

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2001-181

На правах рукописи
УДК 53.072.086.48

К-96

КУШПИЛЬ
Василий Валентинович



КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук Водопьянов
Александр Сергеевич

Кандидат физико-математических наук Шумбера Михал

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Сокол
Гарри Арсентьевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ефимов
Леонид Григорьевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физический институт Академии наук им. А. Г. Лебедева
(ФИАН)

Защита диссертации состоится "8" октября 2001 г.
в _____ час. на заседании диссертационного совета Д-720.001.02
Объединенного института ядерных исследований при Лаборатории
высоких энергий, Дубна, Московская область, конференц-зал
ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "28" августа 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

М.Ф. Лихачев

М.Ф. Лихачев

Актуальность проблемы

В современных экспериментах Физики Высоких Энергий (ФВЭ) широко применяются координатные Кремниевые Детекторы (КД). Высокое пространственное, временное и энергетическое разрешение КД позволяет решать задачи, ранее неразрешимые принципиально. Несмотря на широкое применение детекторов и освоение технологий их производства многими известными компаниями (Micron Semiconductor, Hamamatsu, Sintef, Canberra и др.), решение практических вопросов разработки, тестирования детекторов и особенностей их конкретного применения остаются физикам-экспериментаторам. С применением КД связано три основных этапа работ: проектирование и изготовление КД, его тестирование и применение в эксперименте. Еще до получения прикладного продукта (КД вместе с электроникой считывания) необходимо составить представление о действительной работоспособности КД.

Каждый новый эксперимент использует детектор, оптимизированный для решения определенных задач, а для его тестов применяется своя методика тестирования. Существование множества подходов к тестированию КД требует от исследователя дополнительно профессионального знания физики полупроводников. В тоже время, тестирование КД является достаточно простой задачей, и правильно выбранная, общая для разных типов КД, методика исследований позволила бы провести тестирование и сделать правильные выводы из анализа полученных данных даже специалисту в области полупроводниковых детекторов.

Возможность общего подхода к тестированию КД основана на том, что работа преобладающего большинства применяемых сейчас в ФВЭ КД базируется на использовании свойств P-N перехода. Подробно рассматривая явления в детекторах на основе P-N перехода, автор приводит примеры применения предлагаемой им общей методики оценки основных параметров при тестировании двух типов координатных КД: Микрополосковых (Микростриповых) Кремниевых Детекторов (МКД) и Кремниевых Дрейфовых Детекторов (КДД). Также предлагается модель для описания работы и методика исследования кремниевых лавинных фотодетекторов. Успешное развитие этих детекторов позволяет говорить о создании на их основе перспективных координатных детекторов нового типа.

Цель работы.

Цель работы - предложить универсальную методику для оценки параметров и исследования КД, позволяющую получать информацию, наиболее важную с точки зрения дальнейшего их применения. Акцент сделан на координатно-чувствительные КД, применяемые в физике высоких энергий.

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Предложен алгоритм оценки параметров координатного КД и разработана методика анализа статических характеристик тестовых структур и КД.
2. Проведено сравнение различных методов определения основных параметров КД (напряжения полного обеднения, рабочего напряжения), а также разработан алгоритм построения эквивалентной схемы КД.
3. Рассмотрены основные методы анализа физических процессов, протекающих в КД и особенности моделирования работы детектора совместно с электроникой считывания. Предложена методика коррекции данных измерений Вольт-Амперных Характеристик (ВАХ) и Вольт-Фарадных Характеристик (ВФХ).
4. Показаны основные особенности тестирования и применения радиального КДД в эксперименте на примере разработки автоматической системы калибровки триггера множественности для эксперимента CERES/NA45 (ЦЕРН-1999/2000).
5. Разработана система считывания для тестирования линейных КДД для эксперимента ALICE (ЦЕРН-2005), основанная на применении аналоговой памяти Switched Capacitors Array (SCA).
6. Рассмотрены особенности исследования Кремниевых Лавинных Фотодетекторов с Отрицательной Обратной Связью (КЛФООС) и разработана методика, позволяющая сравнивать разные типы этих детекторов по величине коэффициента ООС.
7. Построена простая модель, позволяющая проводить анализ данных измерений коэффициента усиления КЛФООС. Показана ее применимость для расчетов переходных характеристик и для анализа применения лавинного усилителя с ООС для КДД.

Научная новизна и практическая ценность работы

Научная новизна и практическая ценность работы обеспечивается тем, что впервые рассмотрен последовательный подход к оценке параметров и методике исследования координатных КД. Разработаны система оценки параметров КД, позволяющая теоретически построить его физическую модель (и эквивалентную схему) и система тестов произведенного детектора, позволяющая получать реальные физические параметры детектора (и его эквивалентной схемы), и таким образом, судить о качестве производства детектора. Эквивалентная схема позволяет проводить моделирование работы КД совместно с электроникой считывания и оптимизировать систему детектор-предусилитель.

Предложена методика анализа переходных характеристик P-N перехода, позволяющая определить время жизни неосновных носителей и температуру P-N перехода.

Впервые представлена простая модель работы КЛФООС. Предложенная модель позволяет проводить сравнительный анализ

КЛФООС, анализ переходных процессов при воздействии на детектор прямоугольного импульса фототока и оценочные расчеты при проектировании КЛФООС.

Практически все предложенные в работе методики и алгоритмы могут применяться при тестировании координатных КД не только для ФВЭ, но и для других областей их применения (медицина, биология, астрономия и т.д.).

Основные научные положения работы, выносимые на защиту

1. Предложен алгоритм оценки параметров координатного КД, позволяющий получить параметры детектора, необходимые для оптимизации электроники считывания.
2. Предложена методика измерений и анализа ВАХ и ВФХ, позволяющая получать наиболее полную информацию об основных параметрах КД, характеризующих его качество. Разработанная методика позволяет построить физическую модель КД, его эквивалентную схему, провести моделирование работы детектора совместно с электроникой считывания и, кроме того, оптимизировать шумовые характеристики системы Детектор-Предусилитель-Формирователь.
3. Показано, что слой алюминия на диоксиде кремния образует Металл-Окисел-Полупроводник (МОП) емкость, включенную параллельно емкости P-N перехода, а поверхностные состояния на границе алюминий-диоксид кремния и на границе алюминий-поликремний образуют емкость, включенную последовательно с P-N переходом. Наличие этих емкостей может существенно исказить ВФХ исследуемого детектора. Величина искажений ВАХ и ВФХ зависит от величины заряда, фиксированного в диоксиде кремния. Предложен метод коррекции ошибок, вводимых этими емкостями.
4. Установлено, что измерение переходной характеристики P-N перехода, а именно величины заряда перезарядки области обеднения, позволяет получать информацию о времени жизни неосновных носителей в этой области. Метод применим для экспресс-измерений температуры P-N перехода.
5. Разработана простая модель работы КЛФООС. Для применения модели необходимо построить эквивалентную схему замещения для исследуемого детектора. Параметры схемы получают, измеряя ВАХ и ВФХ КЛФООС. Эквивалентная схема позволяет проводить моделирование работы КЛФООС совместно с электроникой считывания программой SPICE. Приведены примеры применения теории для анализа переходных процессов в КЛФООС и расчет чувствительности предложенного нового типа КДД с лавинным усилителем.

Апробация работы

Методики и алгоритмы, предложенные в настоящей работе,

применялись при разработке, моделировании и тестировании детекторов для экспериментов CERES (NA45), ALICE, DISK. Основные результаты работы опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях, а также докладывались и обсуждались на Международных конференциях:

- 1) 4th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, Como, Italy, 3-7 Oct. 1994;
- 2) 7th International Wire Chamber Conference (WCC 95): Recent Trends and Alternative Techniques, Vienna, Austria, 13-17 Feb. 1995;
- 3) International School-Workshop RHIP'97, Prague, Czech Republic, 2-6 September, 1996;
- 4) International School-Workshop RHIP'98, Prague, Czech Republic, 1-5 September, 1997.
- 5) Международная математическая конференция ММТТ-14 "Математические методы в технике и технологиях", Смоленск, 5-8 Июня 2001.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 87 страниц текста, включая 31 рисунок и 5 таблиц. Список литературы содержит 107 наименований (кроме работ автора).

Содержание работы

Во введении показана актуальность работы и сформулированы основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе проведен краткий обзор и анализ работ, связанных с вопросами изготовления, моделирования и тестирования координатно-чувствительных детекторов на основе кремния. Обосновывается возможность общего подхода к исследованию изучаемых в работе КД. Рассматриваются вопросы, связанные с особенностями применения координатных детекторов в реальных экспериментах и приводится классификация проводимых исследований, предлагается и обосновывается алгоритм тестирования. Рассматриваются особенности фотодетекторов с внутренним усилением, их развитие за последние годы и приводится обоснование перспективности их применения в Физике Высоких Энергий (ФВЭ). На основе анализа приведенного обзора формулируются цели и задачи диссертации.

Во второй главе обсуждаются физические явления, лежащие в основе предлагаемого метода оценки параметров координатного детектора. Предлагается методика построения физико-топологической модели детектора и проводится расчет основных

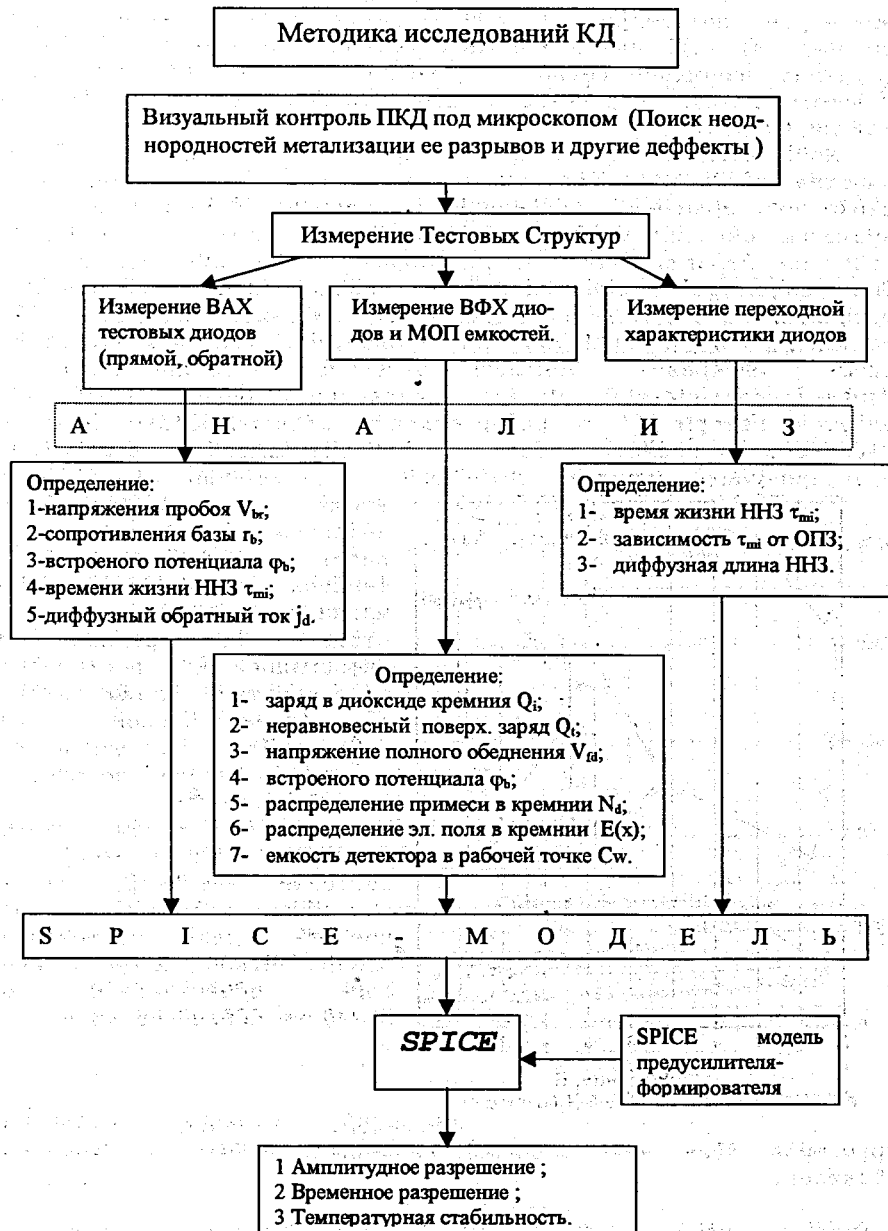


Рисунок 1 Алгоритм исследования и анализа данных тестовых структур.

параметров детектора. Рассматривается вопрос выбора типа тестовых структур для дальнейших измерений и анализа, с учетом получения наиболее важной информации о качестве детектора. Алгоритм исследования тестовых структур приведен на рисунке 1 в виде диаграммы.

Можно выделить три основных параметра, служащих критериями качества детектора практически во всех случаях: амплитудное разрешение, временное разрешение и координатное разрешение. Эти параметры связаны между собой, и поэтому выводы о качестве детектора делают, выяснив, насколько оптимально соотношение этих параметров. При оценочном моделировании координатно-чувствительного детектора необходимо: выяснить тип детектора, его топологию, тип кремния, тип используемых тестовых структур. Данные о материале и топологии детектора позволяют построить физико-топологическую модель детектора. Целью построения является информация о распределении электрического поля в детекторе. После этого, рассчитываются параметры, характеризующие качество детектора - разрешение, собственное

время формирования детектора и влияние на его работу внешних условий: температуры, электрических магнитных полей и т.д. В итоге мы располагаем информацией для построения эквивалентной схемы детектора (теоретической) и для проведения моделирования работы детектора совместно с электроникой.

Затем мы можем перейти к анализу данных измерения тестовых структур, чтобы получить параметры, необходимые для построения эквивалентной схемы детектора (практической) и провести сравнение двух

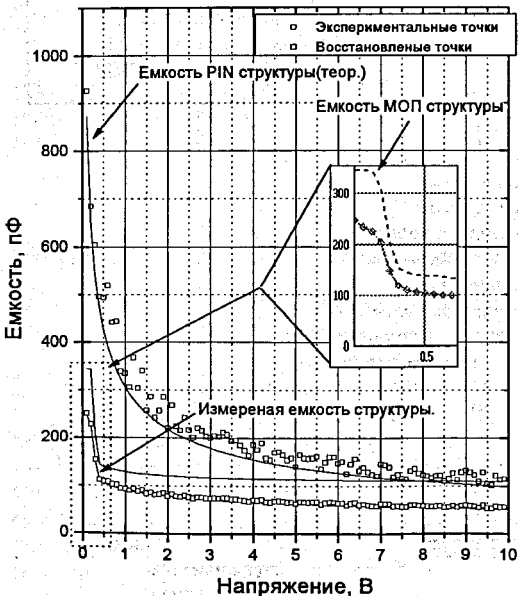


Рисунок 2 ВФХ тестовой PIN структуры ($S=1\text{cm}^2$)

моделей. Величины различия параметров этих двух моделей позволяют судить о качестве детектора.

В третьей главе подробно рассмотрены основные особенности методики исследования статических и динамических характеристик тестовых структур и предложен алгоритм анализа получаемых данных. Предложенная методика подходит для анализа многих типов

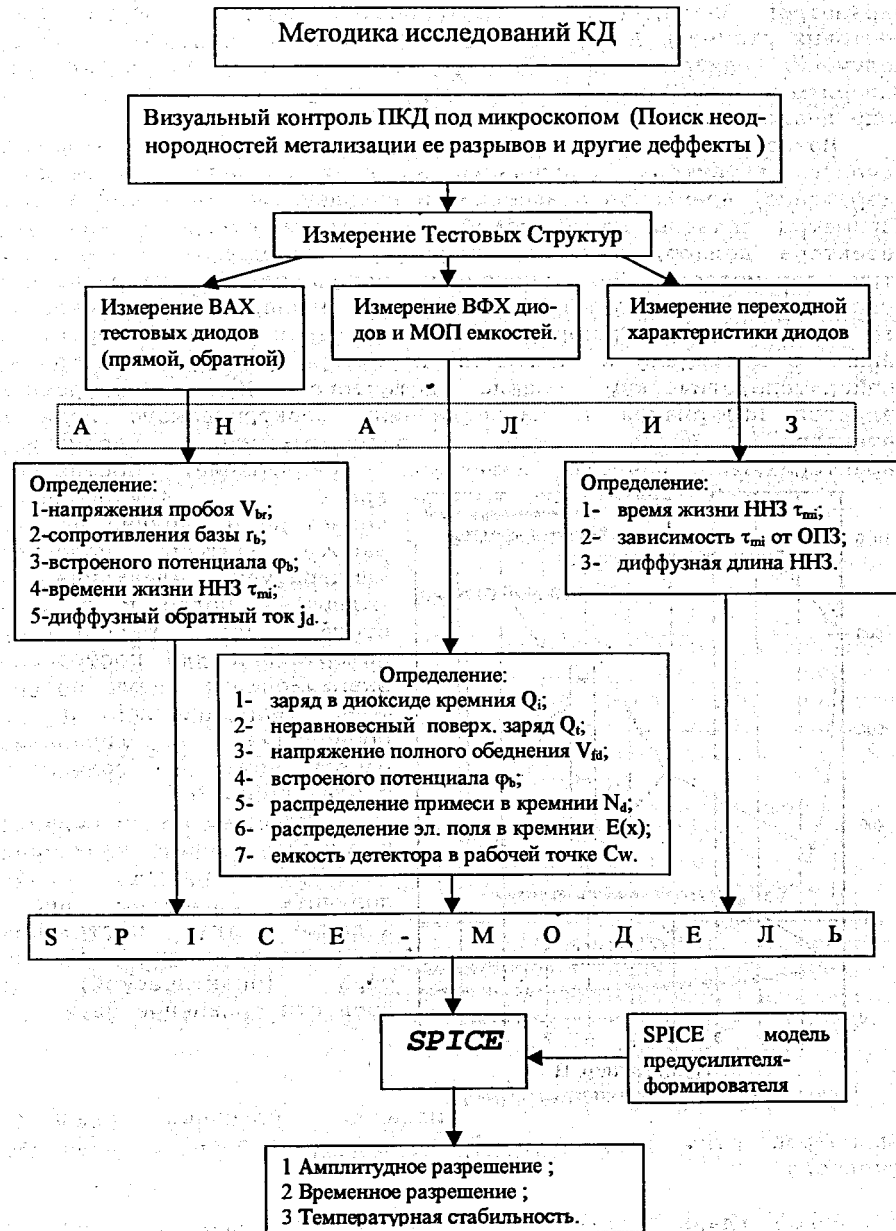


Рисунок 1 Алгоритм исследования и анализа данных тестовых структур.

параметров детектора. Рассматривается вопрос выбора типа тестовых структур для дальнейших измерений и анализа, с учетом получения наиболее важной информации о качестве детектора. Алгоритм исследования тестовых структур приведен на рисунке 1 в виде диаграммы.

Можно выделить три основных параметра, служащих критериями качества детектора практически во всех случаях: амплитудное разрешение, временное разрешение и координатное разрешение. Эти параметры связаны между собой, и поэтому выводы о качестве детектора делают, выяснив, насколько оптимально соотношение этих параметров. При оценочном моделировании координатно-чувствительного детектора необходимо: выяснить тип детектора, его топологию, тип кремния, тип используемых тестовых структур. Данные о материале и топологии детектора позволяют построить физико-топологическую модель детектора. Целью построения является информация о распределении электрического поля в детекторе. После этого, рассчитываются параметры, характеризующие качество детектора - разрешение, собственное

время формирования детектора и влияние на его работу внешних условий: температуры, электрических магнитных полей и т.д. В итоге мы располагаем информацией для построения эквивалентной схемы детектора (теоретической) и для проведения моделирования работы детектора совместно с электроникой.

Затем мы можем перейти к анализу данных измерения тестовых структур, чтобы получить параметры, необходимые для построения эквивалентной схемы детектора (практической) и провести сравнение двух

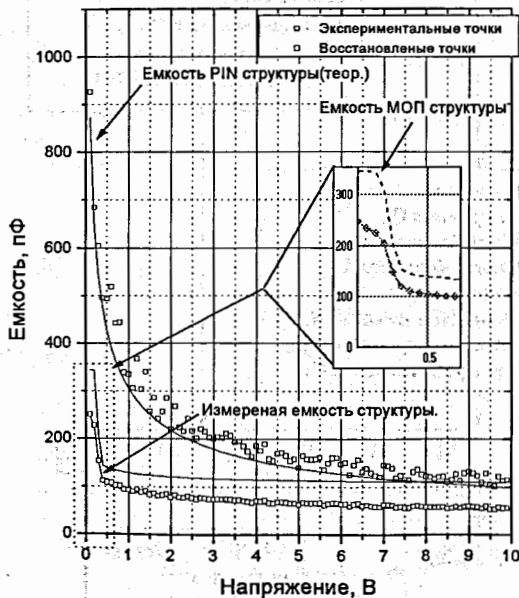


Рисунок 2 ВФХ тестовой PIN структуры ($S=1\text{cm}^2$)

моделей. Величины различия параметров этих двух моделей позволяют судить о качестве детектора.

В третьей главе подробно рассмотрены основные особенности методики исследования статических и динамических характеристик тестовых структур и предложен алгоритм анализа получаемых данных. Предложенная методика подходит для анализа многих типов

полупроводниковых детекторов и является универсальной. Оставшаяся часть главы посвящена нескольким специфическим методам тестирования и анализа данных для координатно-чувствительных детекторов. Рассматриваются подробно два типа детекторов: Микрополосковые Кремниевые Детекторы и Кремниевые Дрейфовые Детекторы.

Первый тест при исследовании детекторов - это измерение и анализ ВАХ (прямой и обратной) тестовых структур P-N переходов, расположенных по периферии детектора. Это делают для определения степени однородности при создании P-N переходов по всей площади детектора.

После измерения ВАХ, когда практически доказано, что структуры переходов созданы, необходимо получить информацию о профиле поля, создаваемого в детекторе при приложении напряжения смещения. Для этого проводят измерение и анализ ВФХ. При анализе ВФХ мы не только получаем полную информацию о распределении электрического поля в детекторе, но и ряд других важных с точки зрения оценки качества детекторов, параметров: напряжение полного обеднения, профиль распределения примеси.

При анализе ВФХ необходимо учитывать искажения, вносимые алюминием на оксиде кремния. Обычно измерения ВФХ искажены влиянием емкости, образованной из-за наличия поверхностных состояний на границе Al-SiO₂-Si. Показано, что эта емкость состоит из двух компонент. Одна из них возникает из-за равновесных состояний на границе Al-SiO₂ (Al-Si_x-Si) и включена последовательно емкости перехода, а другая представлена емкостью Al-SiO₂-Si слоя; и включена параллельно емкости перехода. На рисунке 2 показано влияние этих емкостей на общую ВФХ. Приведен пример восстановления реальной зависимости на основе данных по измерению ВФХ МОП структуры.

Корректируя влияние паразитных емкостей, можно существенно повысить точность получаемой ВФХ и получить на ее основе близкое к реальному распределение поля в структуре. При анализе ВФХ КД сложной топологии, необходимо учитывать искажения за счет влияния краевых эффектов.

Одним из важных параметров полупроводниковых детекторов является Время Жизни Неосновных Носителей (ВЖНН). Этот параметр определяет предельно достижимую чувствительность детектора. Грубую оценку ВЖНН можно получить из ВАХ. Но в физике полупроводников существует простой метод измерения ВЖНН. Автор предлагает использовать его на тестовых структурах с P-N переходом. Метод основан на измерении заряда при переключении перехода с прямого направления на обратное. При этом измеряется время жизни в окрестности металлургической границы перехода, т.е. практически у поверхности.

Затем приступаем к тестам свойств, важных с точки зрения дальнейшего применения КД. Наиболее важно для КД проверить качество встроенного делителя напряжения на N⁺ и P⁺ сторонах, а для МПД - сопротивление смещения и отсутствие замыкания стрипов на N стороне. В работе рассмотрены источники ошибок при измерениях сопротивлений в случае МКД и КДД. После проведения

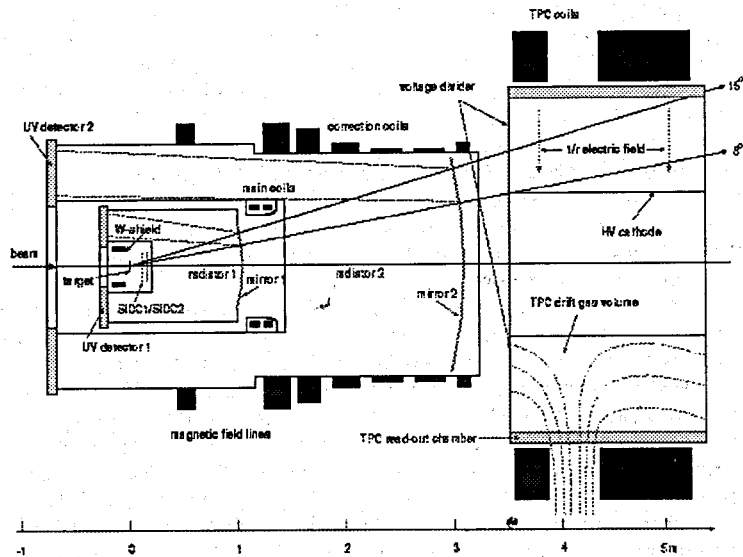


Рисунок 3. Схема детектора применявшаяся в эксперименте CERES/NA45 в 1999-2000гг.

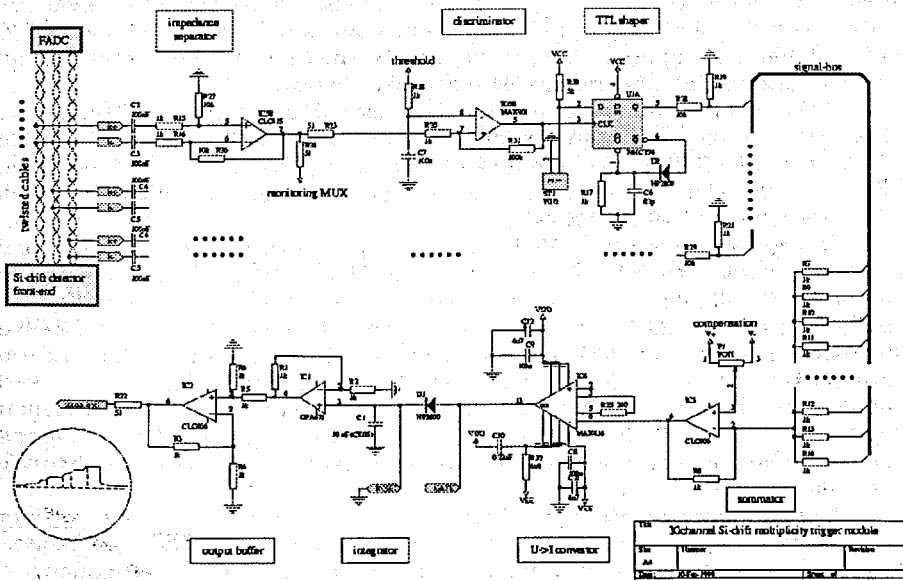


Рисунок 4. Блок схема электроники триггера множественности применявшаяся в эксперименте CERES/NA45 в 1999-2000гг.

работоспособности, а также методы калибровки и контроля в эксперименте.

В четвертой главе приведен пример практического использования радиального КДД в качестве триггера множественности в реальном физическом эксперименте CERES (NA45), проводимом в ЦЕРН. Описана автоматическая измерительная установка для калибровки линейности триггера множественности. Представлены результаты исследований линейных КДД для эксперимента ALICE (ЦЕРН) и описана система считывания, на основе Switched Capacitors Array (SCA), предназначенная для тестов этих детекторов.

Иллюстративно рассмотрена физическая картина явлений в высокотемпературной ядерной материи, исследуемой в указанных экспериментах. Оба эксперимента направлены на поиск данных, подтверждающих образование кварк-глюонной фазы при взаимодействии тяжелых ионов. Эксперимент NA45/CERES исследует образование электрон-позитронных (дилептонных) пар в протон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях. Лептоны, образовавшиеся в горячей ядерной материи, практически без искажений своих характеристик вылетают наружу и несут информацию обо всех стадиях эволюции ядерной материи. Теория предсказывает, что наиболее чувствительными к наличию кварк-глюонной фазы должны быть дилептоны с массой < 1.5 ГэВ, рождающиеся вблизи центра масс системы. Очень сложно выделить лептоны на огромном фоне ($\sim 10^6$) рождающихся адронов. Кроме того, необходимо знать число адронов, сопровождающих рождение лептонов, так как в эксперименте исследуется относительный выход дилептонов. Число адронов необходимо знать также для отбора событий по прицельному параметру столкновения, так как образование горячей ядерной материи ожидается при центральных столкновениях и не должно происходить при периферических процессах.

Использование легких частиц в качестве зонда состояния ядерного вещества в процессе его эволюции после соударения имеет преимущество в том, что ядерное вещество практически прозрачно для лептонов. Следовательно, исследуя их рождение, мы можем получать информацию практически во всем временном интервале взаимодействия, происходящего в результате столкновения ядер. С другой стороны, детектирование лептонов затруднено в связи с тем, что легкие частицы имеют большое рассеяние в среде и, кроме того, поскольку при ядерных столкновениях появляется много дельта электронов, то необходимо продумать механизм их режекции. Для устранения рассеяния в мишени в эксперименте CERES мишень разделяют. Режекция дельта электронов обеспечивается за счет применения двух КДД. Для выделения центральных соударений необходим триггер. Это может быть, например, ZDC (Zero Degree Calorimeter). Но не менее важно точно определять вершины событий для дальнейшей кинематической обработки. К тому же желательно размещать

детектор как можно ближе к мишени и при том его влияние должно быть минимальным.

Наиболее подходящим кандидатом оказался КДД. Во-первых, радиальный КДД наиболее соответствует условиям проводимого эксперимента, а использование аналоговой информации с этого детектора позволяет создать совершенный триггер множественности. Во-вторых, он дешевле МПД или пиксельного детектора со сравнимым разрешением. Добавление еще одного КДД позволяет эффективно избавиться от дельта электронов (они практически все рассеиваются в слое вещества первого КДД) и улучшить точность определения вершины события.

Можно сказать, что именно необходимость более точного определения множественности адронного сопровождения и необходимость иметь более точный трекер привела к использованию двух дрейфовых детекторов. Были развиты алгоритмы, позволившие проводить восстановление вершины взаимодействия и точно определять множественность заряженных частиц. Наличие двух детекторов (Рисунок 3) позволило получить прекрасный трекер для всех исследуемых заряженных частиц, а это особенно важно при проведении исследований с адронной составляющей, так как выбранная система радиального КДД является наиболее точным детектором для определения угловых характеристик треков. Блок схема триггера множественности применяемого в течение сеансов в 1999-2000 гг. показана на рисунке 4.

Эксперимент ALICE готовящийся на LHC (ЦЕРН), ориентирован на изучение взаимодействия тяжелых ионов при энергиях ~5.5 ТэВ. Множественность заряженных частиц, рожденных в центральных Pb-Pb взаимодействиях, ожидается порядка ~8000 на единицу скорости. Подобная множественность диктует высокую разрешающую способность для детекторов и их оптимальное расположение. Inner Trackig System (ITS) ALICE будут составлять шесть цилиндрических слоев кремниевых детекторов, обеспечивая идентификацию частиц и трекинг, определение первичных и вторичных вершин для реконструкции процессов распада. Необходимость получить высокое двухкоординатное разрешение (лучшее чем 40 микрон) для КДД определило то, что их в ITS два слоя. Для проверки технологии партия линейных КДД была разработана группой Института Ядерной Физики в Ржеже. Топология детекторов, результаты исследований и описание системы считывания КДД представлены в работе. КДД прошли экспериментальное тестирование на SP (ЦЕРН) в 1997-1999гг, в настоящее время исследуются в лаборатории Ржежа. Накопленные результаты помогут в дальнейшем при работе с большими партиями КДД, производимых группами коллаборации ALICE из Италии.

Пятая глава посвящена методике исследований нового типа полупроводникового детектора с внутренним усилением и локальной отрицательной обратной связью [1]. Приводится простая модель работы детекторов этого типа. Для реального фотодетектора строится эквивалентная схема замещения, полученная в результате

экспериментального исследования детектора. Предлагается методика исследований и анализа. Как пример применения модели приводится расчет нарастания фронта сигнала и сравнение с экспериментальными данными. Представлен проект нового вида КДД с внутренним лавинным усилителем и расчет его основных характеристик.

В основе работы КЛФД лежит явление ударной ионизации в полупроводниках. Суть явления заключается в том, что при движении электронов (дырок) в достаточно высоком электрическом поле в полупроводнике (для Si при $E > 3 \cdot 10^5$ В/см) электроны (дырки) могут приобрести энергию, достаточную для создания дополнительных электронно-дырочных пар при взаимодействии с кристаллической решеткой кремния. Эти электронно-дырочные пары в свою очередь могут создавать дополнительные электронно-дырочные пары и т.д., что приводит к лавинообразному нарастанию их количества. При этом в системе действует положительная обратная связь, что приводит к нестабильности системы. Это существенно затрудняет практическое использование явления ударной ионизации для создания фотоприемников с внутренним усилением. Как показали физики из ИЯФ (Москва), существует возможность введения в КЛФД ООС. Физическая сущность предложенного способа введения в КЛФД локальной ООС состоит в создании определенной структуры Metal-Resist-Semiconductor (MRS), в которой лавинообразование подавляется за счет уменьшения напряженности электрического поля в области лавинообразования в результате локального уменьшения напряжения на P-N переходе. Было показано [4], что процессы протекания тока в MRS структуре хорошо описывает эквивалентная схема, представляющая собой соединенные параллельно сопротивление обратной связи $R_{\text{об}}$ и емкость обратной связи $C_{\text{об}}$, включенные последовательно с P-N переходом КЛФД к источнику напряжения смещения V . Будем рассматривать КЛФД как преобразователь фототока в ток с коэффициентом передачи M . Это коэффициент лавинного усиления и для его определения используется формула Миллера:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V - i \cdot R_{\text{об}}}{V_{\text{бр}}} \right)^n} \quad (1.1)$$

Здесь i - ток в цепи КЛФД, $V_{\text{бр}}$ - напряжение пробоя и экспериментально подбираемый параметр. Предположим, что $n=1$ и, что $M_0 = 1 / (1 - (V/V_{\text{бр}}))$ - коэффициент лавинного усиления при отсутствии ООС. Тогда выражение (1.1) можно переписать в известной форме для коэффициента передачи системы с ООС:

$$M = \frac{M_0}{1 + \beta \cdot M_0} \quad (1.2)$$

При этом $\beta = \frac{i \cdot R_{\text{об}}}{V_{\text{бр}}}$, i - ток, протекающий через КЛФД.

Полученное выражение описывает простую модель лавинного детектора. В случае произвольного значения n выражение (1.1)

можно записать в виде (1.2), если $M_0 = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_{br}}\right)^n}$, и коэффициент

обратной связи β в виде:

$$\beta(V) = \frac{V^n - (V - V_{fb})^n}{V_{br}^n} \quad (1.3)$$

В квазистационарном случае (т.е. когда влияние емкости C_{fb} пренебрежимо) напряжение обратной связи $V_{fb} = i \cdot R_{fb} = i_0 \cdot M(V) \cdot R_{fb}$ (i_0 - начальный фототок). Модель позволяет рассчитать с хорошей точностью переходную характеристику детектора.

На рисунке 5 показан пример расчета переходного процесса и экспериментальные данные в случае воздействия на КЛФДОС прямоугольного импульса фототока.

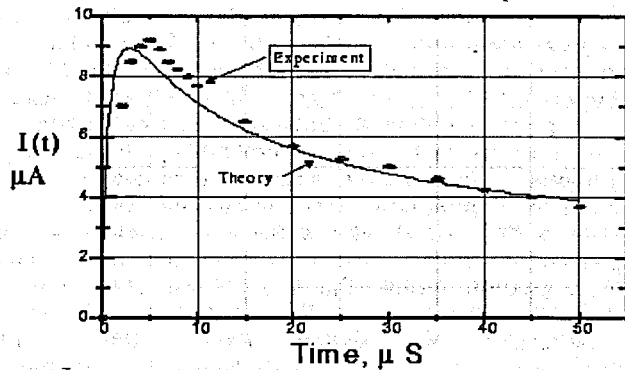


Рисунок 5. Непрерывной линией показан результат расчета отклика детектора на прямоугольный импульс фототока. Точки соответствуют экспериментальным данным полученным при измерении фотоотклика детектора.

экспериментального исследования детектора. Предлагается методика исследований и анализа. Как пример применения модели приводится расчет нарастания фронта сигнала и сравнение с экспериментальными данными. Представлен проект нового вида КДД с внутренним лавинным усилителем и расчет его основных характеристик.

В основе работы КЛФД лежит явление ударной ионизации в полупроводниках. Суть явления заключается в том, что при движении электронов (дырок) в достаточно высокоэлектрическом поле в полупроводнике (для Si при $E > 3 \cdot 10^5$ В/см) электроны (дырки) могут приобрести энергию, достаточную для создания дополнительных электронно-дырочных пар при взаимодействии с кристаллической решеткой кремния. Эти электронно-дырочные пары в свою очередь могут создавать дополнительные электронно-дырочные пары и т.д., что приводит к лавинообразному нарастанию их количества. При этом в системе действует положительная обратная связь, что приводит к нестабильности системы. Это существенно затрудняет практическое использование явления ударной ионизации для создания фотоприемников с внутренним усилением. Как показали физики из ИЯФ (Москва), существует возможность введения в КЛФД ООС. Физическая суть предложенного способа введения в КЛФД локальной ООС состоит в создании определенной структуры Metal-Resist-Semiconductor (MRS), в которой лавинообразование подавляется за счет уменьшения напряженности электрического поля в области лавинообразования в результате локального уменьшения напряжения на P-N переходе. Было показано [4], что процессы протекания тока в MRS структуре хорошо описывает эквивалентная схема, представляющая собой соединенные параллельно сопротивление обратной связи R_{fb} и емкость обратной связи C_{fb} , включенные последовательно с P-N переходом КЛФД к источнику напряжения смещения V . Будем рассматривать КЛФД как преобразователь фототока в ток с коэффициентом передачи M . Этот коэффициент лавинного усиления и для его определения используется формула Миллера:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V - i \cdot R_{fb}}{V_{br}}\right)^n} \quad (1.1)$$

Здесь i - ток в цепи КЛФД, V_{br} - напряжение пробоя и экспериментально подбираемый параметр. Предположим, что $n=1$ и, что $M_0 = 1 / (1 - (V/V_{br}))$ - коэффициент лавинного усиления при отсутствии ООС. Тогда выражение (1.1) можно переписать в известной форме для коэффициента передачи системы с ООС:

$$M = \frac{M_0}{1 + \beta \cdot M_0} \quad (1.2)$$

При этом $\beta = \frac{i \cdot R_{fb}}{V_{br}}$, i - ток, протекающий через КЛФД.

Полученное выражение описывает простую модель лавинного детектора. В случае произвольного значения n выражение (1.1)

Основные результаты работы опубликованы в следующих изданиях:

[1] V.V. Kushpil at al., MRS SILICON AVALANCHE DETECTORS WITH NEGATIVE FEEDBACK FOR TIME-OF-FLIGHT SYSTEMS.

Prepared for 4th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, Como, Italy, 3-7 Oct. 1994. Published in Nucl. Phys. Proc. Suppl. 44: 402-405, 1995.

[2] V. Kushpil at. al, SILICON AVALANCHE DETECTORS WITH NEGATIVE FEEDBACK AS DETECTORS FOR HIGH-ENERGY PHYSICS.

Prepared for 7th International Wire Chamber Conference (WCC 95): Recent Trends and Alternative Techniques, Vienna, Austria, 13-17 Feb. 1995. Published in Nucl. Instrum. Meth. A367: 212-214, 1995.

[3] V. Kushpil at al., ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF METAL-RESISTIVE LAYER-SILICON (MRS) AVALANCHE DETECTORS.

Prepared for 4th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, Como, Italy, 3-7 Oct. 1994. Published in Nucl. Phys. Proc. Suppl. 44: 397-401, 1995

[4] V.V. Kushpil, ON POSSIBILITY OF USING THE AVALANCHE DETECTOR WITH INTRINSIC NEGATIVE FEEDBACK FOR HEAVY ION PHYSICS.

Prepared for International School-Workshop RHIP'97, Prague, Czech Republic, 2-6 September, 1996. Published in Czech. J. Phys. Vol.47 (1997) No. 9, 905-912

[5] V.V. Kushpil, AVALANCHE AMPLIFICATION IN SILICON DRIFT DETECTORS.

Prepared for International School-Workshop RHIP'98, Prague, Czech Republic, 1-5 September, 1997. Published in Czech. J. Phys. Vol. 48 (1998), Suppl.S1, 97-103

[6] Kouchpil V.V., Kouchpil S.A., IMPULSE METHOD FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF SILICON DETECTOR, JINR Rapid Communication, 3(95), 1999

[7] Sonski, J.; Hollander, R.W.; van Eijk, C.W.E.; Sarro, P.M.; Kouchpil V., MULTI-ANODE SAWTOOTH SDD FOR X-RAY SPECTROSCOPY FABRICATED ON NTD WAFERS, IEEE Trans. Nucl. Sci. 48 (3-part 1), June 2001, pp. 258-261.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 августа 2001 года.