

ОБЪЕДИНЕНИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



Кручинок Владимир Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ВЫСОКООМНОГО
АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ДЕТЕКТОРАХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ НА БУДУЩИХ ЛЕПТОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ**

Специальность: 01.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2021

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

Научный руководитель: **Госткин Михаил Иванович,**
кандидат физико-математических наук, Лаборатория
ядерных проблем ОИЯИ, Сектор №4 линейного
ускорителя НЭОВП, начальник сектора

Официальные оппоненты: **Воробьев Александр Павлович,**
доктор физико-математических наук, НИЦ
«Курчатовский институт» – ИФВЭ, главный
научный сотрудник

Каржавин Владимир Юрьевич,
доктор технических наук, Лаборатория физики
высоких энергий ОИЯИ, Сектор №2 торцевых
детекторов на CMS, начальник сектора

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:
<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations>.
С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической
библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного
совета ОИЯИ по ядерной физике
ОИЯИ.03.02.2019.П

доктор физ.-мат. наук

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы:

Полупроводниковые детекторы (ППД) широко применяются в физике высоких энергий для регистрации ядерных частиц и излучений. По сравнению с другими типами детекторов они обладают следующими преимуществами: высокими быстродействием, пространственным и энергетическим разрешением, относительно низкой стоимостью изготовления и эксплуатации. В результате использование ППД становится почти всегда выигрышным при построении систем регистрации ядерных частиц и гамма-излучения. Основное применение в физике высоких энергий ППД находят в построении трековых систем в непосредственной близости к области взаимодействий на коллайдерах и в экспериментах с неподвижной мишенью. На их базе создаются калориметрические и координатные подсистемы как для современных физических установок, например на большом адронном коллайдере LHC, так и для будущих коллайдеров ILC, FCC, CLIC, NICA и др.

Основным материалом для производства ППД является кремний – это самый распространенный, дешевый и всесторонне изученный материал. Кремниевые детекторы всевозможных конфигураций и размеров успешно применяются во всех крупных экспериментах в физике элементарных частиц. Тем не менее, несмотря на широкое распространение, кремниевые детекторы обладают и некоторыми недостатками, среди которых можно выделить недостаточно высокую радиационную стойкость. Облучение кремниевых детекторов приводит к росту обратного (темнового) тока и уменьшению соотношения сигнал/шум. Другим фактором, ограничивающим применение кремниевых ППД, является его относительно малый атомный номер ($Z = 14$), что приводит к низкой эффективности регистрации кремниевыми детекторами гамма-квантов с энергией выше нескольких десятков кэВ. Так, для кремниевого сенсора толщиной 1 мм, эффективность регистрации фотонов с энергией 30 кэВ не превышает 25 %.

Современные и перспективные детекторные установки на коллайдерах высокой светимости предъявляют повышенные требования к устойчивой работе ППД в условиях высоких радиационных полей. Для изготовления радиационно-стойких ППД ведется поиск новых полупроводниковых материалов и расширяется их применение. Например, высокую радиационную стойкость демонстрируют детекторы на основе алмаза и рубина. Однако первый, как и кремний, обладает низкой эффективностью регистрации гамма-квантов высоких

энергий, а для второго эффективность сбора заряда не превышает нескольких процентов. Большой интерес представляют так называемые бинарные полупроводники, такие как теллурид кадмия (CdTe , CdZnTe), иодид ртути (HgI_2), бромид таллия (TlBr), фосфид индия (InP), арсенид галлия (GaAs).

GaAs по сравнению с кремнием имеет большую плотность и атомный номер, благодаря чему детекторы из GaAs имеют на порядок большую эффективность регистрации гамма-квантов. В России работы по созданию детекторов из полуизолирующего арсенида галлия начались в конце прошлого века в лаборатории детекторов ионизирующего излучения Томского государственного университета. Разработана уникальная технология легирования атомами хрома эпитаксиальных слоев GaAs электронного типа проводимости. В результате компенсации глубокой акцепторной примесью хрома в кристаллах GaAs создаются либо полуизолирующие слои, либо барьерные переходы ($\pi\text{-v-n}$). Полученный материал имеет высокое удельное сопротивление ($\rho \geq 10^9 \text{ Ом}\times\text{см}$) и достаточное для полного сбора заряда ионизации время жизни электронов ($\tau_n \sim 10 \text{ нс}$). Разработанная технология производства сенсоров из компенсированного хромом арсенида галлия (GaAs:Cr) является уникальной в мире и позволяет изготавливать детекторы толщиной до 1 мм и площадью до 80 см^2 .

Предлагаемая к защите диссертация посвящена измерению радиационной стойкости новых детекторов из высокоомного GaAs:Cr и изучению возможности их применения в будущих экспериментах на лептонных коллайдерах, таких как ILC и CLIC. Ее **актуальность** обусловлена ростом применения новых полупроводниковых детекторов, в частности из арсенида галлия, в физике высоких энергий и медицине, отсутствием систематических исследований радиационной стойкости детекторов GaAs:Cr к облучению электронами, недостаточным объемом экспериментальных данных для прогнозирования поведения детекторов из GaAs:Cr при облучении электронами и быстрыми нейtronами. В ходе работы была выполнена энергетическая калибровка выходного канала ускорителя ЛИНАК-200 (ЛЯП, ОИЯИ) новым методом, основанным на активации изотопов индия в пучке тормозного излучения и разработана методика энергетической калибровки сцинтилляционных детекторов в диапазоне до 25 МэВ. На ускорителе ЛИНАК-200 проведены измерения радиационной стойкости детекторов GaAs:Cr при облучении электронами 21 МэВ до уровня поглощенной дозы $1,5 \text{ МГр}$, что соответствует флюенсу $7\times 10^{15} \text{ е}^-\times\text{см}^{-2}$. На реакторе ИБР-2 измерена радиационная стойкость детекторов GaAs:Cr при облучении потоками быстрых нейтронов в диапазоне $4\times 10^{11} - 4\times 10^{16} \text{ н}\times\text{см}^{-2}$. Выполнены измерения падения сбора заряда, вольтамперных и вольтфарадных характеристик облученных детекторов GaAs:Cr , предложены формулы для

аппроксимации полученных экспериментальных зависимостей. Эти формулы применимы для практического расчета эффективности детекторов GaAs:Cr, облученных потоками электронов и быстрых нейтронов. В заключительной части работы описаны результаты испытаний матричных детекторов GaAs:Cr в прототипе калориметра BeamCal на ускорителе DESY-II.

Целью работы было изучение радиационной стойкости высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом (GaAs:Cr) и возможности применения детекторов из GaAs:Cr на будущих лептонных коллайдерах. В ходе выполнения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Подготовка ускорителя ЛИНАК-200 к измерениям радиационной стойкости детекторов на пучках ультраквантумистских электронов. Для решения этой задачи выполнена энергетическая калибровка выходного канала ускорителя, разработана методика энергетической калибровки различных типов детекторов электронами в диапазоне энергий до 25 МэВ, создан стенд для облучения детекторов электронами энергиями 10-25 МэВ.
2. Измерение радиационной стойкости опытных образцов GaAs:Cr совместно с кремниевыми образцами на электронном пучке ЛИНАК-200 и нейtronном пучке реактора ИБР-2.
3. Проведение испытаний детекторов GaAs:Cr на пучке электронов синхротрона DESY-II. Были созданы матричные детекторы GaAs:Cr большой площади для сенсорных пластин прототипа калориметра BeamCal для будущего калориметра FCAL на коллайдерах ILC, FCC и CLIC.

Научная новизна работы:

1. Впервые выполнено систематическое исследование радиационной стойкости высокоомного GaAs:Cr при облучении ультраквантумистскими электронами.
2. Выполнено исследование радиационной стойкости высокоомного GaAs:Cr при облучении быстрыми нейтронами и впервые экспериментально измерен коэффициент пересчета повреждений между быстрыми нейтронами и ультраквантумистскими электронами для сенсоров GaAs:Cr.
3. Опытные образцы детекторов из GaAs:Cr успешно испытаны в прототипе калориметра FCAL на электронном пучке синхротрона DESY-II.

Практическая значимость:

Систематическое изучение радиационной стойкости детекторов GaAs:Cr является необходимым условием для их применения. Измерения радиационной стойкости детекторов GaAs:Cr в пучках электронов и быстрых нейтронов, предложенные формулы для расчета зависимости падения эффективности сбора заряда в материале детектора от поглощённой дозы или флюенса излучения позволяют прогнозировать изменение рабочих характеристик детекторов GaAs:Cr. Это открывает возможность использования детекторов из GaAs:Cr в современных и будущих экспериментах с высокой радиационной нагрузкой.

Успешное испытание детекторов GaAs:Cr в прототипе калориметра BeamCal показало возможность их использования в калориметре FCAL.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Созданы измерительные стенды и разработана методика определения функциональных характеристик ППД, позволяющие исследовать радиационную стойкость ППД при облучении заряженными и нейтральными частицами.
2. Систематически измерена радиационная стойкость высокоомного GaAs:Cr при облучении электронами с поглощенной дозой до 1,5 МГр и быстрыми нейтронами в диапазоне флюенса $4 \times 10^{11} - 4 \times 10^{16} \text{ н} \times \text{см}^{-2}$. Показано, что после облучения удельное сопротивление стабилизируется на уровне $10^9 \text{ Ом} \times \text{см}$, вольтфарадные характеристики не зависят от поглощенной дозы или флюенса нейтронов. Определена зависимость падения эффективности сбора заряда от поглощённой дозы или флюенса нейтронов. Показано отсутствие отжига высокоомного GaAs:Cr при комнатной температуре. Впервые экспериментально установлен пересчетный коэффициент флюенсов нейтронов с энергией 1 МэВ и электронов, характеризующий степень повреждений высокоомного GaAs:Cr. Указанный коэффициент равен $0,25 \pm 0,11$.
3. Изготовлен и испытан на электронном пучке синхротрона DESY-II (г. Гамбург, Германия) прототип калориметра BeamCal на основе детекторов из высокоомного GaAs:Cr и вольфрамовых поглотителей.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международной конференции "Instrumentation for Colliding Beam Physics" (INSTR20, Новосибирск, 2020), международной конференции "The 5th

international conference on particle physics and astrophysics" (МИФИ, Москва, 2020), всероссийской конференции "Полупроводниковые материалы в современной микро- и наноэлектронике" (ДГТУ, Махачкала, 2020), рабочих совещаниях групп FCAL и CLIC, на научных семинарах и рабочих совещаниях ЛЯП ОИЯИ.

Результаты работы опубликованы в 7 статьях в ведущих научных журналах, 6 из которых входят в список ВАК и международные базы Scopus и Web of Science.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной, общепринятой статистической обработкой результатов измерений, согласованностью результатов эксперимента с теоретическими выводами, а также с результатами, полученными другими авторами. Несмотря на то, что за последние годы технология производства GaAs:Cr претерпела некоторые изменения, представленные в работе результаты в основном согласуются с изложенными ранее в работах [1], [2].

После облучения нейtronами вольтамперные характеристики и падение сбора заряда в сенсорах GaAs:Cr не противоречат результатам, изложенным в [1].

При облучении электронами высоких энергий зависимость эффективности сбора заряда от флюенса согласуется с измерениями, проведенными коллаборацией FCAL в 2010 г., опубликованными в работе [2].

Измеренный коэффициент пересчета повреждений нейtronами 1 МэВ и электронами для GaAs:Cr, равный $0,25 \pm 0,11$ не противоречит теоретически рассчитанному из неионизационных потерь энергии (NIEL) в GaAs по моделям, предоставленным группой AMS-02 (INFN, Италия) [3], согласно расчётом для чистого GaAs коэффициент $k = 0,18 \pm 0,03$.

Личный вклад автора: диссертация является результатом исследований автора, проводившихся в научно-экспериментальном отделе встречных пучков ЛЯП ОИЯИ, а так же в составе коллаборации FCAL в DESY (Германия). Автор выполнял ведущую роль в подготовке и проведении радиационных тестов на ускорителе LINAK-200 и реакторе ИБР-2, измерении облученных сенсоров, обработке и анализе экспериментальных результатов. Автором была разработана и откалибрована установка для измерения эффективности сбора заряда в облучаемых детекторах, выполнены сами измерения ССЕ, ВАХ, ВФХ и температурные зависимости облученных детекторов. Автором предложена формула для расчета падения сбора заряда в облученных детекторах GaAs:Cr и выполнен расчёт коэффициента жесткости при сравнении результатов облучения электронами и быстрыми нейтронами.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 108 страниц, включает 61 рисунок, 4 таблицы и 48 ссылок на литературные источники. В приложении приведены основные публикации автора по теме диссертации.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна работы и практическая значимость ее результатов.

Первая глава посвящена подготовке установки для облучения сенсоров электронами высоких энергий на создаваемом в Лаборатории ядерных проблем ускорителе ЛИНАК-200. Для облучения детекторов выбран вывод пучка после первой ускоряющей секции ускорителя, позволяющий выводить пучки электронов со следующими параметрами: размеры пучка 2×20 мм, энергия от 10 до 25 МэВ, интенсивность от единиц электронов до 20 мА, длительность импульсов до 2 мкс, их частота 1 - 25 Гц. Такие характеристики почти идеально подходят для задачи облучения образцов детекторов размерами 5×5 мм 2 .

Первым этапом, необходимым для проведения радиационных тестов, стала энергетическая калибровка выходного канала ускорителя ЛИНАК-200 и измерение выходного спектра электронов. Для измерения энергии пучка был использован новый метод измерения энергии пучка электронов, основанный на измерении соотношения активностей насыщения продуктов фотоядерных реакций, полученных в результате активации индивидуальных фольг фотонами тормозного излучения [4]. В результате выходной канал ускорителя был откалиброван в диапазоне энергий 10 - 25 МэВ с точностью $\pm 0,2$ МэВ.

Следующим этапом стали энергетическая калибровка на ЛИНАК-200 сцинтиляционных детекторов в диапазоне до 25 МэВ и измерение электронных спектров выходного канала ускорителя. Для этого были выбраны три сцинтилятора цилиндрической формы из следующих материалов: кристаллов LaBr₃:Ce (размерами 51×51 мм) и Bi₄Ge₃O₁₂ (76×65 мм), а также из пластического сцинтилятора (100×400 мм).

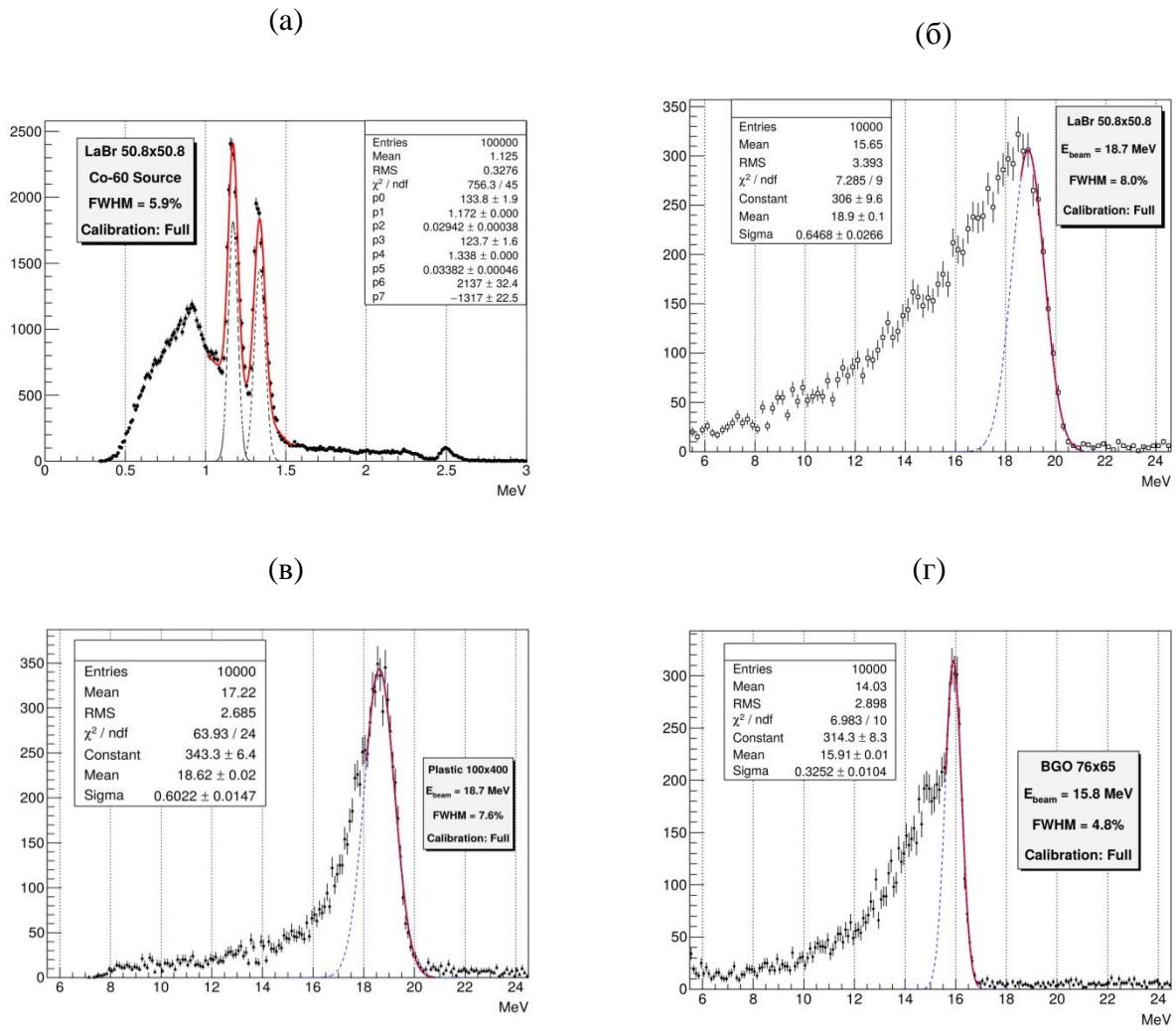


Рисунок 1 – γ -спектр ^{60}Co , измеренный детектором LaBr (а) и спектры электронов ускорителя ЛИНАК-200: энергией 18,7 МэВ, измеренный детектором LaBr (б); энергией 18,7 МэВ, измеренный пластиковым сцинтиллятором (в); энергией 15,8 МэВ, измеренный детектором BGO (г)

Для калибровки в области энергий 10 - 25 МэВ регистрировались спектры электронов ускорителя, а в диапазоне 0 - 2,5 МэВ использовались γ -источники. Энергетическое разрешение для электронов в этом диапазоне энергий составило около 5% для BGO, 8% для LaBr и 7% для пластиковых детекторов, как показано на Рисунке 1. При этом измеренные разными детекторами спектры идентичны, на всех спектрах четко определяется граница (видна на правом краю спектра), соответствующая пику полного поглощения энергии электрона веществом детектора. Эту границу можно аппроксимировать распределением Гаусса, как это показано на Рисунках 1(б), 1(в) и 1(г).

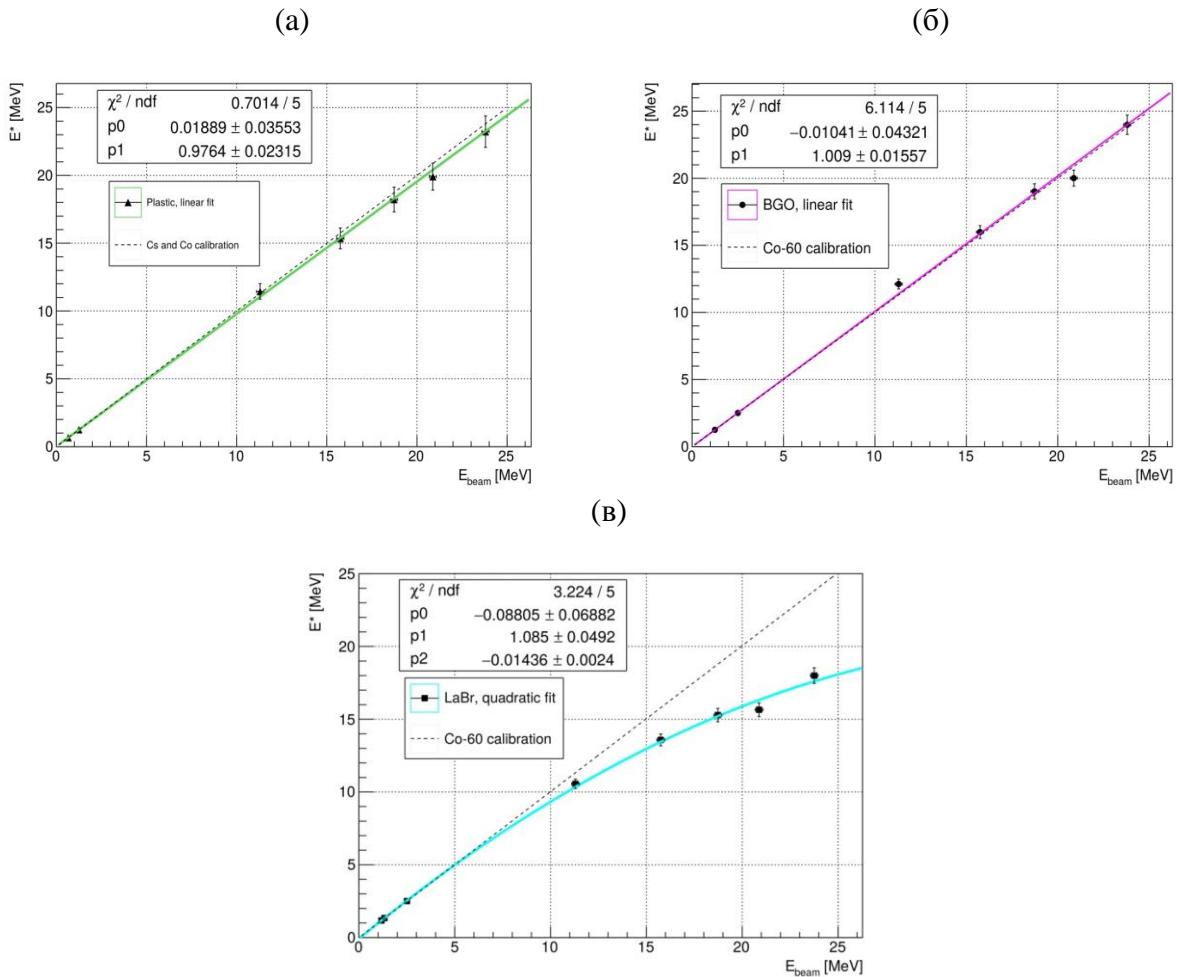


Рисунок 2 – Калибровочные кривые для детекторов из пластика (а), BGO (б) и LaBr (в), полученные из спектров электронов 10 – 25 МэВ на ускорителе ЛИНАК-200

Аналогичным образом были получены спектры для пяти значений энергии ускорителя: $E = 11,3$ МэВ, $15,8$ МэВ, $18,7$ МэВ, $20,9$ МэВ и $23,8$ МэВ и построены калибровочные кривые для 3-х разных сцинтилляционных детекторов (Рисунок 2). При этом детектор BGO и пластический сцинтиллятор демонстрируют линейность отклика во всем диапазоне энергий, а для LaBr наблюдается отклонение от линейности при энергиях выше 10 МэВ. Тем не менее, после калибровки все три детектора могут успешно применяться для регистрации спектров в энергетическом диапазоне до 25 МэВ. В результате был откалиброван выходной канал ускорителя ЛИНАК-200 и разработана методика энергетической калибровки детекторов в диапазоне энергий до 25 МэВ.

Результаты первой главы опубликованы в работе [A1].

Вторая глава посвящена измерению радиационной стойкости полупроводниковых детекторов из GaAs:Cr и Si к облучению электронами 21 МэВ на ускорителе ЛИНАК-200. Описаны характерные особенности

изготовления и работы ППД из высокоомного GaAs:Cr. Разработана методика облучения, выполнены измерения основных характеристик облученных сенсоров GaAs:Cr в прямом сравнении с аналогичным образом облученными кремниевым сенсорами.

Широко используемый в промышленной электронике арсенид галлия, выращенный с использованием традиционной LEC (Liquid Encapsulated Czochralski) технологии, успешно применяется при производстве высокочастотных диодов, транзисторов, интегральных микросхем. Однако такой LEC Si-GaAs непригоден для производства ППД ядерных излучений, поскольку он обладает недостаточно высоким удельным сопротивлением и малым временем жизни носителей заряда. Это связано с чрезвычайно высокой концентрацией EL2 центров (до 10^{16} см⁻²), которые являются ловушками для электронов с чрезвычайно высоким сечением захвата ($\sim 10^{13}$ см²). Это ограничивает время жизни электронов и, как следствие, снижает эффективность сбора заряда в детекторе. В лаборатории детекторов ионизирующего излучения (ТГУ, Томск) разработана новая технология легирования слоев полупроводника атомами компенсирующего глубокого акцептора (Cr). Применение технологии легирования GaAs n-типа хромом позволяет компенсировать мелкие донорные примеси и в результате получить высокоомный материал (GaAs:Cr), обладающий высоким удельным сопротивлением ($\sim 10^9$ Ом×см) и пригодный для изготовления детекторов. Особенностью высокоомного GaAs:Cr является низкое значение произведения времени жизни на подвижность дырок ($\mu \times \tau$)_p, в результате чего в сборе зарядов участвуют в основном электроны. Таким образом, эффективность сбора заряда (ССЕ) для таких сенсоров близка к 50% для необлученных сенсоров, при этом сбор электронов близок к 100% [1].

Для исследования радиационной стойкости были отобраны 9 сенсоров GaAs:Cr размерами 5×5×0,3 мм. Сенсоры сделаны из кристаллов GaAs n-типа производства ГИРЕДМЕТ, имеющих уровень легирования донорной примесью 3 – 3.6×10^{16} см⁻³. При легировании хромом выполнялось условие: $N_{Cr} > N_d > N_f$, где N_f – суммарная концентрация собственных дефектов и фоновых примесей, N_d – концентрация донорных примесей, N_{Cr} – концентрация глубокой акцепторной примеси Cr).

В результате были получены сенсоры GaAs:Cr резистивного типа с удельным сопротивлением $\rho > 10^9$ Ом×см.

Для сравнения были отобраны два вида кремниевых сенсоров в виде p-i-n диодов, сделанных из кремния n-типа:

- (1) – сенсоры $5 \times 5 \times 0,25$ мм, $\rho \in (2;4)$ кОм×см, (производства НИИМВ, Зеленоград);
- (2) – сенсоры $5 \times 5 \times 0,4$ мм, $\rho \in (1,25; 3,25)$ кОм×см, производства Hamamatsu Photonics (HPK FZ-Si-n, Wacker) [5].

Сенсоры облучались пучком электронов энергией 21 МэВ на ускорителе ЛИНАК-200. Профиль выходного пучка имеет размеры 2×20 мм, это меньше размера сенсора, поэтому для увеличения облучаемой площади образцы были удалены от выходного окна на 15 см. В результате достигнуто достаточно равномерное ($\sim 20\%$) облучение всей площади сенсора, что подтверждено моделированием прохождения электронов через облучательную установку в среде GEANT4.

Все сенсоры были разбиты на 3 группы по 5 сенсоров (3 GaAs:Cr и 2 Si). Сенсоры из набора I облучались одновременно с шагом поглощенной дозы 25 кГр до общей дозы 100 кГр. Наборы II и III облучались поодиночке или парами шагами 50 - 200 кГр до дозы 0,5 и 1,5 МГр соответственно. Скорость набора дозы варьировалась от 50 до 500 кГр/час. Электронный пучок выходил через титановое окно и далее последовательно проходил: соответствующий размеру сенсора алюминиевый коллиматор 5×5 мм, сенсоры (один или несколько), радиохромную пленку (для дополнительного контроля дозы и равномерности облучения) и поглощался в цилиндре Фарадея (Рисунок 3). Измеренный в цилиндре Фарадея заряд использовался для расчета потока прошедших электронов и расчета поглощенной дозы.

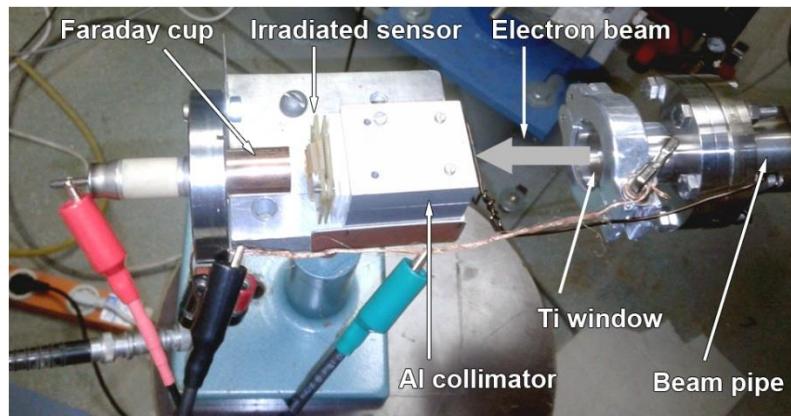


Рисунок 3 – Установка для облучения детекторов и контроля дозы

Моделирование установки в среде GEANT4 позволило выполнить расчет поглощенной дозы и равномерность облучения сенсора. Согласно модели неравномерность облучения составила около 20%, при этом центр сенсора получал большую дозу, чем его края.

Для измерения вольтамперных характеристик (ВАХ), вольтфарадных характеристик (ВФХ) и эффективности сбора заряда была разработана установка,

позволяющая выполнять измерения при различных температурах. Для измерения ССЕ использовались спектры минимально ионизирующей частицы (МИЧ). Электроны от β -источника Sr⁹⁰ формируют сигнал в сенсоре, который поступает на зарядочувствительный усилитель-формирователь. Триггер запускался от двух сцинтилляционных счетчиков, работающих в режиме совпадения. При такой конфигурации триггера отбирались только сигналы, которые генерируют прошедшие через сенсор электроны с энергией 1 – 2,23 МэВ. Это соответствует спектру МИЧ. Разрешение, определяемое как полная ширина спектрального пика сигнала на полувысоте (ПШПВ) составило 2,5 кэВ. Выход ФЭУ и усилителя подключены к цифровому осциллографу DRS4, данные записывались и поступали в компьютер для дальнейшей обработки. Для расчета базового уровня отдельно записывался спектр пьедестала, при этом триггер запускался от внешнего генератора. Спектр пьедестала соответствует распределению Гаусса, а его ширина определяет разрешение измерительной установки (Рисунок 6). Блок-схема установки показана на Рисунке 4.

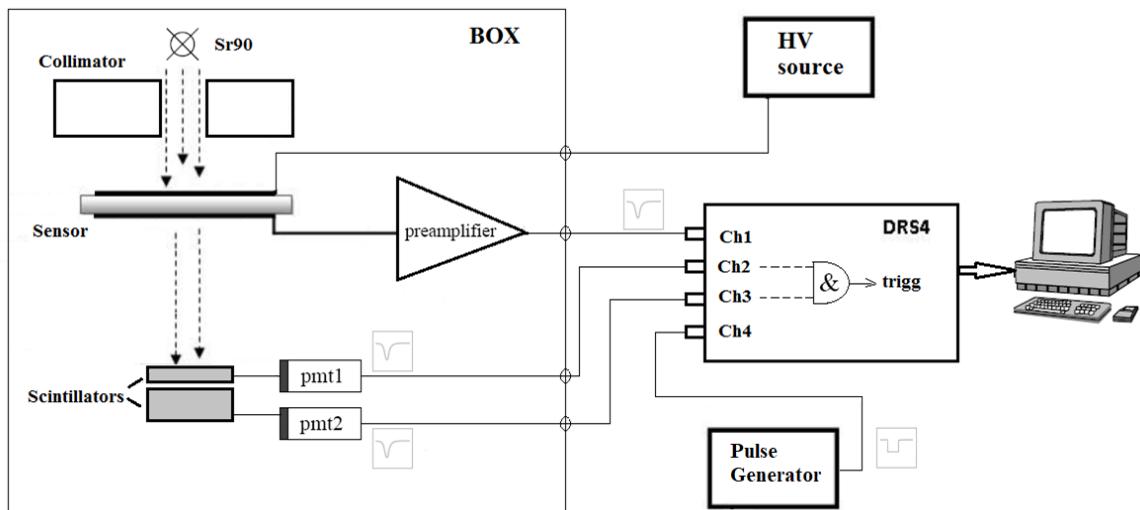


Рисунок 4 – Блок-схема установки для измерения ССЕ

На Рисунке 5 показана экспериментальная зависимость нормированного сбора заряда от дозы для сенсоров GaAs:Cr и Si. Процесс облучения можно представить как рост концентрации центров захвата пропорционально поглощенной дозе, что приводит к уменьшению длины свободного пробега электронов.

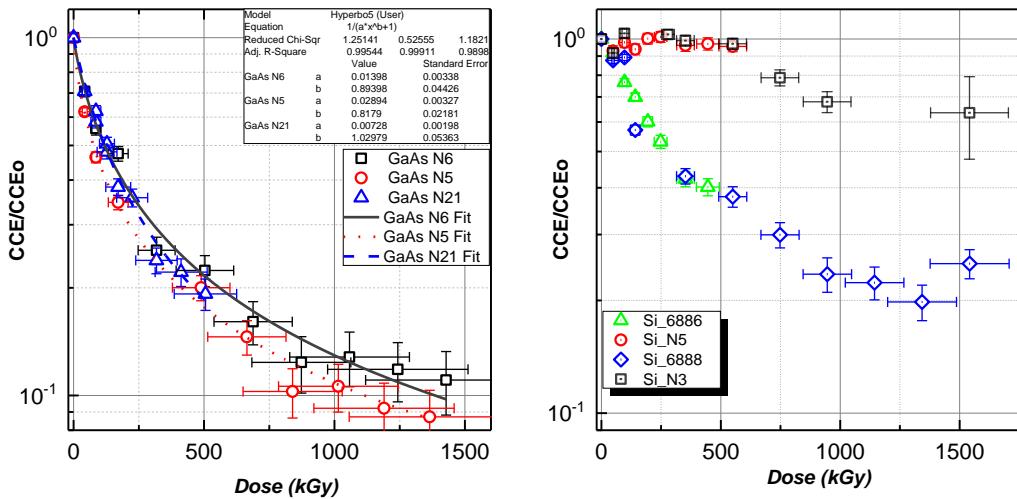


Рисунок 5 – Зависимость ССЕ от поглощенной дозы для GaAs:Cr, $U_{bias} = -100$ В (слева) и Si $U_{bias} = 100$ В (справа). Измерены при комнатной температуре

Для оценки падения сбора заряда в детекторах GaAs:Cr автором предложена следующая формула:

$$CCE = \frac{1}{a \times D^b + 1} \quad (1)$$

где **D** -доза, **a** и **b** - коэффициенты нормализации, **a** - пропорционален сечению центров захвата носителей, **b** ≤ 1 - пропорционален пробегу носителя, **b** = 1, если длина пробега превышает толщину сенсора ($L_n >> d$). Как следует из Рисунка 5, экспериментальная зависимость ССЕ от поглощенной дозы для GaAs:Cr хорошо описывается формулой 2.

На Рисунке 6 представлены МИЧ-спектры сенсоров GaAs:Cr, облученных электронами до доз 0,5 и 1,4 МГр. Видно, что по мере набора дозы амплитуда сигнала МИЧ падает и его спектр начинает перекрываться со спектром пьедестала. Тем не менее, после облучения дозой 1,4 МГр пики в спектрах достаточно хорошо разделяются, хотя это требует увеличения напряжения смещения с 200 до 500 В (до напряженности 16 кВ/см).

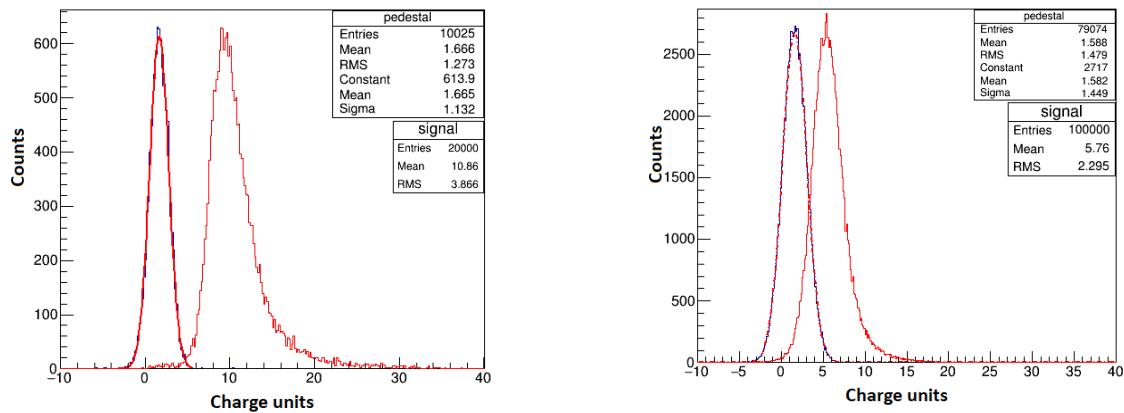


Рисунок 6 – Спектры МИЧ и пьедестала GaAs:Cr N4, облученного до дозы 0,5 МГр (слева) и GaAs:Cr N6 до дозы 1,4 МГр (справа). Пьедестал аппроксимирован Гауссианом. Измерены при $U_{bias} = -500$ В и комнатной температуре

Радиационные повреждения, вызванные электронами с энергией 21 МэВ, приводят к различным результатам в сенсорах GaAs:Cr и Si. Так, при максимальной дозе 1,4 МГр, в облученных сенсорах GaAs:Cr темновой ток увеличивался в 3-7 раз, а в Si почти на 4 порядка. При этом сбор заряда в GaAs:Cr упал приблизительно на порядок. Такое поведение может быть связано с появлением в материале смещающих повреждений, соответствующих первичным и сложным дефектам, которые приводят к образованию новых глубоких уровней в запрещенной зоне. Радиационные дефекты имеют глубину захвата электронов и сечение, близкое к аналогичным параметрам для ростовых дефектов EL2 [6], что приводит к уменьшению длины свободного пробега носителей заряда (электронов) и соответственно к уменьшению сбора заряда.

Хранение при комнатной температуре более года не выявило существенных изменений в свойствах облученных сенсоров GaAs:Cr (Рисунок 7). Электронные ловушки E1-E5 образуются в подрешетке As и являются парами Френкеля (V_{As} - As_i), дырочная ловушка H1, относится к вакансии мышьяка (V_{As}), а ловушки H2 – H5 к комплексам, включающим As_i [6], [7]. Для высокоомного GaAs:Cr температура отжига мелких дефектов E1, так же как и более глубоких E2 - E5 и H1 - H5 составляет около 500 °К [7], что намного больше комнатной температуры. Это позволяет сделать вывод о том, что в сенсорах GaAs:Cr при комнатной температуре отсутствует какой-либо значительный отжиг радиационных повреждений, что подтвердилось на практике.

Спектры МИЧ показали, что ширина пьедестала в GaAs:Cr практически не изменяется во всем диапазоне поглощенных доз. Для всех сенсоров ССЕ не зависит от температуры, а их охлаждение приводит к уменьшению темнового

тока, и как следствие улучшению соотношения сигнал/шум, что особенно значимо для кремниевых сенсоров. После дозы 1,5 МГр в кремниевых сенсорах сбор заряда сохраняется на уровне выше 80%, в то время как в GaAs:Cr ССЕ падает на порядок после облучения дозой 1,4 МГр. Увеличение напряжения смещения уменьшает вероятность захвата свободных электронов ловушками, что позволяет увеличить сбор заряда в GaAs:Cr выше 20% от исходного. Изучение сбора заряда в охлажденных сенсорах показало, что значение ССЕ не зависит от температуры, а соотношение сигнал/шум (S/N) растет с ростом напряжения смещения и при комнатной температуре достигает максимума $S/N \approx 4$ при напряженности поля 2 В/мкм и комнатной температуре (Рисунок 7). Следует подчеркнуть, что соотношение S/N при комнатной температуре у сенсоров GaAs:Cr в несколько раз выше, чем у аналогично облученных кремниевых сенсоров.

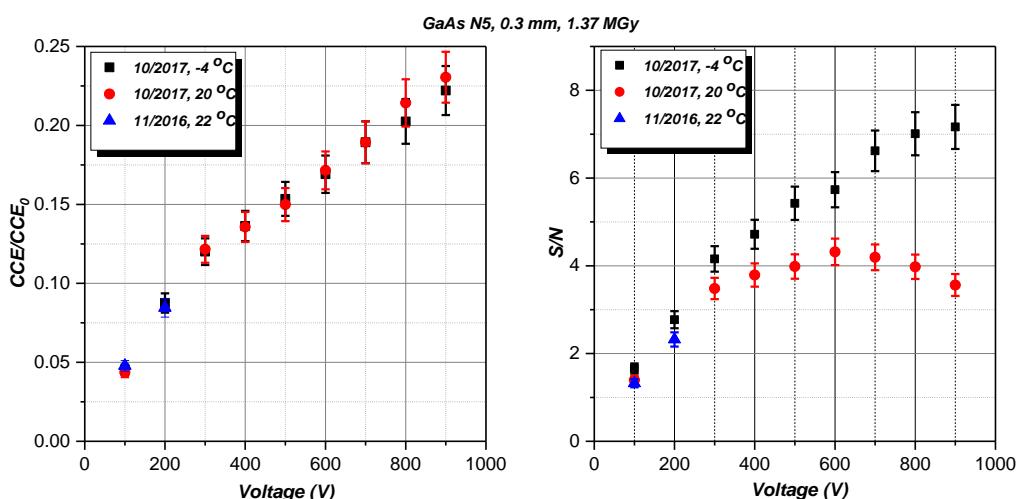


Рисунок 7 – Зависимости ССЕ и соотношения сигнал-шум (S/N) от U_{bias} для сенсора GaAs:Cr N5, облученного до 1,37 МГр, измеренные при различных температурах

Вольтфарадные характеристики облученных Si сенсоров продемонстрировали рост напряжения полного обеднения после облучения кремниевых сенсоров. Так у облученных до 1,56 МГр сенсоров для 1-го типа ССЕ выходит на плато при напряжении более 200 В, тогда как для 2-го типа 500 В недостаточно и плато наблюдается только у образца, облученного до 0,5 МГр при напряжении 250 В. Поскольку в сенсорах из высокоомного GaAs:Cr отсутствует p-n переход, их емкость не зависит от напряжения и не изменяется при облучении, она соответствует формуле емкости для плоского конденсатора.

Таким образом, после облучения электронами с энергией 21 МэВ до дозы 0,5 МГр (что соответствует потоку электронов $\Phi_e = 2,5 \times 10^{15} e^- \times cm^{-2}$)

предпочтительнее использовать сенсоры из GaAs:Cr, поскольку темновой ток меняется незначительно, а соотношение сигнал/шум выше, чем у кремния. Однако сбор заряда в GaAs:Cr падает быстрее при облучении, соответственно для доз выше 1 МГр и при условии охлаждения ниже -10°C, использование кремниевых сенсоров может быть предпочтительным.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A2, A3, A4]

Третья глава посвящена измерению радиационной стойкости детекторов из GaAs:Cr и Si к облучению быстрыми нейтронами на 3-м канале реактора ИБР-2. Приведены результаты измерения облученных сенсоров, выполнено сравнение с результатами облучения электронами, получена зависимость падения сбора заряда при облучении нейтронами и предложен коэффициент для пересчета эквивалентного потока электронов 21 МэВ в поток быстрых нейтронов, которые могут применяться на практике для расчета падения сбора заряда в сенсорах GaAs:Cr.

Облучаемые образцы помещались в специальные контейнеры, которые крепились к транспортному двутавру и затем по рельсовому пути вводились в 3-й канал реактора при помощи механизма с электроприводом. Изменение расстояния от облучаемого образца до ядра реактора позволяло получать различные плотности потока нейтронов через облучаемые образцы, которые варьировались от $6,3 \cdot 10^5$ до $1,1 \cdot 10^{10}$ н/см²/с. Температура образцов при облучении не превышала 50°C [8].

Измерение интегрального потока нейтронов проводилось двумя методами:

1. Методом нейтронно-активационного анализа – (НАА). Рядом с облучаемыми образцами помещались фольги из никеля, в которых впоследствии измерялась наведенная активность. Измерение проводилось по γ -линии 811 кэВ изотопа Co⁵⁸.
2. Методом измерения эквивалентного потока 1 МэВ нейтронов в Si. В места с изучаемыми образцами помещались Si детекторы (мониторы). Создаваемые нейтронами повреждения в материале мониторов пропорциональны интегральному потоку нейтронов через них. Таким образом, мониторы как бы запоминают интегральный поток нейтронов. Вычислить эквивалентный флюенс нейтронов 1 МэВ (Si) можно измерив приращение темнового тока в мониторе.

Достоинство метода измерения эквивалентного 1 МэВ (Si) флюенса в том, что таким методом можно сравнивать различные виды излучений и по повреждению в Si мониторах приводить потоки различных видов излучения к эквивалентному потоку нейтронов 1 МэВ (в Si) используя формулу:

$$\Phi_{\text{экв/1 МэВ/Si}} = k \times \Phi \quad (2)$$

где k - коэффициент радиационной жесткости для данного излучения. Для более жесткого по сравнению с нейтронами 1 МэВ излучения величина $k > 1$, а для менее жесткого $k < 1$ [9]. Используя функции неионизирующих потерь энергии (NIEL) для электронов и нейтронов в Si и GaAs, представленные на Рисунке 8, можно поток электронов определенной энергии представить в виде эквивалентного по повреждениям в материале потока 1 МэВ нейтронов, то есть найти коэффициент жесткости для электронов заданной энергии, и далее для преобразования потоков использовать формулу (2) [9]. Так для Si при облучении электронами 21 МэВ, расчетный коэффициент жесткости составляет $k = 0,05$, а для чистого GaAs $k = 0,18 \pm 0,03$. Однако в работе исследовался легированный донорными примесями и компенсированный хромом GaAs:Cr. Применение коэффициента, взятого из расчетной модели NIEL для чистого GaAs затруднительно для практического применения детекторов GaAs:Cr, поскольку практическую значимость представляют не сами радиационные повреждения в материале, а их влияние на основные характеристики детектора, такие как эффективность сбора заряда и темновой ток. Таким образом, в работе предложено измерить коэффициент жесткости k по результатам падения сбора заряда для облученных электронами и быстрыми нейтронами сенсоров GaAs:Cr.

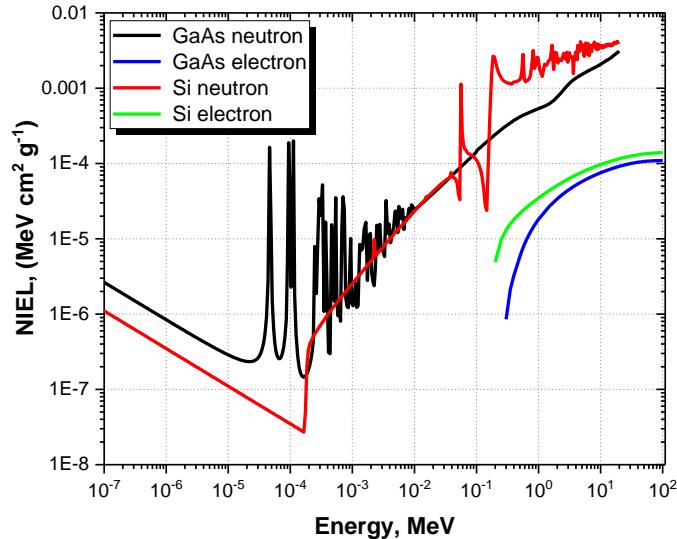


Рисунок 8 – Функция NIEL для GaAs и Si при повреждении электронами и нейтронами различных энергий. Данные взяты из расчетов, проведенных группой MS-02 [3]

Были облучены шесть сенсоров GaAs:Cr, каждый из которых облучался вместе с одним или несколькими Si сенсорами. Флюенс нейтронов измерялся 2-мя методами (НАА и с помощью Si мониторов) и составил от $3,9 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до

$3,7 \times 10^{16}$ см⁻². Измерения ВАХ показали, что при флюенсе $1,3 \times 10^{15}$ см⁻² темновой ток в сенсоре GaAs:Cr вырос в 3 раза (до ~ 1 мкА), а в сенсоре из Si более чем на 5 порядков и достиг 0,1 – 1 мА.

Измерение сбора заряда в сенсорах GaAs:Cr показало, что при флюенсе 10^{14} см⁻² сбор заряда падает на 30%, а при флюенсе $6,1 \times 10^{15}$ см⁻² сбор заряда составляет всего 2% начального. Как видно на Рисунке 9, падение ССЕ при облучении нейтронами и электронами хорошо описывается формулой (3), она получается если дозу D в формуле (1) заменить соответствующим флюенсом Φ_e или Φ_n :

$$CCE = \frac{1}{\alpha \times \Phi^b + 1} \quad (3)$$

где Φ – флюенс частиц, a и b – параметры нормализации.

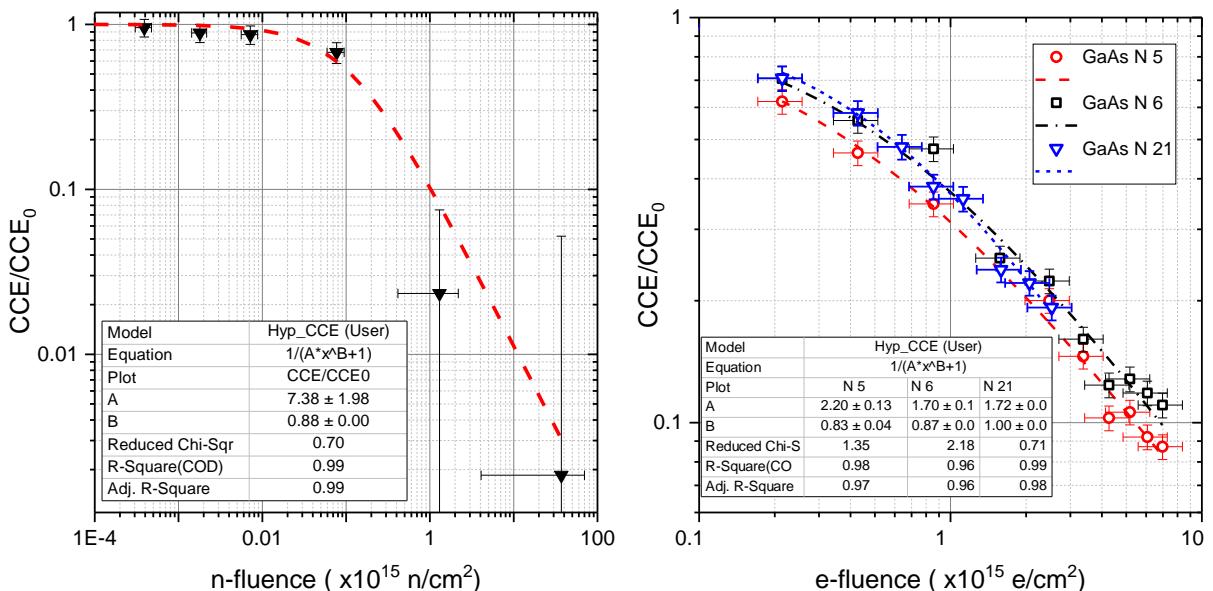


Рисунок 9 – Зависимость ССЕ от флюенса быстрых нейтронов (слева) и электронов 21 МэВ (справа) для сенсоров GaAs:Cr. Измерена при $U_{bias} = -200$ В и комнатной температуре

Результаты, представленные на Рисунке 9, были аппроксимированы функцией (3), и это дало возможность привести нейтронный и электронный флюенсы к единой шкале. Для GaAs:Cr, как и для кремния по формуле (2), можно ввести коэффициент жесткости k и, таким образом, выполнить преобразование флюенса электронов в эквивалентный флюенс быстрых нейтронов:

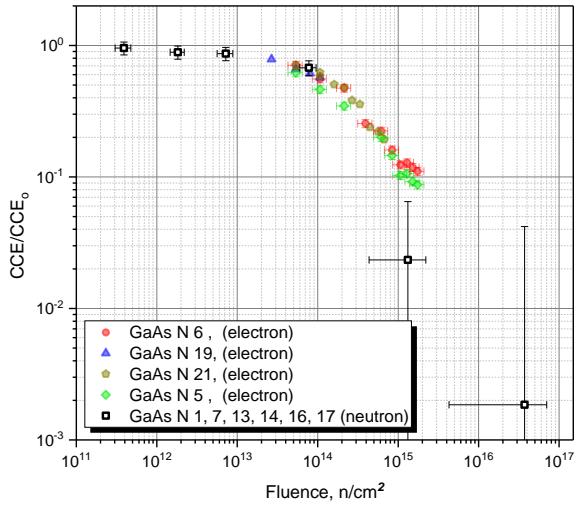


Рисунок 10 – Сравнение зависимостей ССЕ для сенсоров GaAs:Cr, облученных электронами и нейтронами. Для образцов, облученных нейтронами, поток приведен к эквивалентному потоку быстрых нейтронов

$$\Phi_e = k \times \Phi_n \quad (4)$$

где Φ_e – флюенс электронов 21 МэВ, Φ_n – флюенс быстрых нейтронов.

В результате, применив аппроксимацию результатов облучения функцией (3), был найден пересчетный коэффициент жесткости $k = 0,25 \pm 0,11$ для сенсоров из GaAs:Cr. При таком представлении результаты нейтронного и электронного облучения хорошо согласуются, это видно на Рисунке 10. Результатом работ по измерению радиационной стойкости Si и GaAs:Cr при облучении быстрыми нейтронами на импульсном реакторе ИБР-2 стало прямое сравнение с результатами облучения электронами. Предложенная функция (3) и коэффициент жесткости ($k = 0,25 \pm 0,11$) могут использоваться для расчёта падения сбора заряда в сенсорах GaAs:Cr в пучках электронов и быстрых нейтронов и для преобразования флюенса электронов в эквивалентный флюенс нейтронов. Это позволяет выполнять расчеты допустимых потоков через детекторы из резистивного GaAs:Cr, прогнозировать изменения их рабочих характеристик под воздействием излучения.

Проделанная работа представляет большую практическую ценность для применения детекторов из GaAs:Cr в экспериментах с высокой радиационной нагрузкой с целью их применения на будущих лептонных коллайдерах.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A5, A6].

В четвертой главе рассказывается о применении матричных детекторов большой площади из GaAs:Cr в прототипе калориметра BeamCal для будущего коллайдера ILC. Детекторные плоскости из резистивного GaAs:Cr для прототипа

будущих калориметров BeamCal и LumiCal были изготовлены и прошли тестирование на пучке вторичных электронов с энергиями от 2 до 4.5 ГэВ на синхротроне DESY-II (Гамбург, Германия). Калориметр имеет многослойную структуру: слои состоят из поглотителей в виде вольфрамовых дисков толщиной 3,5 мм, и расположенных ними матричных детекторов. Такая геометрия позволяет уменьшить радиус Мольера и достичь максимального разрешения калориметра [10]. Для прототипа калориметра были изготовлены вольфрамовые поглотители в виде квадратных пластин $140 \times 140 \times 3,5$ мм и матричные детекторы GaAs:Cr и Si. Сенсоры GaAs:Cr имеют форму сегментов толщиной 500 мкм, внутренним радиусом 48 мм, внешним радиусом 114 мм, лицевая сторона со сплошной металлизацией, а обратная разбита на 64 контактные площадки, окруженные общим охранным кольцом по периметру сектора, как показано на Рисунке 11 [11].

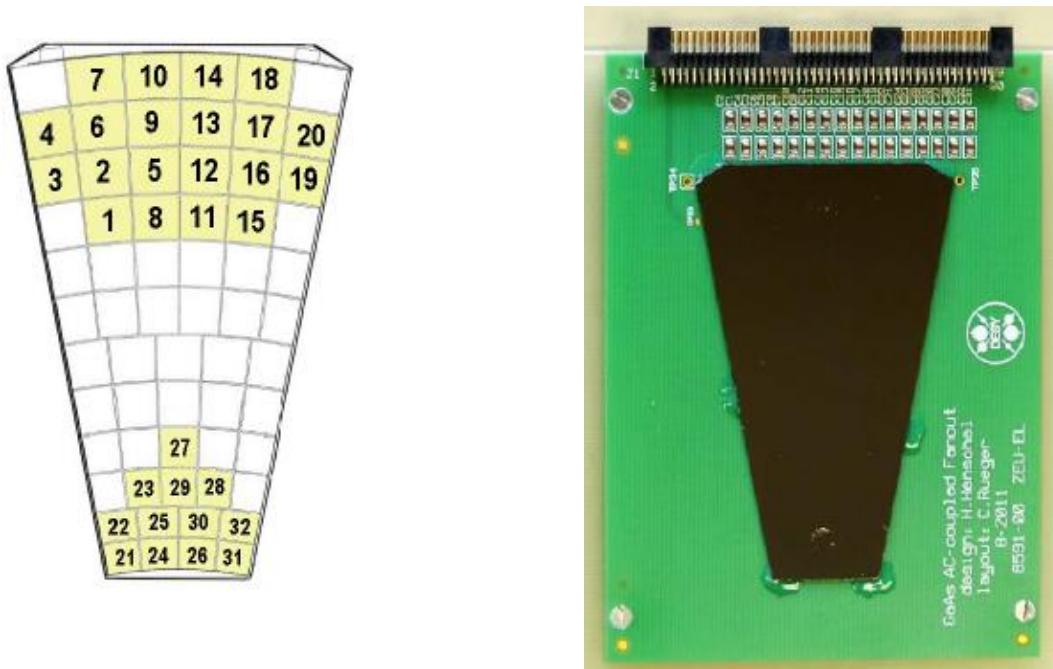


Рисунок 11 – Матричный сенсор GaAs:Cr с 64-мя контактными площадками. Подключенные кчитывающей электронике контактные площадки пронумерованы

Перед использованием в калориметре для всех сенсоров были измерены вольтамперные и вольтфарадные характеристики, а также эффективность сбора заряда. Оба типа (GaAs:Cr и Si) детекторов были испытаны на электронном пучке ускорителя DESY-II. Для обоих детекторов получены соотношения сигнал/шум в диапазоне от 20 до 30. Были исследованы сигналы из разных областей детектора и построена зависимость амплитуды сигнала от точки попадания электрона. В результате подтверждена равномерность отклика детектора, за исключением

района зазора между соседними площадками, где наблюдается небольшое уменьшение амплитуды сигнала на 10%. Моделирование процессов рождения электронно-позитронных ливней в калориметре, выполненное методом Монте-Карло, хорошо согласуется с результатами измерений. Детекторы совместно со считывающей электроникой позволяют эффективно обнаруживать минимальные ионизирующие частицы в калориметре, что позволяет проводить совмещение сигналов различных сенсорных плоскостей и калибровку отклика всех детекторных слоев.

Тесты на синхротроне DESY-II продемонстрировали полную функциональность сенсорных плоскостей из GaAs:Cr, что открыло возможность их использования в калориметрах LumiCal и BeamCal для будущих коллайдеров ILC и CLIC. Результаты радиационных испытаний, описанные в главах 2 и 3 данной работы, позволяют оценить падение сигнала в сенсорных пластинах GaAs:Cr при повреждении электронами и нейtronами и сделать прогноз эффективности их использования в эксперименте. Это представляет неоспоримую практическую ценность для применения полупроводниковых детекторов из резистивного GaAs:Cr для будущих экспериментов в физике высоких энергий.

Результаты четвертой главы опубликованы в работе [A7].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

- Проведена подготовка первого выходного канала ускорителя ЛИНАК-200 для облучения детекторов электронами в диапазоне энергий 10 - 25 МэВ. Разработана методика и созданы стенды для измерения радиационной стойкости ППД на электронном пучке ускорителя ЛИНАК-200.
- Выполнены измерения радиационной стойкости сенсоров из высокоомного GaAs:Cr и двух типов кремниевых детекторов. Облучение образцов GaAs:Cr дозой 1,5 МГр показало, что удельное сопротивление стабилизируется на уровне $10^9 \text{ Ом} \times \text{см}$, вольтфарадные характеристики не зависят от дозы, эффективность сбора имеет выраженную зависимость от напряжения смещения и падает приблизительно на порядок. Хранение облученных образцов в течение года показало отсутствие отжига детекторов из GaAs:Cr при комнатной температуре.
- Измерена радиационная стойкость детекторов из высокоомного GaAs:Cr после облучения на пучках нейтронов реактора ИБР-2 в диапазоне $4 \times 10^{11} - 4 \times 10^{16} \text{ н} \times \text{см}^{-2}$. Экспериментально определен пересчетный коэффициент повреждений нейтронами с энергией 1 МэВ и электронами с энергией 21 МэВ для детекторов из GaAs:Cr. Полученный коэффициент (равный $0,25 \pm 0,11$) и

предложенные формулы для расчета падения сбора заряда в детекторах GaAs:Cr позволяют оценить падение сбора заряда при облучении электронами и быстрыми нейтронами. Это открывает возможность применения детекторов из высокоомного GaAs:Cr в современных экспериментах в физике высоких энергий.

- Матричные детекторы GaAs:Cr применены в прототипе калориметров BeamCal, являющегося наиболее радиационно нагруженной частью калориметра FCAL для будущих ускорителей ILC и CLIC. Выполнены успешные испытания детекторов GaAs:Cr на пучке вторичных электронов с энергиями от 2 до 4,5 ГэВ синхротрона DESY-II. Показана возможность применения детекторов GaAs:Cr в калориметре FCAL будущих коллайдеров ILC и CLIC.

Результаты работы были представлены на международных конференциях, рабочих совещаниях колаборации FCAL, на научных семинарах и рабочих совещаниях ЛЯП ОИЯИ и были опубликованы в научных статьях (A1-A7).

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Beam energy measurement on LINAC-200 accelerator and energy calibration of scintillation detectors by electrons in range from 1 MeV to 25 MeV / M. Krmar, Y. Teterev, A.G. Belov, S. Mitrofanov, S. Abou El-Azm, M. Gostkin, V. Kobets, U. Kruchonak, A. Nozdrin, S. Porokhovoy, M. Demichev // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research – 2019 – A.935 – p.83-88 – ISSN 0168-9002
- A2. Analysis of radiation effects on some properties of GaAs: Cr and Si sensors exposed to a 22 MeV electron beam / A. Torres, A. Leyva, A. Zhemchugov, U. Kruchonak, S. Abou-El-Azm, D. Ramos // Nucleus – 2018 – Vol. 64, p.4-9 – ISSN 0864-084X
- A3. Radiation hardness of GaAs:Cr and Si sensors irradiated by 21 MeV electron beam / U. Kruchonak, S. Abou El-Azm, K. Afanaciev, G. Chelkov, M. Demichev, M. Gostkin, A. Guskov, A. Leyva, P. Smolyanskiy, A. Tyazhev, N. Zamyatina, A. Zhemchugov // Journal of Instrumentation – 2020 – 15 C06003
- A4. Radiation hardness of GaAs: Cr and Si sensors irradiated by electron beam / U. Kruchonak et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research – 2020 – A 975 164204 – ISSN 0168-9002
- A5. Investigation of the radiation hardness of GaAs:Cr semiconductor detectors irradiated with fast neutrons at the reactor IBR-2 / U Kruchonak et al. // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2020 – 1690 (2020) 012042 – doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012042

- A6. Исследование радиационной стойкости полупроводниковых детекторов GaAs:Cr к облучению электронами и быстрыми нейтронами / В.Г. Кручинок // Научные исследования: итоги и перспективы – 2020 – том 1 №4 – ISSN 2713-220X.
- A7. Performance of fully instrumented detector planes of the forward calorimeter of a Linear Collider detector /H. Abramowicz et al. // Journal of Instrumentation – 2015 – Volume 10, P05009

Список литературы

1. Воробьев А. П. Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений на арсениде галлия / А. П. Воробьев // Дис. д-ра физ.-мат. наук : 01.04.23 – 2005 – Протвино, 169 с. РГБОД 71:06-1/192
2. Afanaciev, K. Investigation of the radiation hardness of GaAs sensors in an electron beam / K. Afanaciev, et al // JINST7 – 2012 – P11022
3. Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection / C. Leroy and P.G. Rancoita // World Scientific – 4th Edition – 2018 – ISBN-978-981-4603-18-8; ISBN.978-981-4603-19-5 – [Электронный ресурс]: <http://www.sr-niel.org/>
4. Krmar, M. The quality of megavoltage photon beams measured by the ratio of photoactivation and neutron capture yields / Krmar M. Teterev Yu., Belov, A.G., Mitrofanov S // Nuclear Instruments and Methods A901 – 2018 – 133-139.10.1016/j.nima.2018.06.028
5. J. Bregeon, Design and performance of the silicon strip tracker of the Fermi Large Area Telescope / J. Bregeon // JINST 6 (2011) C12043
6. Yamaguchi, M. Changes in the electrical properties of GaAs due to electron irradiation / M. Yamaguchi and C. Uemura // Journal of Applied Physics 57 (1985) 604
7. Pons, D. Irradiation-induced defects in GaAs / D. Pons and J. C. Bourgoin // Journal of Physics C: Solid State Physics 18 20 (1985) 3839
8. Булавин, М.В. Облучательная установка для исследования радиационной стойкости материалов на реакторе ИБР-2 / М.В. Булавин и др // Писма в ЭЧАЯ, т.12, №2 (193), с. 517 – 523

9. Zamyatin, N. I. Measuring Fluence of Fast Neutrons with Planar Silicon Detectors / N. I. Zamyatin, A. E. Cheremukhin, A. I. Shafronovskaya // Physics of Particles and Nuclei Letters – 2017 – Vol. 14, No. 5, pp. 762–777, ISSN 1547-4771
10. Abramowicz, H. Performance of fully instrumented detector planes of the forward calorimeter of a Linear Collider detector / H. Abramowicz et al // Journal of Instrumentation – May 2015 – Volume 10 P05009
11. Novgorodova, O. Characterisation and Application of Radiation Hard Sensors for LHC and ILC / O. Novgorodova // Ph.D.Thesis, Brandenburg Tech. U. (defense: Mar 28, 2013), DOI: 10.3204/DESY-THESIS-2013-052