускания уровнями примеси. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами, сделанными в рамках данной модели. Показано, что нормальная эксплуатация Si(Li)-п.п.д. при сверхнизких температурах возможна при напряженности поля в детекторе выше 12000 В/см. При  $E = 12500$  В/см энергетическое разрешение в диапазоне 25-77 К практически не менялось и соответствовало 18 кэВ. При температуре 10 К и ниже оно также не менялось, но несколько ухудшилось (25 кэВ).

Для детекторов из кремния *n*-типа (имплантированного Si(B,P) и поверхностно-барьерного Si(Au)) амплитуда сигнала не зависела от температуры при условии подачи на детектор достаточного напряжения. Аномалий в отклике детекторов выявлено не было. Энергетическое разрешение Si(Au)-детектора составило порядка 17 кэВ, для Si(B,P)-детектора  $FWHM \sim 40$  кэВ во всем температурном диапазоне.

В отклике поверхностно-барьерных детекторов, изготовленных из кремния *p*-типа проводимости, наблюдались аномалии, зависящие от величины удельного сопротивления исходного материала. Так, у детектора с  $\rho \approx 75$  кОм $\times$ см в интервале от 11 К до 18 К подача напряжения не вызывает появления пиков, а у детектора с  $\rho \approx 150$  кОм $\times$ см при максимальном напряжении  $U = 1200$  В в области 16-30 К амплитуда сигнала уменьшается на 20 %. Разрешение детекторов во всем температурном интервале составляет  $\sim 60$  кэВ, за исключением точек, находящихся в области амплитудных аномалий. Объяснение подобных аномалий, по-видимому, связано с наличием в исходном полупроводниковом материале примесей, на которых происходит «вымерзание» носителей заряда.

В измерениях с HPGe-детектором получено, что при напряженности поля 3000 В/см амплитуда сигнала остается практически постоянной (уменьшение порядка 5 %). При этом не обнаружено никаких аномалий в амплитуде и времени нарастания сигнала во всем исследуемом температурном диапазоне при шаге измерений 0,5 К. Энергетическое

разрешение во всем температурном диапазоне составляло порядка 18 кэВ.

Результаты работы доказывают, что наиболее распространенные детекторы из кремния и германия способны сохранять свои спектрметрические характеристики в температурном интервале 1-77 К при условии достаточной напряженности электрического поля.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработаны и созданы 32 HPGe-детектора для спектрометра TGV-2, предназначенного для исследования двойных  $\beta$ -процессов. Спроектирован и впервые реализован криостат, позволяющий охладить 32 детекторную сборку до рабочей температуры в едином объеме. Кроме того, созданный криостат позволил значительно уменьшить микрофонный шум. Измерен собственный фон спектрометра.

2. Впервые получены новые ограничения (на 90%-ном уровне достоверности) для различных ветвей распада  $^{106}\text{Cd}$  на основное состояние и на первое возбужденное состояние ( $2^+$ , 512 кэВ) дочернего ядра. Они составляют соответственно  $T_{1/2}^{2\nu\beta^+EC} \geq 4,1 \times 10^{19}$  лет и  $T_{1/2}^{2EC2\nu} \geq 5,6 \times 10^{19}$  лет для переходов  $0^+ \rightarrow 0^+$ , g.s. и  $T_{1/2}^{2\nu\beta^+EC} \geq 5,8 \times 10^{19}$  лет и  $T_{1/2}^{2EC2\nu} \geq 2,1 \times 10^{19}$  лет для переходов на уровень 512 кэВ. Полученное значение для  $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ -моды распада для перехода на основное состояние дочернего ядра более чем на порядок лучше достигнутого в предыдущих экспериментах.

3. Разработана и реализована методика двухсторонней имплантации планарных HPGe-детекторов, позволившая создать детекторы с тонкими «входными окнами» ( $\sim 0,1$  мкм). Применение данной методики к детекторам TGV-2 позволит увеличить эффективную массу исследуемого изотопа в  $\sim 2$  раза.

4. Разработана методика секционирования HPGe-детекторов. Предложенная методика позволит на порядок понизить фон в экспериментах нового поколения по поиску двойного безнейтринного  $\beta$ -распада (GERDA, Majorana).

5. Впервые проведено исследование широкого класса различных типов детекторов из кремния и германия в температурном интервале 1-77 К. Показано, что детекторы сохраняют свои спектрометрические характеристики вплоть до 1 К. Впервые продемонстрирована работоспособность Si(Li)-детекторов при гелиевых температурах.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. Бруданин В.Б., Рухадзе Н.И. ... Гусев К.Н. и др. Низкофоновый многодетекторный спектрометр TGV-2 для исследования двойного  $\beta$ -распада. Изв. РАН Сер. Физ. 2003. Т. 67. № 5. с. 618-623.
2. Бруданин В.Б., Рухадзе Н.И. ... Гусев К.Н. и др. Эксперимент TGV по поиску двойного электронного захвата. Сообщения ОИЯИ Р6-2004-219. Дубна 2004.
3. Бруданин В.Б., Рухадзе Н.И. ... Гусев К.Н. и др. Поиск двойного электронного захвата Cd-106 в эксперименте TGV-2. Изв. РАН Сер. Физ. 2006. Т. 70. № 2. с. 275-279.
4. Venes P., Cernak P., Gusev K.N. et al. The low background spectrometer TGV II for double beta decay measurements. Nucl. Instr. and Meth. A. 2006. V. 569. p. 737-742.
5. Гуров Ю.Б., Гусев К.Н., Катулина С.Л. и др. Имплантированные HPGe-детекторы для многослойных спектрометров заряженных частиц. ПТЭ. 2004. № 5. с. 34-37.
6. Гуров Ю.Б., Гусев К.Н., Катулина С.Л. и др. Секционированные детекторы из особо чистого германия. ПТЭ. 2007. № 6. с. 43-46.
7. Гусев К.Н., Гуров Ю.Б., Довгун С.В. и др. Особенности поведения характеристик полупроводниковых детекторов при температурах ниже 77 К. Труды Второй Баксанской Молодежной Школы Экспериментальной и Теоретической Физики. Нальчик, Каб.-Балк. Ун-т, 2001. с. 160-176.
8. Гусев К.Н., Гуров Ю.Б., Катулина С.Л. и др. Исследование характеристик полупроводниковых детекторов из кремния и германия при температурах ниже 77 К. ПТЭ. 2007. № 2. с. 65-69.