



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2005–18

На правах рукописи

Воробьев Александр Павлович

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ
НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ**

Специальность: 01.04.23 – физика высоких энергий

А т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2005

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор О.П. Толбанов (СФТИ, г. Томск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор В.И. Рыкалин (ГНЦ ИФВЭ), доктор физико-математических наук, профессор И.А. Голутвин (ОИЯИ, г. Дубна) доктор физико-математических наук, профессор И.А. Болотов В.Н. (ИЯИ РАН, г. Пахра)

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelьцына, МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

Защита диссертации состоится “_____” 2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142280, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Около 20 лет назад полупроводниковые детекторы были едва известны в физике высоких энергий, тогда как сегодня – это широко используемые приборы, которые вырабатывают электрические сигналы, напрямую измеряемые чувствительными усилителями для определения координат частиц, реже для определения их энергии, а также для идентификации типа частиц. Электрические сигналы могут быть обработаны и записаны компьютерными системами сбора и обработки информации для немедленного, либо последующего анализа. Полупроводниковые детекторы обеспечивают наивысшую координатную точность в больших детектирующих системах, что особенно важно для физических экспериментов, исследующих редкие процессы.

Почти все полупроводниковые детекторы, используемые в экспериментальной физике, изготавливаются на основе монокристаллов чистого кремния по технологиям интегральных микросхем, что и предопределило их широкое применение в силу высокой степени унификации и повторяемости этих технологий.

Развитие будущих физических экспериментов с использованием протон-протонных коллайдеров, а также других типов коллайдеров высокой светимости и пучков ионов потребует создания очень больших систем с максимально возможной гранулярностью детектирующих элементов. Это связано с огромным потоком частиц, образующихся в результате столкновения пучков и больших радиационных нагрузок на детекторы за время проведения экспериментов, сравнимых с радиационными нагрузками, получаемыми при работе с ядерными реакторами, либо с испытаниями оружия.

Поэтому будущее использование полупроводниковых детекторов в физическом эксперименте в значительной степени будет предопределено возможностями технологии создания высокоскоростных детекторов, обес-

печивающих необходимые скорости считывания информации, и возможностями работы детекторов в условиях предельно высоких радиационных нагрузок.

Кремневые детектор пока обеспечивают в основном потребности современных физических экспериментов. Однако развитие экспериментальной физики следует в направлении увеличения радиационных загрузок. Это потребует в ближайшем будущем использования в физическом эксперименте с высокими радиационными загрузками детекторов из других материалов, таких как арсенид галлия, либо искусственные алмазы. Кроме того, в ряде экспериментальных приложений уже сейчас важно иметь детекторы с большим атомным номером, например для регистрации X-лучей или при использовании полупроводниковых детекторов в качестве активных мишеней.

Настоящая работа посвящена актуальной проблеме разработки нового поколения полупроводниковых детекторов на арсениде галлия (GaAs) и исследованию возможности их использования в ряде приложений.

В России работы по созданию и исследованию полуизолирующих слоёв арсенида галлия и разработка приборов на их основе начались в 70-х годах в Томске в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) и НИИ полупроводниковых приборов. Предпосылкой к развитию исследований в данном направлении явились работы, проводимые группой учёных под руководством проф. С.С.Хлудкова, посвященные исследованию диффузии и физико-химических процессов взаимодействия с кристаллической решёткой GaAs примесей с глубокими энергетическими уровнями.

К 1980 г. был выполнен цикл работ и получены данные, позволившие обосновать новое научное направление по изучению физических механизмов диффузии в арсениде галлия примесей с глубокими уровнями, созданию способов изготовления и установлению принципов действия высокоомных структур с глубокими центрами в активной области и разработке СВЧ и оптоэлектронных приборов на их основе. Эти результаты были обобщены в докторской диссертации С.С. Хлудкова (СФТИ, г. Томск). Продолжением исследований по данному научному направлению явилась докторская диссертация проф. О.П. Толбанова (СФТИ, г. Томск), где был предложен и реализован нетрадиционный подход к созданию приборных структур с глубокими центрами, содержащимися в активной части структур, которые и обуславливают ряд новых физических эффектов и электронных свойств приборов.

Предлагаемая к защите диссертация посвящена созданию полупроводниковых детекторов на основе арсенида галлия (GaAs), легированного примесями с глубокими энергетическими уровнями, в частности хромом, и исследованию электронных процессов в GaAs детекторах ионизирующих излучений. Актуальность работы связана с отсутствием систематических исследований, позволяющих прогнозировать электронные свойства, обосновать физические модели и установить закономерности функционирования

малоизученных физических объектов – полупроводниковых структур и детекторов на основе GaAs, компенсированного примесями с глубокими энергетическими уровнями. В практическом плане использование полупроводниковых структур, компенсированных глубокими уровнями, перспективно для создания высокоэффективных, радиационностойких детекторов ионизирующих излучений, которые могут быть использованы для разработки цифровых диагностических систем нового поколения.

В предлагаемой докторской диссертации впервые обобщены результаты исследований взаимодействия с ионизирующими излучением детекторных структур, изготовленных на основе полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного хромом (Cr) в процессе диффузии, газофазной и жидкофазной эпитаксии, выполненных как непосредственно автором, так и под его руководством с 1989 по 2003 г.г. Работы, проведенные в этой области, позволили сформулировать научное направление, связанное с созданием GaAs радиационностойких квантовочувствительных детекторов для прецизионных координатных и диагностических систем. Для этого потребовалось разработать и исследовать физические принципы управления электронными свойствами высокомоментных структур, разработать принципы создания высокомоментных структур с заданной конструкцией и толщиной высокомоментного слоя более 100 мкм. Такой подход к созданию детекторных структур и многоэлементных детекторов ионизирующих излучений до сих пор остаётся оригинальным.

Цель работы и задачи исследования

К началу работы в литературе имелись ограниченные сведения о GaAs детекторах на компенсированном хромом арсениде галлия, исследовании в них электронных процессов, а также о возможности практического использования этих детекторов. Поэтому целью настоящей работы явилось обобщение всех результатов, полученных при участии автора, по исследованию характеристик полупроводниковых детекторов на компенсированном хромом арсениде галлия, электронных процессов, протекающих в них при внешнем воздействии, прежде всего ионизирующего излучения, и разработке на их основе детекторов нового поколения. В ходе выполненных исследований решались следующие задачи:

- изучение электронных свойств и возможностей управления основными характеристиками высокомоментных структур, лежащих в основе создания детекторов и получаемых на арсениде галлия путем его компенсации хромом;
- исследование транспорта и сбора неравновесных носителей заряда в GaAs детекторах, при взаимодействии их с электрическими полями, рентгеновским излучением и заряженными частицами высоких энергий;
- исследование влияния ионизирующих излучений (гамма-кванты, протоны, мезоны, нейтроны) на электрофизические характеристики и параметры детекторов и выявление возможностей метода высокотемпературного отжига на восстановление характеристик детекторов.

Научные результаты

1. Проведены исследования детекторов на базе арсенида галлия, выращенного из газовой фазы. Исследования показали, что эпитаксиальные детекторные структуры, выращенные из газовой фазы с низкой концентрацией свободных носителей заряда ($7 \cdot 10^{12} \div 1 \cdot 10^{15}$) см³, обладают квантовой чувствительностью к α-, β-, γ-излучению и высокой эффективностью сбора заряда, близкой к 100%. Толщина чувствительной области ограничивается областью объемного заряда диодов и не превышает 35–40 микрон. Структуры обладают сравнительно высоким для сложных полупроводников энергетическим разрешением при комнатной температуре (~10%) и перспективны для создания спектрометрических детекторов, например для идентификации радионуклидов.

Толщину чувствительной области детекторов можно значительно увеличить (до 260 мкм) путем последующего легирования материала ГФЭ хромом. Однако спектрометрические характеристики структур при этом ухудшаются. По-видимому, термическое воздействие в ходе диффузии хромом при температурах, превышающих температуру эпитаксии, ухудшает качество эпитаксиального материала.

2. Исследования детекторов, полученных методом жидкофазной эпитаксии, показали следующее:

- Метод жидкофазной эпитаксии при высоких температурах 850⁰ ÷ 980⁰С с использованием двойного легирования примесями Sn и Cr позволяет создавать арсенид галлиевые детекторы ионизирующих излучений с толщиной чувствительного слоя до 170–250 мкм (в одиночном процессе) и до 420–500 мкм (при наращивании в 3 последовательных процессах).

- Детекторные структуры имеют удельное электрическое сопротивление в пределах $\rho = (2 \cdot 10^7 \div 6 \cdot 10^8)$ Ом·см, что несколько ниже предельного значения для SI-GaAs:Cr, получаемого методом высокотемпературной диффузии хрома, при этом вдоль i-области детекторов создаётся неоднородное распределение напряженности электрического поля с экстремумами напряженности поля на p-i- или i-n-переходах, как правило.

- Распределение напряженности электрического поля при рабочем смещении зависит от условий выращивания и типа структуры, в частности, от характеристик i-n-перехода, образующегося у границы с подложкой. В случае выращивания многослойной высокоомной области на однородность распределения напряженности электрического поля сказываются границы между отдельными слоями i-GaAs:Sn,Cr, поэтому формирование переходных областей требует особого внимания при выращивании структур.

- В детекторах, изготовленных на основе эпитаксиальных p-i-n-структур, величина обратного тока ограничивается барьером i-n-перехода, где максимальна напряженность электрического поля. Вытянутые из барьера носители заряда модулируют сопротивление i-области диода. Путем

снижения максимальной напряженности поля в i-n-переходе получены p-i-n-диоды с плотностью обратного тока $j(-100V) = 1 \cdot 10^{-7} A/cm^2$, что в несколько раз меньше, чем у диффузионных структур и облегчает согласование с электронной усилительной схемой.

- Анализ амплитудных α -, β - и γ -спектров показывает, что в детекторах на основе эпитаксиальных слоев i-GaAs:Sn,Cr в сбор заряда преимущественно вносит вклад один тип носителей – электроны. Поэтому амплитудные γ -спектры детекторов не имеют четко выраженного максимума, соответствующего энергии квантов 59.5 кэВ. Эффективность сбора заряда электронов, определенная по высокогенеретическому хвосту спектра, для диодов с толщиной высокоомной области до 400 мкм, составляет 90÷100%. В отдельных диодах наблюдается сбор заряда выше 100% (вплоть до 300%), что связано с внутренним усилением сигнала.

3. В результате проведенных исследований детекторов ионизирующих излучений, изготовленных на базе «ростового» арсенида галлия, компенсированного примесями с глубокими энергетическими уровнями (хромом), получены следующие основные результаты:

- Показано, что путем прецизионного легирования хромом «ростового» электронного арсенида галлия (n-GaAs) могут быть изготовлены детекторы двух типов – барьерные с π -n переходом и резистивные. Детекторы обладают высокой чувствительностью к ионизирующему излучению.

- Предложены физические модели, объясняющие особенности транспорта неравновесных носителей заряда в π -n-p структурах и детекторах резистивного типа, компенсированных хромом. Показано, что транспорт и сбор заряда в треке заряженной частицы обусловлены дрейфовыми процессами с учетом захвата неравновесных дырок на глубокие отрицательно заряженные центры хрома. Вследствие этого в треке формируется распределение напряженности электрического поля, отличное от стационарного распределения. Установлено, что самосогласованное перераспределение напряженности электрического поля поддерживает в пределах трека напряженность поля, достаточную для дрейфа электронов с предельной скоростью, что обеспечивает максимальный сбор индуцированного заряда от неравновесных электронов.

- Установлено, что свойства π -n-p структур при обратном напряжении смещения в значительной степени определяются процессами, происходящими в высокоомном π -слое, с участием глубоких центров. Это – возрастание времени жизни неосновных носителей заряда и захват неравновесных дырок на глубокие отрицательно заряженные акцепторные центры. В сильных электрических полях транспорт неравновесных носителей заряда сопровождается изменением зарядового состояния глубоких центров в области объемного заряда π -n перехода и прилегающей высокоомной π -области.

- Показано, что резистивные детекторные структуры с омическими контактами (M-i-M типа) характеризуются линейными вольтамперными характеристиками при обеих полярностях электрического поля, однородным распределением электрического поля и удельного сопротивления по толщине детектора, отсутствием осцилляций электрического поля и отсутствием заметной «остаточной» памяти.

- Экспериментально показано, что использование π - n перехода и резистивных структур, сформированных легированием арсенида галлия примесями с глубокими уровнями (хромом), позволяет создавать полупроводниковые детекторы с принципиально новыми свойствами.

4. Представленные результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости арсенид галлиевых детекторов, компенсированных примесями с глубокими энергетическими уровнями, показывают, что:

- высокая радиационная стойкость π - n - p структур обусловлена экранированием радиационных дефектов компенсирующими примесями, поэтому при анализе радиационной стойкости детекторных структур необходимо учитывать захват неравновесных носителей заряда в треке на глубокие притягивающие центры;
- работоспособность детекторов в радиационных полях и их характеристики в значительной степени определяются плотностью потока ионизирующих излучений и темпом набора дозы, что обусловлено постепенной раскомпенсацией высокоомного слоя, вследствие изменения зарядового состояния глубоких центров в треке;
- детекторы на основе GaAs π - n - p структур, компенсированных хромом, обладают более высокой радиационной стойкостью по сравнению с ростовыми структурами на основе полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного EL2 центрами в процессе роста;
- увеличение эффективности сбора заряда и соотношения сигнал/шум в детекторах на основе компенсированного хромом арсенида галлия, путем компенсации низкоомной части рабочей области детекторов с помощью облучения высокоэнергетическими частицами и/или термической обработкой облученных структур;
- высокотемпературный отжиг радиационных дефектов практически полностью восстанавливает сбор заряда в детекторах на основе GaAs, компенсированного хромом.

5. Конструкции детекторов, исследованные в работе, обладают высокой радиационной стойкостью и могут быть использованы для создания координатных систем для физики высоких энергий при проведении экспериментов на современных ускорителях и детектирующих систем рентгеновской радиографии с высокой эффективностью регистрации гамма квантов, что позволяет значительно понизить дозы облучения, например при медицинских обследованиях.

Научная новизна работы состоит прежде всего в малой изученности объекта исследований – полупроводниковых детекторов на основе арсенида галлия, компенсированного хромом. В диссертации приведены результаты исследования детекторов, изготавливаемых практически всеми современными технологическими методами: газофазной эпитаксией, жидкофазной эпитаксией, методом диффузии хрома в полуизолирующий арсенид галлия, комбинированными способами.

Приводятся впервые сравнительные характеристики чувствительности к ионизирующему излучению детекторов, изготовленных разными методами. Изучено влияние компенсирующей примеси на электронные свойства и транспорт неравновесных носителей заряда, на радиационные свойства детекторов в полях протонов, нейтронов и мезонов. Представлены физические модели, объясняющие характеристики детекторов.

Показана возможность создания на компенсированном хромом арсениде галлия детекторов с большой толщиной чувствительной области (более 1 мм) и, соответственно, высокой эффективностью регистрации рентгеновских лучей в интервале энергий до 100 кэВ, что является принципиально важным для создания рентгенографических систем. Исследованы характеристики детекторов X-лучей в этом диапазоне энергий.

Практическая значимость работы состоит в разработке физических принципов и конструкций детекторов ионизирующих излучений на основе арсенида галлия, компенсированного хромом. Практическая ценность созданных детекторов подтверждается их использованием в разработке различных систем.

1. Разрабатывается вариант трековой системы вершинного детектора для эксперимента “PANDA” с использованием пиксельных детекторов барьерного типа на арсениде галлия, компенсированного хромом, с целью повышения радиационной стойкости системы и увеличения времени эксплуатации вершинного детектора, на строящемся ускорительном комплексе GSI (г. Дармштадт, Германия).

2. Разработана детектирующая система цифрового рентгеновского флюорографического аппарата сканирующего типа с линейкой падовых детекторов на арсениде галлия резистивного типа, обеспечивающая по сравнению с выпускаемыми серийными аппаратами улучшение пространственного разрешения, контрастной чувствительности, увеличение динамического диапазона, снижение в несколько раз дозы облучения пациентов. Разработанная система является основным продуктом, намеченным к производству, в рамках проекта диверсификации ГНЦ ИФВЭ «Организация производства диагностических/детектирующих систем на базе арсенид галлиевых полупроводниковых детекторов». Проект находится на рассмотрении в Федеральном агентстве по атомной энергии.

3. Разработан медицинский аппарат – цифровой рентгеновский ортопантомограф с линейкой падовых арсенид галлиевых детекторов, обеспечивающий снижение в десятки раз дозы облучения пациентов и персонала при медицинских обследованиях. Создан опытный образец прибора. Подготавливается к выпуску на производственных площадях ГНЦ ИФВЭ опытно-промышленный образец аппарата.

4. Разрабатывается детектирующая система с линейкой падовых арсенид галлиевых детекторов в составе рентгеновского компьютерного томографа, подготавливаемого к производству во ФГУП «НИИ Технической физики» г. Снежинск (Челябинская обл.).

5. Микрополосковые детекторы резистивного типа используются в разработке сканирующей гамма-камеры. Работа ведется совместно с ФГУП «НИИ Полупроводниковых приборов» (г. Томск), предприятием «МЕДИ-ПРО» (г. Томск), Сибирским кардиологическим центром (г. Томск).

6. Пиксельные детекторы резистивного типа используются в разработке детектирующей системы дентального аппарата. Работа ведется совместно с ФГУП «НИИ Полупроводниковых приборов» (г. Томск) и Научно-исследовательским центром Университета г. Фрайбург (Германия) в рамках подготавливаемого Проекта ИНТАС.

7. Микростриповые детекторы «чистого» газофазного арсенида галлия используются в разработке рентгеновского дифрактометра для контроля напряжений и ресурса прочности металлоконструкций. Работа ведется совместно с ФГУП «НИИ Полупроводниковых приборов» (г. Томск), ФГУП «Институт физико-технических проблем» (г. Дубна), С-Петербургский Политехнический университет (г. С-Петербург) в рамках подготавливаемого проекта МНТЦ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и совещаниях: Европейский симпозиум по полупроводниковым детекторам (Милан, Италия-1992); международные конференции по GaAs детекторам (Сан-Минеато, Италия-1993, 1998); международные конференции по GaAs и сопутствующим соединениям (Аахен, Германия-1995), (Глазго, Шотландия-1996), (Чивидале дель Фриули, Италия-1997); международные конференции по радиационным детекторам получения изображений (Сундсваль, Швеция-1999), (Фрайбург, Германия-2000), (Сардиния, Италия-2001), (Амстердам, Нидерланды-2002), (Рига, Латвия-2003); международные конференции по детекторам для e^+e^- -коллайдеров (Новосибирск-1996, 2002).; Международная конференция по ядерной физике и физике частиц (Каир, Египет-2001); Российская конференция по физике полупроводников (Нижний Новгород-2001); Региональная конференция «Научные исследования в наукоградах Московской области» (Протвино-2001); Восьмая российская

конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V», (Томск-2002); Шестой международный семинар «Наука и компьютерные технологии» (Москва-2003).

Основные результаты диссертации опубликованы в 48 работах, являющихся частью списка литературы, цитируемой в диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 163 страницы, включая 106 рисунков, 10 таблиц, 204 ссылки на литературные источники. В Приложении приведены основные публикации по теме диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, кратко излагается история развития исследований по выбранному направлению, формулируются цель работы и задачи исследований. Описываются научная новизна и практическое значение работы. Рассматривается общая структура диссертации.

В **первой главе** диссертации дан обзор накопленных в литературе результатов разработки и исследования полупроводниковых детекторов на основе «ростового» полуизолирующего арсенида галлия. Приведены общие оценки параметров, лежащих в основе работы полупроводниковых детекторов, показаны перспективы использования арсенида галлия для создания детекторов ионизирующих излучений и рассмотрены возникающие при этом проблемы.

Показано, что важнейшим свойством арсенида галлия как детекторного материала является возможность изменения его электрофизическими параметров путем легирования примесными атомами. Традиционно легирование осуществляется примесями, создающими в GaAs центры с мелкими энергетическими уровнями, находящимися в интервале рабочих температур в ионизованном состоянии. Такое легирование позволяет управлять изменять в полупроводнике тип проводимости и концентрацию основных носителей. Большой интерес, с точки зрения эффективного изменения свойств полупроводникового материала, представляет легирование примесями, образующими глубокие энергетические уровни, что позволяет воздействовать на диффузионную длину носителей заряда, удельное электрическое сопротивление материала и регулировать степень компенсации электрически активных центров. Введение легирующих добавок эффективно влияет на состояние ансамбля собственных точечных дефектов в кристаллах, на особенности поведения примесей, что в итоге приводит к расширению возможностей управляемого воздействия на свойства полупроводникового материала и детекторных структур на его основе.

Традиционно до работ, представленных в настоящей диссертации, для изготовления координатных GaAs детекторов в мире используется полу-

изолирующий арсенид галлия (SI-GaAs), получаемый методом Чохральского из расплава (LEC материал), так как только на нем можно было получить достаточную для регистрации релятивистских частиц толщину чувствительной области (~200 микрон). Сложные полупроводники, к которым относится GaAs, принципиально не являются однородными. Нарушение стехиометрии ведет к образованию в процессе выращивания материала собственных точечных дефектов. Большинство из них, как и фоновые (остаточные) примеси, имеют уровень концентраций не ниже 10^{14} см^{-3} . Исключение составляет ловушка для электронов EL2, представляющая глубокий донорный комплекс $\text{As}_{\text{Ga}} + \text{V}_{\text{As}}$ и имеющая уровень концентраций $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Донорные центры EL2 в состоянии EL2^+ имеют гигантское сечение захвата для электронов и тем самым ограничивают время жизни электронов в LEC материале до значений 0,2 нс, что существенно сказывается на снижении дрейфовой длины электронов и обуславливает низкую эффективность сбора электронной компоненты заряда в детекторах. Основную долю импульса тока в детекторах, изготовленных на этом материале, составляет дырочная компонента заряда. В научной литературе имеется большое количество экспериментальных данных, подтверждающих отрицательную роль EL2^+ центров на характеристики GaAs детекторов.

Обобщая литературные данные и экспериментальные результаты настоящей диссертационной работы, были сформулированы следующие выводы:

- с ростом количества EL2^+ центров растет удельное сопротивление LEC SI-GaAs материала;
- с ростом резистивности материала пропорционально снижается средняя плотность токов утечки, уменьшаются время жизни неравновесных электронов и толщина активной области детектора при постоянном напряжении смещения;
- концентрация EL2^+ центров должна быть меньше 10^{15} см^{-3} ; это приводит к резкому увеличению времени жизни электронов, дрейфовой длине электронов, что в конечном итоге, обеспечивает высокую эффективность сбора заряда в детекторах.

Кроме того, проблемой для использования LEC SI-GaAs является формирование при сравнительно небольших напряженностях поля $\sim 1 \text{ кВ/см}$ полевых и соответственно токовых неустойчивостей в детекторах. Проведены измерения на десятках структур, изготовленных в известных в мире фирмах [П29]¹. Показано, что независимо от фирмы изготовителя токовые осцилляции наблюдаются во всех детекторных структурах, изготовленных из «ростового» LEC SI-GaAs. Максимальное значение глубины проникновения электрического поля, задающего область чувствительности детектора в образцах, достигало 200–250 мкм при напряжении смещения ≥ 700 В. Кроме того, у детекторов

¹ Ссылки с буквой П относятся к списку литературы приведенному в Приложении 1.

наблюдается так называемая «остаточная» память, т.е. после снятия импульса «засветки» от источника излучения во временном отклике детектора присутствует длинный «хвост» до 1 мс, тогда как основной импульс – не более 10 нс. Наличие этого «хвоста» также связано с релаксацией центров захвата EL2. Таким образом, полупроводниковые детекторы на основе «ростового» арсенида галлия (LEC SI -GaAs) имеют ряд недостатков, которые сдерживают их применение. Поэтому было предложено снизить концентрацию EL2^+ центров.

Есть два пути снижения концентрации ростовых EL2^+ центров, которые были использованы на практике для создания детекторов, исследуемых в диссертации:

- снижение температуры роста нелегированного арсенида галлия, что можно достичь использованием эпитаксиальной технологии выращивания материала;
- заполнение в равновесном состоянии EL2^+ центров электронами $\text{EL2}^+ + e \rightarrow \text{EL2}^0$. Это становится возможным, если в процессе выращивания арсенид галлия легируется мелкими донорами (N_d) с концентрацией $N_d > N_{\text{EL2}}$ с последующей перекомпенсацией глубокой акцепторной примесью.

Для этих же целей можно использовать и другие методы. Контролируемая компенсация остаточных примесей и дефектов, в том числе EL2^+ , и получение полуизолирующего GaAs могут осуществляться путем введения собственных структурных дефектов посредством облучения частицами и гамма-квантами, термообработкой и пластической деформацией материала.

В последующих главах приведены результаты исследования детекторов, полученных эпитаксиальной технологией и легированием «ростового» материала глубокой акцепторной примесью – хромом.

Во второй главе диссертации исследована возможность использования чистых эпитаксиальных слоев для создания детекторов ионизирующих излучений [П9, П20, П21, П23, П33]. Актуальность использования этого технологического метода обусловлена концентрацией собственных дефектов, на несколько порядков более низкой, чем в «ростовом» полуизолирующем арсениде галлия. Рассмотрены конструкции трёх типов полупроводниковых структур с различным соотношением глубоких и мелких примесей и характеристики полупроводниковых детекторов на их основе. Представлены результаты первых исследований детекторных структур, полученных легированием хромом чистых эпитаксиальных слоев.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что концентрация собственных точечных дефектов в эпитаксиальных слоях арсенида галлия довольно низкая ($10^{12}\text{--}10^{13} \text{ см}^{-3}$) и только для главной электронной ловушки EL2 достигает $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

В главе представлены результаты исследования детекторов, изготовленных на материале газофазной эпитаксии, полученном в хлоридной газотранспортной

системе Ga-AsCl₃-H₂. Все эти детекторные структуры по электрофизическим свойствам можно классифицировать на три группы:

I группа. Слабо компенсированные (степень компенсации, $C_k = N_a/N_d$ не превышает 60÷70%, $N_d - N_a > N_t$) n-типа проводимости детекторные структуры с концентрацией свободных носителей 10^{14} - 10^{15} см⁻³. Соотношение емкостей, измеренных на низких и высоких частотах, $C_{\text{нq}}(10^2 \text{ Гц}) / C_{\text{вq}}(10^6 \text{ Гц}) = 1-1,2$, т.е. нет зависимости емкости детекторов от частоты модуляции.

II группа. Компенсированные (с высокой степенью компенсации $C_k > 80\%$, $N_d - N_a \approx N_t$) n-типа проводимости детекторные структуры с концентрацией свободных носителей $< 10^{14}$ см⁻³. $C_{\text{нq}}(10^2 \text{ Гц}) / C_{\text{вq}}(10^6 \text{ Гц}) = 2-4$. То есть, наблюдается зависимость емкости от частоты измерительного сигнала, что соответствует удельному сопротивлению эпитаксиального слоя 10^4 - 10^5 Ом·см.

III группа. Детекторы p-типа проводимости с низкой концентрацией свободных носителей 10^{10} - 10^{11} см⁻³. Высокая концентрация примесей в слоях p-типа равна 10^{14} - 10^{15} см⁻³, что значительно выше концентрации свободных носителей. Это означает, что слои сильно компенсированы глубокой акцепторной примесью, концентрация которой выше, чем мелких донорных примесей ($N_d - N_a < N_t$). $C_{\text{нq}}(10^2 \text{ Гц}) / C_{\text{вq}}(10^6 \text{ Гц}) = 10-30$. Сильная зависимость емкости при низких частотах. Удельное сопротивление эпитаксиального слоя 10^5 - 10^6 Ом·см.

Поскольку преднамеренного легирования эпитаксиальных слоев примесями в процессе роста не проводилось, то их электрофизические свойства определяются уровнем остаточных примесей в системе.

Детекторы барьера типа с резким p-n переходом.

Структура детекторных конструкций для 1- и 2-й групп одинаковая, – барьерный переход формируется вблизи поверхности детекторов. Для 3-й группы барьерный переход находится в глубине материала, вблизи подложки.

Толщина чувствительной области у всех типов структур не более 35–40 мкм и совпадает с областью объемного заряда (ООЗ) p-n перехода. Это значительно меньше толщины эпитаксиального слоя, который может быть выращен до 260 мкм. Наилучшие спектрометрические характеристики при комнатных условиях наблюдались у детекторов 1- и 2-й группы с низкой концентрацией свободных носителей заряда и высокой эффективностью сбора заряда близкой к 100%.

На **рис. 1** представлен участок спектра трехкомпонентного альфа-источника (²³³U, ²³⁹Pu, ²³⁸Pu), полученный с использованием арсенид-галлиевого детектора I группы. Сплошные линии на этом рисунке и на врезке соответствуют измерениям в вакууме при температуре жидкого азота. Пунктирные линии соответствуют условиям комнатной температуры. Смещение спектра при охлаждении детектора на 8 каналов связано с увеличением среднего значения

потенциала ионизации при охлаждении. Энергетическое разрешение пиков альфа источника составляет 10–12%.

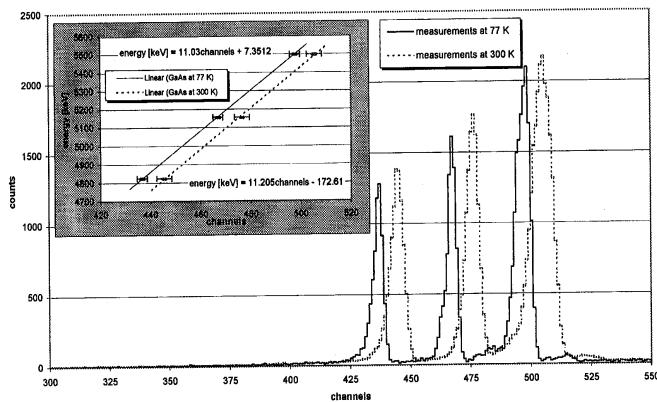


Рис. 1.

Число событий

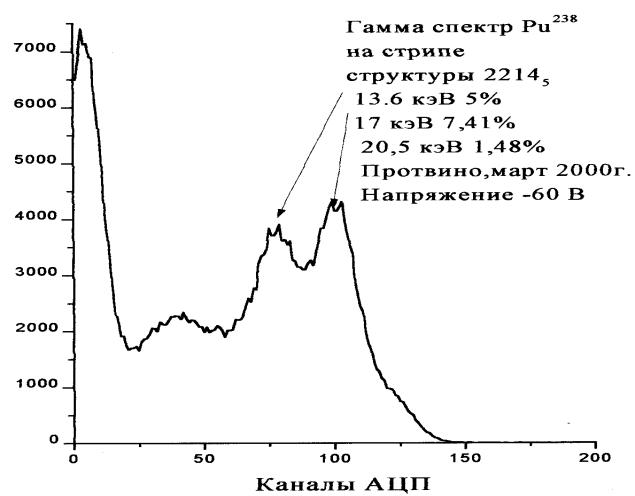


Рис. 2.

Измеренные на микрополосковом детекторе, изготовленном на материале **II группы**, амплитудные спектры при воздействии излучения от гаммаисточника ^{238}Pu (рис. 2), показывают высокое энергетическое разрешение для пиков с энергией 13,6 и 17 кэВ. Энергетическое разрешение оказалось меньше 1,6 кэВ, что при комнатной температуре удавалось ранее получать только на уникальных образцах GaAs детекторов.

На эпитаксиальных структурах р-типа (**III группа**) не удалось выделить амплитудные пики от γ - , β - и даже α - источников из-за большого уровня шумов. Это обстоятельство обусловлено рядом причин. Данные структуры характеризуются большим значением низкочастотной емкости диодов, большой плотностью обратных токов, ООЗ р-п перехода значительно удалена от верхнего р⁺ контакта, р-п переход располагается вблизи границы с подложкой, где и локализуется электрическое поле при подаче обратного напряжения смещения. Растигнуть ООЗ на всю толщину высокоомного р-слоя так же, как и в предыдущих структурах, не удается из-за высокой концентрации примесей $N \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Выше было показано, что полупроводниковые структуры на основе чистых эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных из газовой фазы, обладают высокой чувствительностью к α - , β - , γ -излучениям и могут быть использованы для создания спектрометрических и координатных детекторов. Существенным недостатком детекторов на основе эпитаксиальных слоёв является малая толщина чувствительной области, которая ограничивается шириной области объемного заряда (ООЗ) р-п перехода и не превышает 40 мкм, что значительно ниже толщины эпитаксиального слоя, который может быть выращен методом газофазовой эпитаксии (до 260 мкм). В диссертации приведены результаты исследования эпитаксиальных детекторов с увеличенной толщиной чувствительной области путем формирования р-i-п структур, в которых высокоомный i-слой создается методом диффузии хрома в эпитаксиальные слои n-типа проводимости. Преимуществом таких детекторных структур перед аналогичными структурами на основе слиточного арсенида галлия, которые будут рассмотрены в последующих главах, является более высокая степень чистоты и кристаллического совершенства эпитаксиального материала, что оказывает положительное влияние на параметры GaAs детекторов.

Детекторы, изготовленные на этом материале, чувствительны к α - β - γ -излучению с высокой эффективностью сбора заряда (ССЕ). Для α -частиц ССЕ, при напряжении смещения 400–500 В, составляет $\sim 70\%$, для β -излучения ~ 60 – 70% , для γ -фотонов (59,5 кэВ) $\geq 90\%$. Толщина чувствительной области р-i-п диода близка к толщине высокоомного i-слоя. Максимальная толщина чувствительной области около 260 мкм. Однако спектрометрические характеристики детекторов оказались значительно хуже, чем у чистых эпитаксиальных детекторов.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования характеристик детекторов, изготовленных на основе арсенида галлия, получаемого в результате эпитаксиального роста из жидкой фазы [П21, П34, П47]. Показаны пути решения проблемы увеличения толщины чувствительной области до значений более 100 мкм и способы управления свойствами таких структур. Приведены результаты сопоставительного анализа характеристик толстых высокоомных слоев при использовании двойного легирования из расплава оловом и хромом, в которых сформировано распределение напряжённости электрического поля, близкое к однородному.

Применение методов жидкофазной эпитаксии для выращивания слоев арсенида галлия расширяет возможности управления рядом параметров таких, как величина подвижности и время жизни носителей заряда, а также распределением удельного сопротивления и напряженности электрического поля по толщине слоя. Кроме того, эпитаксиальный арсенид галлия характеризуется большей воспроизводимостью параметров.

Однако в этом материале не удавалось увеличить толщину чувствительной области выше 60–80 микрон.

Показано, что для увеличения толщины чувствительной области необходимо поднять удельное сопротивление эпитаксиального арсенида галлия. Для этого было использовано одновременное легирование расплавов эпитаксиального арсенида галлия мелкой донорной примесью олова и глубокой акцепторной примесью хрома, при которой происходит компенсация мелких донорных примесей и превращение арсенида галлия в высокоомный материал. При этом в одном процессе можно получить высокоомные слои до 150–220 микрон. Для получения больших толщин процесс повторяется несколько раз. При соответствующем подборе условий выращивания удается избежать больших скачков величины удельного сопротивления на границах многослойных структур.

Распределение плотности объемного заряда и напряженности электрического поля (**рис. 3**) по толщине детекторной структуры выглядит более сложными, чем в идеальном p-i-n диоде из-за высокой концентрации атомов доноров и акцепторов.

При отсутствии внешнего напряжения в данной детекторной структуре существуют четыре области пространственного заряда:

1. Область отрицательного заряда акцепторов Zn^- в p-слое, выращенном газофазной эпитаксией.
2. Область положительного заряда доноров Sn^+ в i-слое у границы с p-слоем (проведенные оценки показывают, что концентрация заряженных отрицательных ионов Cr^- в этой области должна быть малой).

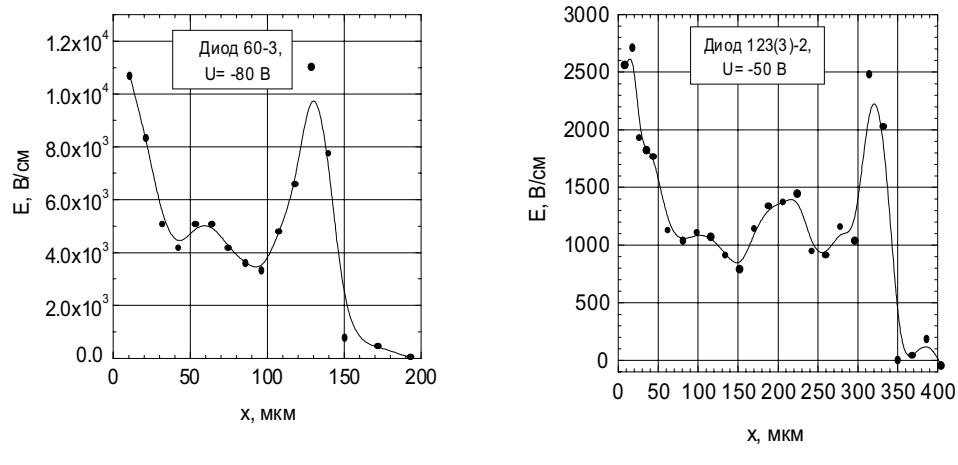


Рис. 3. Распределения напряженности электрического поля в однослойных (а) и трехслойных (б) детекторных структурах.

3. Область отрицательного заряда в i-слое у границы с подложкой из n-GaAs. (В этой области $N_{\text{Cr}}^- > N_{\text{Sn}}^+$).

4. Область положительного заряда доноров Te^+ или Sn^+ в n-подложке.

В работе показано, что распределение напряженности электрического поля по толщине многослойных структур неоднородно – максимумы напряженности примыкают к p-i, либо к i-n-переходам. Тем не менее, в i-области существует электрическое поле достаточно высокой напряженности.

Емкость большинства p-i-n-диодов довольно слабо зависит от величины приложенного обратного смещения. При увеличении частоты модуляции измерительного сигнала емкость слабо уменьшается. В диапазоне частот 100 Гц ÷ 1 МГц это изменение, как правило, не превышало 50%. Отношение емкостей $C(1 \text{ кГц})/C(1 \text{ МГц})$ находится в интервале 1÷1,2. Можно отметить, что толщина d_0 слоя «диэлектрика», рассчитанная по емкости, измеренной на частоте 1 МГц, хорошо совпадает с толщиной d_1 высокоомного i-слоя диода, определенной другими методами.

Детекторы чувствительны ко всем типам излучений. В спектрах разрешаются пики α -частиц двухкомпонентного плутониевого источника ^{238}Pu & ^{239}Pu со средней энергией 5,487 и 5,101 МэВ. Хорошо виден пик от бета-частиц при облучении детекторов частицами от источника ^{90}Sr . Вместо хорошо выраженного пика, соответствующего гамма-квантам с энергией 59,5 кэВ от источника ^{241}Am , имеется пологое плечо. Такая форма спектра обусловлена тем, что дрейфовая длина дырок в слое во много раз меньше дрейфовой длины электронов, т.е. детекторы этого типа в основном собирают электроны. Это же показали исследования эффективности сбора заряда для бета- и альфа-частиц.

Исследования показали, что величина эффективности сбора заряда (ССЕ) существенно зависит от характера распределения напряженности электрического поля внутри i-области детекторов. Особенно сильно эта зависимость проявлялась в детекторах с двух- или трехслойной i-областью толщиной 300÷400 мкм. Диоды, изготовленные на основе тех структур, в которых наблюдались значительные скачки удельного сопротивления на границах между слоями, имели эффективности сбора заряда ниже 15%. В то же время при оптимизации профилей удельного сопротивления и напряженности электрического поля внутри i-области высокие значения эффективности сбора заряда сохраняются до толщины высокоомной i-области 400 мкм.

Спектральное энергетическое разрешение детекторов зависит от однородности параметров высокоомного слоя вдоль поверхности эпитаксиальной структуры. По этой причине детекторы на основе слоев, выращенных в контейнере пенального (сдвигового) типа и имеющих

неоднородность толщины, показали в среднем худшее спектральное разрешение. В то же время диоды на основе слоев, выращенных в поршневом контейнере и обладающих лучшей однородностью по площади, показывают хорошее спектральное разрешение даже при большой толщине высокоомной i-области.

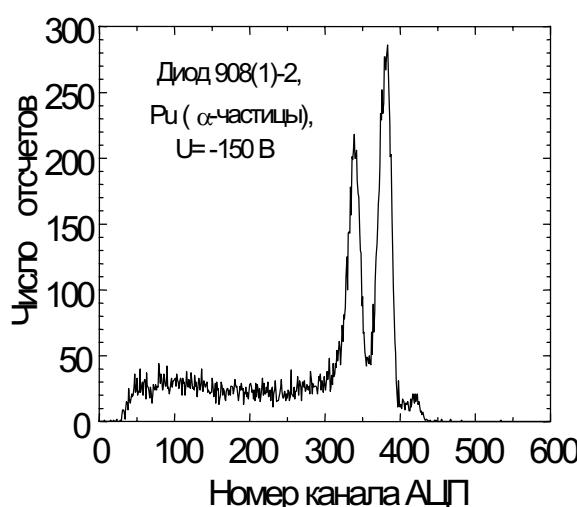


Рис. 4.

В качестве примера на **рис. 4** показан амплитудный α -спектр p-i-n-диода с толщиной i-области, равной 400 мкм. Измерения проведены при комнатных условиях на воздухе (без вакуумирования). Как видно из рисунка, при напряжениях 100÷150 В в спектре разрешаются полосы от α -частиц с различной энергией, испускаемых двухкомпонентным плутониевым источником ^{238}Pu & ^{239}Pu со средней энергией 5,487 и 5,101 МэВ соответственно. Однако при напряжении смещения, превышающем 200 В, спектральное разрешение обычно ухудшается.

Для исследования вклада дырок в сбор заряда в высокоомных слоях i-GaAs:Sn,Cr были изготовлены диоды со структурой p-i, облучение которых проводилось α -частицами со стороны i-области, находящейся под положительным потенциалом. В этих условиях основной вклад в сбор заряда должны давать дырки, дрейфующие к p-области детекторов. Эффективность сбора заряда таких диодов оказалась не выше 1%. Это свидетельствует о том, что основной вклад в сбор заряда в эпитаксиальных слоях i-GaAs:Sn,Cr дают электроны, дырки же практически не участвуют в сборе заряда.

В **четвертой главе** диссертации обобщены результаты разработки и исследования детекторов на основе «ростового» арсенида галлия, компенсированного специально введенной примесью хрома. Рассмотрены характеристики детекторов, приведены результаты испытаний нескольких конструкций детекторов барьерного и резистивного типа.

В главе обсуждаются характеристики детекторов, изготовленных из компенсированного хромом «ростового» арсенида галлия [П1–П8, П35]. В основе технологии этих детекторных структур лежит прецизионное легирование исходного электронного GaAs с концентрацией носителей $n_0 = N_d \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ специально введенной примесью Cr до концентрации $N_{Cr} > N_d$. Управляемое неоднородное распределение хрома по толщине пластины исходного GaAs позволяет формировать последовательно на низкоомной подложке высокоомный слой, включающий π -, n -области и область объемного заряда (ООЗ) между ними. Схематически вид такой детекторной структуры, распределение примесей в ней и ее энергетическая диаграмма представлены на **рис. 5**, где N_t – концентрация акцепторов с глубокими энергетическими уровнями, N_d – концентрация доноров с мелкими энергетическими уровнями. Вариацией параметров исходного GaAs и технологических условий изготовления управляемо изменяются электрические характеристики высокоомных слоев.

π -область – это высокоомная область арсенида галлия, имеющая дырочный тип проводимости, так как выполняется соотношение концентраций $N_t > N_d$. Условия компенсации таковы, что электроны с донорных центров захватываются на глубокие центры, а некомпенсированная часть центров $N_t - N_d$ взаимодействует с электронами из валентной зоны. Когда электрон из валентной зоны захватывается на пустой глубокий центр, в валентной зоне появляется

дырка, определяющая тип и уровень проводимости. Удельное сопротивление π -слоя управляемо варьируется в пределах $10^6 \div 10^9$ Ом·см.

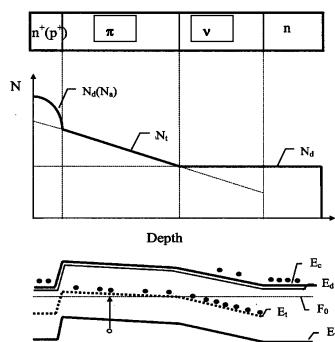


Рис. 5.

v -область – это высокоомная область GaAs, имеющая электронный тип проводимости, так как в этой области выполняется соотношение концентраций $N_d > N_t$. При этом все глубокие центры заполняются электронами с донорных центров и концентрация электронов в зоне проводимости $n = N_d - N_t$. Изменением легирующих концентраций N_d, N_t можно варьировать удельное сопротивление v -слоя в пределах $10 \div 10^4$ Ом·см.

Область объемного заряда занимает часть π - и v -слоев.

Сформированные таким образом детекторные структуры обладают следующими характеристиками: толщина высокоомного слоя при одностороннем легировании может достигать 400 микрон; электрическое поле в детекторах с π - v переходом локализовано вблизи границы между π - и v -областями и максимум напряженности электрического поля соответствует положению ООЗ перехода; даже при самых больших напряжениях смещения это поле не перекрывает область больше 200 мкм.

На примере взаимодействия π - v - n структур с минимально ионизирующими частицами (МИР), в качестве которых были взяты электроны от радиоактивного источника ^{90}Sr , изучены закономерности транспорта и сбора заряда в ионизационном треке. Концентрация электронно-дырочных пар от МИР в треке составляет $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. При такой концентрации электрическое поле проникает в трек, и следует ожидать, что транспорт и сбор заряда из трека будет определяться дрейфом неравновесных носителей. Показано, что амплитудный спектр, полученный при регистрации МИР, хорошо описывается распределением Ландау для ионизационных потерь в тонком слое вещества. Анализ формы

импульса тока позволил установить, что быстрая компонента, оцененная по уровню 0,1–0,9 амплитуды, составляет 4–6 нс и связана со сбором неравновесных носителей через высокоомную область с максимальной дрейфовой скоростью. Сопоставление расчетной зависимости амплитуды регистрируемого заряда, получаемой в рамках дрейфовой модели, с экспериментальными данными показывает существенное расхождение, ставящее под сомнение применимость традиционной дрейфовой модели для анализа сбора заряда в π-v-n структурах. В частности, в области напряжений смещения < 200В, экспериментальное значение амплитуды заряда превышает расчетное в несколько раз.

Для объяснения природы наблюдаемых особенностей сбора заряда и выяснения природы высокой чувствительности π-v-n структур к ионизирующему излучению были выполнены эксперименты с использованием α-частиц от источника ^{241}Am . Полученные экспериментальные результаты однозначно показывают, что в ионизационном треке имеет место захват дырок на глубокие отрицательно заряженные центры хрома. Время захвата, оцененное из соотношения $\tau_p^- = 1/\sigma_p^- \cdot v_p \cdot N_{Cr}^-$, составляет $\sim 10^{-10}$ с, что значительно меньше времени дрейфа дырок через высокоомный слой с максимальной скоростью дрейфа, составляющей $\sim 10^{-8}$ с. Состояние глубокого центра с захваченной дыркой является долгоживущим. Среднее время нахождения захваченных дырок на глубоких центрах, определяемое вероятностью термополевой ионизации, даже при наличии высокой напряженности электрического поля в структуре составляет ≥ 1 с. Предложена физическая модель, и впервые показано, что высокая эффективность сбора заряда, наблюдаемая экспериментально в π-v-n структурах, связана с захватом неравновесных дырок на отрицательно заряженные центры хрома в высокоомном слое в пределах трека. Время жизни неравновесных электронов при этом будет ограничиваться временем захвата на нейтральные центры хрома (Cr^0), что составляет $10^{-6} - 10^{-7}$ с.

Анализ эффективности сбора заряда при прохождении через детектор заряженной частицы (МПР) показывает, что сбор заряда не ограничивается узкой областью стационарного распределения напряженности электрического поля (~ 200 мкм). С увеличением толщины высокоомного слоя собираемый заряд увеличивается, при этом наклон зависимости $Q(E_{av})$ при фиксированном поле сохраняется. Размер стационарной области высокого поля $E_{av} > 1$ кВ/см (100–150 мкм) при этом не изменяется, и располагается она на границе высокоомный слой – подложка. Это означает, что заряд неравновесных электронов собирается со всей толщины высокоомной области независимо от формы стационарного распределения напряженности электрического поля. Это происходит из-за того, что как только неравновесные электроны в треке начинают смещаться к аноду

под действием внешнего смещения, в треке вблизи катода остается нескомпенсированный положительный объемный заряд доноров, появившийся вследствие захвата дырок на глубокие центры Сr. Нарушение электронейтральности вблизи катода в треке приводит к перераспределению внешнего напряжения смещения между ООЗ и треком, поддерживая в нём достаточно высокую напряженность электрического поля. Эта напряженность электрического поля в треке оказывается достаточной для дрейфа электронов с высокой скоростью и обеспечения близкой к 100% эффективности сбора электронов при пересчете на всю толщину высокоомной области.

Изучены закономерности, связывающие величину заряда, образованного прохождением МИР частицы в π - n - p структуре, с усредненной напряженностью электрического поля в структуре, толщиной и степенью компенсации высокоомного слоя, типом проводимости контактного слоя. Полученные экспериментальные результаты подтверждают предложенный механизм сбора заряда. При напряженности электрического поля >10 кВ/см эффективность сбора заряда $\eta(E_{av})$ независимо от степени компенсации, толщины высокоомного слоя и типа контактов всегда достигает $\eta(E_{av}) \cong (50-60)\%$, означающего с учетом захвата дырок, что из трека собирается $\sim 100\%$ неравновесных электронов.

На базе материала с π - n - p структурой разработаны радиационностойкие быстродействующие микрополосковые детекторы для современной физики высоких энергий с эффективностью регистрации $\sim 100\%$ релятивистских заряженных частиц, эффективностью сбора заряда $\cong 60\%$ и соотношением сигнал/шум, близким 10. Исследованы единичные образцы детекторов, представляющие собой интегральную схему, имеющую размеры (50x50x 0,3) мм³, вдоль наибольшей стороны которых сформированы 384, либо 1024 элемента с шагом 150 или 50 мкм соответственно, каждый из которых содержит автономную RC цепочку для подачи напряжения смещения и съёма информации на предусилитель. Микрополосковые детекторы позволяют проводить амплитудный анализ. На пучке ускорителя было получено координатное разрешение ~ 14 мкм. Представлены результаты испытаний детекторов на пучках частиц ускорителя ИФВЭ и ЦЕРН. Экспериментально показано, что существенным преимуществом созданных координатных детекторов на основе высокоомных GaAs структур с глубокими центрами по сравнению с традиционными кремниевыми и другими GaAs аналогами является их более высокая радиационная стойкость.

Детекторные структуры с π - n переходом, рассмотренные выше в данной главе, имеют область чувствительности не более 200 мкм, что вполне достаточно для определения координат треков заряженных частиц, но крайне мало для эффективной регистрации фотонов. Это связано с тем, что рабочая толщина, в которой существует электрическое поле, ограничивается областью объемного

заряда (ООЗ). Поскольку арсенид галлия в силу технологических причин невозможно получить с низкой концентрацией остаточных примесей, то в барьерах структурах невозможно получить ширину ООЗ, превышающую 200–250 мкм.

Анализируя результаты, мы пришли к выводу, что единственным решением проблемы может быть получение арсенида галлия с удельным сопротивлением, близким к собственному материалу, и формирование детекторной структуры резистивного типа, в которой падение напряжение на контакте металл–полупроводник было бы пренебрежимо мало.

Было показано, что при достижении равномерной компенсации хромом всей толщины материала можно сформировать структуры i-типа, с толщиной чувствительной области больше 1 мм. При этом удельное сопротивление материала достигает предельных значений для GaAs – 10^9 Ом·см и равномерно распределено по толщине детектора. Можно было ожидать при этом, что распределение электрического поля будет однородным, что и подтвердили измерения распределения потенциала, выполненные методом точечного зонда вдоль свежеприготовленного скола детекторной структуры. Детекторы имеют линейные симметричные вольтамперные характеристики вплоть до полей 10 кВ/см.

По другим параметрам структуры резистивного типа повторяют ранее рассмотренные характеристики структур с π - v переходом. Так же, как и в структурах с π - v переходом, в резистивном материале возрастают времена жизни носителей заряда. В детекторах регистрируется в основном электронная компонента сигнала.

Спектры фотонов от источника ^{241}Am для разных напряжений смещения (рис. 6) имеют характерную форму для сигналов с поглощением и испусканием носителей заряда ловушками.

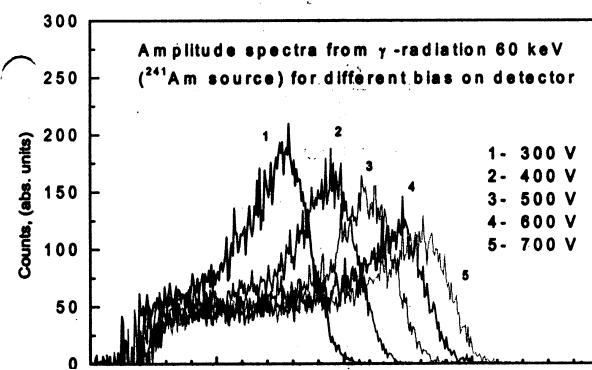


Рис. 6.

Из приведённой зависимости следует, что эффективность регистрации фотонов, определяемая по площади распределений амплитудных спектров, перестает возрастать при напряжениях смещения выше 200 В.

На рис. 7 приведены полевые зависимости эффективности сбора заряда в детекторе резистивного типа для различных частиц. Различия в эффективностях сбора заряда обусловлены спецификой взаимодействия каждого типа излучения с материалом детектора.

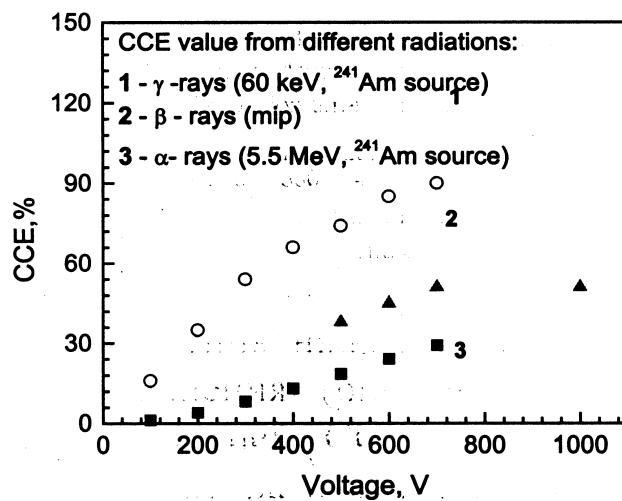


Рис. 7.

Так, средний пробег α -частиц с энергией 5,5 МэВ в GaAs составляет около 22 мкм, при этом образуется трек с диаметром 0,5–1 мкм, заполненный электронно-дырочной плазмой с концентрацией $\sim 10^{18}$ см⁻³. Высокая плотность носителей заряда в треке приводит к увеличению времени сбора заряда, по сравнению с предсказаниями дрейфовой модели, так как при данной концентрации носителей глубина проникновения внешнего поля в плазму меньше линейных размеров плазменного трека. Длительность сигнала с детектора при этом увеличивается на величину времени существования плазмы ($t_{пл}$), т.е. на время от момента пролета частицы до момента распада плазменного состояния, когда все генерированные частицей носители заряда включаются в движение под действием электрического поля. Для оценки времени $t_{пл}$ может быть выбрана модель, основанная на амбиполярной диффузии при истекании носителей из трека цилиндрической геометрии, посредством тока, ограниченного пространственным зарядом:

$$t_{пл} = \{3Q_0q_en_lA/32\pi^3\mu(\epsilon\epsilon_0)^2D_a^2\}^{1/3}E^{-1},$$

где Q_0 – полный заряд, образовавшийся в результате ионизации; q_e – элементарный электрический заряд; n_l – линейная плотность генерированного заряда; μ – подвижность носителей заряда; $\epsilon\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость; D_a – коэффициент амбиполярной диффузии; A – начальная площадь торцевой поверхности трека; E – напряженность электрического поля.

Оказалось, что для нового материала время жизни плазмы составляет $30\div50\%$ от времени жизни электронов, и рекомбинация носителей заряда в течение этого времени вносит существенный вклад в уменьшение эффективности сбора заряда.

Этот вывод подтверждается аналитическими расчетами транспорта зарядовых пакетов в полупроводниковой структуре резистивного типа, выполненными нами с использованием математической модели приближения слабого и сильного электрического поля, [П18, П27, П28, П30, П31, П37, П42, П46]. Вычисления показывают, что процесс разделения носителей заряда в GaAs детекторе сильно зависит от плотности электронно-дырочных пар, образующихся в результате взаимодействия ионизирующей частицы с материалом детектора. Для малой плотности пар разделение зарядов происходит по всей протяженности поля, тогда как при большой начальной плотности происходит понижение поля внутри трека и затягивание процесса разделения зарядов во времени.

Кроме того, процесс разделения носителей заряда сильно зависит от напряженности электрического поля. Так, при напряженности поля $E = 10$ кВ/см электронная компонента от конверсии фотона исчезает через $t = 300$ пс, для $E = 5$ кВ/см время дрейфа электронов возрастает до 600 пс, а для $E < 0,5$ кВ/см амплитуда отклика детектора минимальна.

При наличии центров захвата носителей заряда процесс разделения зарядов и процесс захвата определяются силой электрического поля. Для фотонов процесс захвата как электронов, так и дырок существенен вблизи точки конверсии. Электроны наиболее сильно захватываются на границе детектора, тогда как дырки – по всему пути их движения.

В работе представлены результаты разработки и исследования координатных детекторов, изготовленных из структур резистивного типа на компенсированном хромом арсениде галлия [П19, П22, П32, П38, П41], прежде всего для детекторов, предназначенных для работы с рентгеновскими аппаратами сканирующего типа. Исследована работоспособность детекторов с источниками рентгеновского излучения в токовом режиме (в режиме суммирования амплитуд сигналов).

Зависимости выходного сигнала от дозы линейны при изменении тока на рентгеновской трубке от 5 до 80 мА, при напряжении на трубке 80 кВ, и это остаётся справедливым при изменении темпа дозовой нагрузки на два порядка в интервале напряжений от 60 до 120 кВ. В детекторе заметны миллисекундные переходные процессы при «включении» и «выключении» рентгеновского

излучения. При этом отклонение амплитуды сигнала составляет несколько процентов. Возможно, что эти процессы могут быть обусловлены перезарядкой глубоких центров. Выходной сигнал имеет несимметричную форму и сильно зависит от полярности приложенного напряжения смещения. Этот факт связан с тем, что в детекторе собираются только электроны, поэтому амплитуда выходного сигнала будет изменяться в зависимости от места поглощения гамма-квантов.

В пятой главе диссертации представлены экспериментальные результаты, характеризующие радиационную стойкость детекторов на основе компенсированного хромом арсенида галлия при воздействии на них большой интенсивности потоков нейтронов, протонов и пионов. Рассматривается возможность и механизм восстановления характеристик облученных GaAs детекторов методами термического отжига [П4, П10–16, П36]. Показано, что радиационная стойкость π - v - n структур значительно превышает радиационную стойкость традиционных детекторов на основе полуизолирующего арсенида галлия, что связано с примесным экранированием радиационных повреждений. Экспериментально установлено, что работоспособность в радиационных полях и эффективность сбора заряда легированных детекторов обратно пропорциональна плотности потока частиц облучения. Показано, что это связано с изменением зарядового состояния глубоких центров хрома в треке.

Предложена физическая модель, которая показывает, что при больших потоках частиц в пучке в структуре имеет место реакция $N_{Cr}^- + p \rightarrow N_{Cr}^0$, и происходит постепенная, полная перезарядка глубоких примесных центров в π - v - n структуре. Как следствие, деформируется распределение напряженности электрического поля в структуре, что приводит к снижению напряжения пробоя и ускоренной деградации π - v - n структур. Обнаружено, что при облучении высокоэнергетическими частицами эффективность сбора заряда может быть повышена за счет компенсации радиационных дефектов и дополнительной компенсации материала в высокоомной и низкоомной частях детектора. Исследовано восстановление характеристик детекторов при термическом отжиге, и показано, что методами радиационной технологии (облучением и термическим отжигом облученных структур) может быть существенно увеличена эффективность сбора заряда.

В заключении к диссертационной работе сформулированы основные результаты и выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обобщены результаты систематических исследований детекторов ионизирующих излучений, разработанных с участием автора, на основе компенсированного арсенида галлия, с использованием трех методов выращивания детекторного материала: высокотемпературной диффузии,

жидкофазовой и газофазовой эпитаксии. Проведена систематизация параметров детекторных структур, полученных различными технологическими методами, при изменении в широких пределах соотношения концентраций атомов мелких (донорных и акцепторных) примесей и примеси с глубокими энергетическими уровнями (Сr) в кристалле.

Предложены оригинальные технологии, позволяющие управляемо в широких пределах изменять свойства и параметры детекторного материала в зависимости от области его применения, характера и сложности решаемых задач. Показано, что наиболее перспективным является диффузионный метод создания высокоомного арсенида галлия, легированного хромом, и получения на нем детекторных структур, так как он позволяет в наиболее широких пределах изменять условия легирования, получать детекторные структуры как барьерного, так и резистивного типов.

Разработана оригинальная технология, позволившая впервые в мире воспроизводимо получать детекторные структуры с толщиной высокоомного слоя от десятков микрон до 1000 мкм и выше, с предельно высоким удельным сопротивлением (до $1 \cdot 10^9$ Ом·см), большим временем жизни неравновесных носителей заряда в треке регистрируемой частицы. Экспериментально показано, что структуры, полученные диффузионным методом, могут быть использованы в качестве высокoeffективных координатных детекторов в режиме счёта единичных квантов рентгеновского и γ -излучения, а также единичных α - и β -частиц от радиоактивных источников и частиц высоких энергий от ускорителей.

Разработана оригинальная технология выращивания в системе GaAs:Sn,Cr методом жидкофазной эпитаксии слоёв полуизолирующего арсенида галлия детекторного качества. Установлено, что полученные эпитаксиальные слои характеризуются несколько меньшим значением удельного сопротивления в сравнении с диффузионной технологией, достигающим $\rho = (2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^9)$ Ом·см. Построена физическая модель, и показано, что это различие обусловлено более высокими концентрациями легирующих примесей (Sn,Cr) и заряженных точечных дефектов в диффузионных слоях, обусловленными более высокими температурами выращивания кристалла и диффузионного отжига. Это приводит к меньшим значениям подвижности и времени жизни носителей заряда.

Управляемость процессов роста высокоомных эпитаксиальных слоев, позволяет выращивать в одиночном процессе слои толщиной 170÷220 мкм, а при наращивании в 3 последовательных процессах толщина чувствительной области достигает 420÷500 мкм. Разработаны конструкции p-i-n-детекторов с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля по толщине i-области эпитаксиальных структур с максимумом в области i-n-перехода. Показано, что высокоомный эпитаксиальный слой имеет слабо выраженный p-тип проводимости, что ограничивает распределение

напряжённости электрического поля областью объёмного заряда электронно-дырочного перехода, образующегося вблизи границы плёнки с подложкой. Установлено, что, в случае выращивания многослойной высокомомной области на однородности распределения напряженности электрического поля оказывается влияние металлургических границ между отдельными слоями i-GaAs:Sn,Cr. В то же время, судя по результатам анализов амплитудных спектров, высокие значения эффективности сбора заряда достигаются в эпитаксиальных структурах при меньших значениях напряженности поля в активной области, что свидетельствует о большем времени жизни неравновесных носителей заряда в эпитаксиальных слоях GaAs:Sn,Cr.

Разработан ряд конструкций детекторов, изготовленных на основе жидкофазных эпитаксиальных p-i-n-структур, и исследованы их электрические и электрофизические характеристики. Установлено, что величина обратного тока ограничивается барьером i-n-перехода, благодаря чему получены p-i-n-диоды с низкой плотностью темнового тока $j(-100\text{ В}) = 1 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$, что в несколько раз меньше, чем у диффузионных структур. При работе детекторов малые значения обратного тока облегчают условия согласования с электронной усилительной схемой, поскольку позволяют обойтись без схем согласования либо компенсации темнового тока. Установлено, что именно благодаря присутствию i-n-перехода в эпитаксиальных структурах в некоторых случаях наблюдается внутреннее усиление сигнала. Так, в отдельных детекторах наблюдался сбор заряда выше 100% (вплоть до 300%), что может явиться самостоятельным исследованием и открывает перспективы создания радиационностойких детекторов с внутренним усилением.

Установлено, что детекторы на основе жидкофазных эпитаксиальных структур характеризуются лучшими спектрометрическими свойствами по сравнению с диффузионными структурами при одинаковой толщине активной области, что связано с более высокими значениями времени жизни неравновесных электронов и дырок в эпитаксиальных слоях.

Разработаны и предложены оригинальные структуры, получаемые с помощью технологии газофазной эпитаксии, которые могут быть сформированы как на основе нелегированных эпитаксиальных слоев GaAs, так и в процессе диффузии хрома в газофазные эпитаксиальные слои.

Показано, что детекторы на основе эпитаксиальных структур, выращенных из газовой фазы, обладают квантовой чувствительностью к α -, β -, γ -излучению и высокой эффективностью сбора заряда. Отличительной особенностью детекторов является их работоспособность при нулевом напряжении смещения, хорошее энергетическое разрешение и близкая к 100% эффективность сбора заряда при относительно небольшом напряжении смещения 15–20 В, что соответствует напряженности электрического поля ~5 кВ/см. Энергетическое разрешение при воздействии γ -частиц составляет 15–30%. Эпитаксиальные

структуры, выращенные из газовой фазы, наиболее перспективны для создания спектрометрических детекторов на арсениде галлия. Толщина чувствительной области детекторов на основе чистых эпитаксиальных слоев ограничивается толщиной области объемного заряда p-n перехода и не превышает 40 мкм. Увеличить толщину чувствительной области эпитаксиальных структур удалось путем формирования p-i-n структур, в которых высокоомный i-слой создается методом диффузии хрома в эпитаксиальные слои n-типа, легированные серой ($n=(0,7-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Максимальная толщина чувствительной области в исследованных p-i-n диодах достигает 260 мкм. Плотность обратного тока при напряжении -100 В для большинства диодов составляет $\sim(1,4-5) \cdot 10^7 \text{ А/см}^2$.

Таким образом, предложены и исследованы три оригинальных технологических метода (диффузионный, жидкокристаллический и газофазной эпитаксии) создания детекторных структур, каждый из которых имеет свои достоинства. Они взаимно дополняют друг друга в части создания различных типов детекторов и позволяют расширить области применения детекторов на основе компенсированного арсенида галлия.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.П. Воробьев, В.А. Сергеев, А.В. Смоль, Ю.П. Цюпа, В.Б. Чмиль, А.В. Чунтонов, А.И. Гордиенко, О.Б. Корецкая, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, С.С. Хлудков, “Поиск арсенидов галлиевых структур для создания координатно-чувствительных детекторов”, Препринт ИФВЭ 91-192,ОНФ, Протвино 1991.
2. А.П. Воробьев, В.Б. Чмиль, А.В. Чунтонов, А.В. Корецкий, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, С.С. Хлудков, “Исследование GaAs структур со встроенным π-ν переходом для создания координатно-чувствительных детекторов”, Препринт ИФВЭ 92-168, ОНФ, Протвино 1992; Журнал Технической Физики т64 в3 стр.73-91, 1994.
3. V.B. Chmilla, A.V. Chuntonov, V.A. Sergeev, A.V. Smol, Yu.P. Tsypa, A.P. Vorobiev, S.S. Khludkov, A.V. Koretski, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, “Exploration of GaAs structures for solid-state detectors”, Preprint IHEP 92-59 ОНФ, Protvino, 1992; Nucl. Instr. and Meth., v.A326 (1993) p.310-312.
4. V.B. Chmilla, A.V. Chuntonov, A.P. Vorobiev, S.S. Khludkov, A.V. Koretski, A.I. Potapov and O.P. Tolbanov, “Exploration of GaAs structures with π-ν junction for coordinate sensitive detectors”, Nucl. Instr. and Meth., v.A340, (1994) p.328-340.
5. А.П. Воробьев, А.В. Смоль, В.Б. Чмиль, А.В. Чунтонов, А.В. Корецкий, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, С.С. Хлудков, К.М. Смит, « Первые результаты

испытаний арсенид галлиевых микрополосковых детекторов», Препринт ИФВЭ 95-96 ОНФ, 1995

6. V.B. Chmill, A.V. Chuntonov, S.S. Khludkov, A.A. Koretski, A.I. Potapov, K.M. Smith, A.V. Smoll, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev, "Radiation Hard Microstrip Gallium Arsenide Detectors", Proceedings of 3-d International Workshop on Gallium Arsenide and Related Compounds", San Mineato, Tuscany, Italy, 21-24 March 1995.
7. V.B. Chmill, A.V. Chuntonov, A.V. Smoll, A.P. Vorobiev, S.S. Khludkov, A.A. Koretski, A.I. Potapov, K.M. Smith, O.P. Tolbanov, "Radiation hard microstrip detectors based on gallium arsenide", Nucl. Instr. and Methods A379(1996)p.406-408.
8. Г.И. Айзенштат, А.П. Воробьев, О.Б. Корецкая, Л.С. Окаевич, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, С.С. Хлудков, «Координатные микрополосковые детекторы на основе арсенида галлия», ISSN 0207-6357 Электронная промышленность, т.1-2(1998)стр.102-106.
9. V. Chmill, A. Chuntonov, A. Kholodenko, A. Vorobiev, Yu. Tsypa, L. Porokhovnichenko, A. Potapov, O. Tolbanov, L. Okaevich, W. Klamra, Investigation of epitaxial GaAs charged particle detectors, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res., 1999, v.A438, p.362-367.
10. Воробьев А.П., Корецкий А.В., Крупный Г.И., Потапов А.И., Расцветалов Я.Н., Толбанов О.П., Хлудков С.С., Чмиль В.Б., Чунтонов А.В., "Радиационная стойкость GaAs структур со встроенным π - n переходом", Препринт ИФВЭ 93-95, Протвино, 1993, 20стр.
11. Chmill V.B., Chuntonov A.V., Khludkov S.S., Koretsky A.V., Potapov A.I., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., "Radiation Hardness of Microstrip Detectors Fabricated in Tomsk", ATLAS Internal Note INDET-N108, 1995, 11pages,CERN.
12. Chmill V.B., Chuntonov A.V., Khludkov S.S., Koretsky A.V., Potapov A.I., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., "Radiation Resistance of GaAs structures based on π - n junctions", J.Phys..D.: Appl.Phys.,v28(1995)p559-564.
13. Chmill V.B., Chuntonov A.V., Khludkov S.S., Koretsky A.V., Potapov A.I., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., "Radiation resistance of GaAs structures", Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Research, v. A395(1997)p65-70.
14. Chmill V.B., Chuntonov A.V., Falaleev V.A., Smoll A.V., Khludkov S.S., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., " Results of GaAs detector irradiation at the mixed beam neutrino cave at CERN", Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Research, v. A410 (1998)p54-60.
15. Chmill V.B., Chuntonov A.V., Smoll A.V., Khludkov S.S., Koretsky A.V., Okaevitch L.S., Potapov A.I., Smith K.M., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., " Particle detector based on GaAs. Radiation hardness and spatial resolution", Nucl. Instr. and Meth. in Phys.Research, v. A409(1998)p247-250.
16. G.I. Ayzenstat, D.L. Budnitsky, O.V. Koretskaya, V.A. Novikov, L.S. Okaevitch, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev, "GaAs Resistor Structures for X-ray Imaging Detectors", Proceedings of 3rd International Workshop On Radiation Imaging Detectors, Sardinia (Italy), 23-27 September 2001.

17. Л.С. Окаевич, О.Б. Корецкая, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, А.П. Воробьев, « Детекторные структуры на основе GaAs, компенсированного Ср.”, Материалы 5-й Российской конференции по физике полупроводников, Нижний Новгород, 10-14 Сентября 2001 г.
18. G.I. Ayzenshtat, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev, “Modeling of processes of charge division and collection in GaAs detectors taking into account trapping effects”, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res., v. A466(2001)p.1-8.
19. Г.И. Айзенштат, А.П. Воробьев, О.П. Толбанов, “ Детектор ионизирующего излучения”, Патент на изобретение № 2229730 RU от 04.02.02.
20. G.I. Ayzenshtat, N.N. Bakin, D.L. Budnitsky, E.P. Drugova, V.P. Germogenov, S.S. Khludkov, O.B. Koretskaya, L.S. Okaevich, L.P. Porokhovnichenko, A.I. Potapov, K.M. Smith, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, M.D. Vilisova, A.P. Vorobiev.” GaAs structures for X-ray imaging detectors.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2001. – v.A466. – p.25-32.
21. D.L. Budnitsky, V.P. Germogenov, S.M. Guschin, A.A. Larionov, L.P. Porokhovnichenko, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev. “Epitaxial structures based on compensated GaAs for γ - and X-ray detectors.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2001. – v.A466. – p.33-38.
22. G.I. Ayzenshtat, V.G. Kanaev, A.V. Khan, A.I. Potapov, L.P. Porokhovnichenko, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev.” GaAs X-ray coordinate detectors.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2001. – v.A466. – p.162-167.
23. G.I. Ayzenshtat, M.V. Ardshev, D.L. Budnitsky, S.S. Khludkov, O.B. Koretskaya, V.A.Novikov, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev. ”Gallium arsenide structures for ionizing particles detectors.”, Proc. 3rd Nuclear and Particle Physics Conf. – Cairo, 2001. – p.364-373.
24. А.П. Воробьев, «Арсенид галлиевые детекторы для медицинской диагностики», Труды конференции « Научные исследования в наукоградах Московской области», Протвино, 6-7 декабря 2001г.
25. G.I. Ayzenshtat, D.L. Budnitsky, O.B. Koretskaya, V.A. Novikov, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev.” GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – v.A487. – p.96-101.
26. G.I. Ayzenshtat, D.L. Budnitsky, O.B. Koretskaya, V.A. Novikov, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev.” GaAs as a material for particle detectors.” Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – v.A494. – p.120-127.
27. G.I. Ayzenshtat, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev.” Modeling of processes of charge separation in a GaAs detector.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – v.A494. – p.199-204.
28. G.I. Ayzenshtat, M.V. Bimatov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev.” Charge collection in X-ray pixel detectors based on semi-insulating GaAs doped with Cr.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – v.A494. – p.210-213.

29. S.N. Golovnia, S.A. Gorokhov, Y.P. Tsupa, A.P. Vorobiev, O.B. Koretskaya, L.S. Okaevich, O.P. Tolbanov." Influence of cooling on the working parameters of GaAs detectors.", Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – v.A494. – p.223-228.
30. Г.И. Айзенштат, А.П. Воробьев, В.И. Кудрявцев, О.П. Толбанов. "Моделирование процессов разделения зарядов в детекторе на арсениде галлия.", Электронная промышленность. – 2002. - №1/2. – стр.20-25.
31. Г.И. Айзенштат, М.В. Биматов, А.П. Воробьев, О.П. Толбанов." Сбор заряда в детекторной матрице.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.26-28.
32. Г.И. Айзенштат, Е.Н. Ардашев, А.П. Воробьев, А.И. Иващенко, О.Б. Корецкая, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, А.В. Хан. "GaAs-детекторы изображений в рентгеновских лучах.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.32-36.
33. Г.И. Айзенштат, М.Д. Вилисова, А.П. Воробьев, Е.П. Другова, В.А. Новиков, Л.С. Окаевич, И.Ю. Полтавец, А.И. Потапов, Л.П. Пороховниченко, О.П. Толбанов, В.А. Чубирко. "Арсенид галлия, выращенный методом газофазной эпитаксии, и детекторы на его основе.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.40-45.
34. И.Ю. Байко, А.П. Воробьев, В.П. Гермогенов, С.М. Гущин, А.А. Ларионов, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, О.Г. Шмаков. "Детекторные структуры на основе арсенида галлия, выращенного методом жидкофазной эпитаксии.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.46-53.
35. С.С. Хлудков, О.Б. Корецкая, Л.С. Окаевич, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, А.П. Воробьев. "Детекторные π - n - p структуры на основе GaAs, легированного хромом.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.56-60.
36. А.П. Воробьев, О.Б. Корецкая, Л.С. Окаевич, А.И. Потапов, О.П. Толбанов, А.В. Тяжев, С.С. Хлудков. "Радиационная стойкость детекторных структур.", Электронная промышленность. – 2002. - №2/3. – стр.60-65.
37. Г.И. Айзенштат, М.В. Биматов, А.П. Воробьев, О.П. Толбанов. "Сбор заряда в координатных детекторах рентгеновского излучения на основе полуизолирующего GaAs, компенсированного хромом.", Мат. 8^о Росс. конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». – Томск, 2002. – стр.269-271.
38. Г.И. Айзенштат, С.М. Гущин, О.Б. Корецкая, О.П. Толбанов, Е.А. Бабичев, С.Е. Бару, В.Р. Грошев, Г.А. Савинов, А.П. Воробьев." Детекторы на основе полуизолирующего арсенида галлия для медицинских рентгеновских аппаратов.", Мат. 8^о Росс. конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». – Томск, 2002. – стр.275-277.

39. Г.И. Айзенштат, А.П. Воробьев, С.М. Гущин, Д.Ю. Мокеев, О.П. Толбанов. “Детекторный элемент с оптическим выводом информации на GaAs.”, Мат. 8^{ой} Росс. конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». – Томск, 2002. – стр.283-285.
40. С.М. Гущин, Г.И. Айзенштат, О.П. Толбанов, В.А. Воробьев.” Линейки светодиодов для визуализации сигналов детекторов ионизирующих излучений.”, Мат. 8^{ой} Росс. конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». – Томск, 2002. – стр.287-288.
41. G.I. Ayzenshtat, E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, G.A. Savinov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev. “GaAs Detectors for medical imaging.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. v.A509(2003)p268-273.
42. G.I. Ayzenshtat, M.V. Bimatov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev. “Charge collection in X-ray pixel detectors based on Si- GaAs doped with Cr.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. v.A509(2003)p52-55.
43. S. Golovnia, S. Gorokhov, Y. Tsiupa, A. Vorobiev, O. Koretskaya, L. Okaevich, O. Tolbanov. “Influence of cooling on the working parameters of GaAs detectors.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. v.A509(2003)p40-46.
44. A.V. Tyazhev, D.L. Budnitsky, O.B. Koretskaya, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, L.S. Okaevich, V.A. Novikov, A.P. Vorobiev. “GaAs radiation imaging detectors with active layer thickness up to 1 mm.”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. –v.509(2003)p34-39.
45. G.I. Ayzenshtat, D.L. Budnitsky, V.P. Germogenov, S.M. Guschin, O.B. Koretskaya, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev, A.P. Vorobiev.”GaAs for X-imaging and particle detectors.”, Abstr. XIIth Semicond. and Insulat. Materials Conf. – Smolenice Castle, 2002. – p.17 (be published in: IEEE Electr. Dev.).
46. Ayzenshtat G.I., Boldyrev E.M., Gubochkin A.M., Tolbanov O.P., Vorobiev A.P., “Method of the solution for the system of the differential equations and the modeling the processes of a charge carriers transport in gallium arsenide detectors”, Мат. 6-го Международного семинара «Наука и компьютерные технологии», Москва, 15-17 сентября 2003г.
47. G.I. Ayzenshtat, V.P. Germogenov, S.M. Gushin, L.S. Okaevich, O.G. Shmakov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev “ X-ray and γ -ray detectors based on GaAs epitaxial structures”, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. –v.531(2004)p97-102.
48. Г.И. Айзенштат, Д.В. Бородин, А.П. Воробьев, Ю.В. Осипов, Ю.В. Роднов, О.П. Толбанов, «Детектирующее устройство для регистрации радиационных изображений с использованием твердотельных ионизационных камер», Заявка на патент. Приоритет от 09.08.2004. Регистрационный номер № 2004124297.

Рукопись поступила 6 июня 2005 г.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.
Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 08.06.2005. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 2,17. Уч.-изд.л. 1,9. Тираж 100. Заказ 57. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т, 2005 –18, И Ф В Э, 2005
