

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2005-193

На правах рукописи
УДК 539.1.074.55

КУШПИЛЬ
Светлана Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
КРЕМНИЕВЫХ ДРЕЙФОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ALICE**

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2005

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, и в Институте ядерной физики Академии наук Чешской Республики, Ржеж

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Водопьянов
Александр Сергеевич
Шумбера Михал

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
доктор технических наук,
профессор

Тяпкин
Игорь Алексеевич
Мустафаев
Гасан Абакарович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики им.
Д.В.Скобельцына МГУ (Москва)

Защита диссертации состоится "___" _____ 2006 г. в ___ час.
на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при
Лаборатории высоких энергий Объединенного института
ядерных исследований, Дубна, Московская область, конференц-
зал ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан

"___" _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 В.А.Арефьев

Актуальность проблемы

Эксперимент ALICE является крупнейшим специализированным экспериментом, направленным на исследование структуры ядерной материи при столкновении ультрарелятивистских тяжелых ионов на строящемся Большом адронном коллайдере (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). На ускорителе БАК будут получены пучки ядер с рекордными энергиями 2,7 ТэВ/нуклон. Основной задачей установки ALICE будет исследование свойств кварк-глюонной плазмы (КГП) - состояния ядерной материи, образующегося при сверхвысоких температурах и плотностях. Предполагается, что на установке будут обнаружены и исследованы свойства, предсказываемые теоретическими моделями, такие как: деконфайнмент и восстановление киральной симметрии. Исследования будут важны не только для проверки Стандартной модели и поиска новых эффектов, но и для изучения современных проблем космологии и астрофизики.

Впервые в лабораторных условиях будет достигнута энергия свыше 1000 ТэВ в системе центра масс, которая раньше была доступна только при исследованиях с космическими лучами. Такие энергии позволят вести поиск рождения новых сверхтяжелых частиц. На установке будут измерены сечения рождения различных адронов и их множественность в центральных столкновениях. Исследование лептонной компоненты позволит определить выход кварк-антикварковых систем чармония и боттомония, которые важны при поиске КГП. Будут изучаться такие задачи, как: усиление рождения странности, подавление выхода чармония, свойства эллиптических потоков, особенности в процессах адронизации, эффект подавления струй в области больших поперечных импульсов и т.д.

Все перечисленные выше процессы изучались и изучаются при меньших энергиях, чем ожидается на БАК. По сравнению с работающим комплексом Брукхейвенской Национальной Лаборатории США, где исследования нового состояния ядерной материи ведутся с 2000 г. на коллайдере ядер RHIC, увеличение энергии будет более, чем в 25 раз. Поэтому возможно проявление принципиально новых явлений в ядерной материи и физике элементарных частиц.

По плану установка ALICE должна начать работать в 2007 г., когда будут получены первые пучки на ускорителе БАК. В настоящее время создается многоцелевой детектор, состоящий из отдельных подсистем. Задача обеспечения максимального трекового разрешения отведена уникальной Внутренней трековой системе (BTC), два внутренних слоя которой составляют Кремниевые дрейфовые детекторы (КДД).

Окончательный прототип КДД, разработанный для ALICE, является результатом обширной исследовательской работы, начатой в 1992 в Национальном институте ядерной физики (Италия) и Институте ядерной физики Академии наук Чешской Республики в сотрудничестве с фирмой CANBERRA SEMICONDUCTOR и ICM/TESLA.

Данная работа отражает личный вклад автора, начиная с 1997 года, в получение экспериментальных данных с КДД и их детальный анализ в условиях непрерывного развития системы сбора данных и программного обеспечения. Анализ экспериментальных результатов позволяет проверить соответствие созданных КДД требованиям эксперимента ALICE.

КДД имеют существенные отличия от других типов используемых детекторов. Особенность КДД в том, что электрическое поле внутри детектора направлено параллельно плоскости детектора. Следствием этого является косвенное вычисление одной из координат по времени дрейфа заряда, возникающего при прохождении ионизирующего излучения через детектор до области сбора заряда.

С одной стороны, это позволяет существенно уменьшить количество каналов считывающей электроники, а с другой стороны усложняется алгоритм обработки информации, получаемой с КДД. Проблема связана не столько с увеличением числа вычислений, необходимых для получения координатной информации, а в большей степени с необходимостью коррекции ошибок, возникающих из-за изменения температуры КДД в течении эксперимента и из-за флуктуаций легирующей примеси в кремниевой пластине, из которой изготовлен детектор.

Поскольку с момента изобретения до настоящего времени КДД применялись практически лишь в нескольких экспериментах - E896 (ЛБНЛ), WA98(ЦЕРН), CERES-NA45(ЦЕРН), STAR(БНЛ) и к тому же не всегда успешно, накоплено недостаточное количество информации о поведении основных параметров КДД в экспериментальных условиях. Так, например, не была полностью решена проблема калибровки детектора в течение эксперимента и вопросы температурной коррекции; также недостаточно было исследовано влияние радиационных повреждений на основные параметры детектора. Если проанализировать историю применения КДД, то можно сделать следующие выводы:

Эксперимент E896 (ЛБНЛ 1996 г.) - для исследований рождения короткоживущих частиц (H^0 , гиперонов и анти-барионов) в Au-Au взаимодействиях на Alternating Gradient Synchrotron при импульсе 11,6 А GeV/c применяли несколько (15) слоев линейных КДД (6 x 6.2 см) с 240 анодами. Получены практически первые данные и разработаны основные алгоритмы обработки;

Эксперимент WA98 (ЦЕРН 1998 г.) - для исследований процессов рождения фотонов в Pb-Pb взаимодействиях при импульсах 158 А GeV/c, использовали радиальный КДД диаметром 10 см(4 дюйма) с центральным отверстием 15 мм, который входил в состав камеры (Plastic Ball) и был установлен на расстоянии 125 мм от мишени. Он должен был обеспечить регистрацию частиц в диапазоне псевдобыстрот 2,0-3,4. В этом эксперименте впервые столкнулись с проблемой фильтрации фона дельта-электронов и искажения координатной информации после воздействия радиации на детектор;

Эксперимент CERES-NA45 (ЦЕРН 1999 г.) - для исследований процессов рождения дилептонов с массой до 1,5 ГэВ в ядро-ядерных взаимодействиях Pb-Au при 160 А GeV/c и S-Au при 200 А GeV/c в качестве детектора множественности применялись два радиальных КДД. В эксперименте впервые наблюдалась быстрая деградация одного из детекторов, когда в течение нескольких часов ток через охранное кольцо возрос более чем в десять раз и детектор прекратил регистрировать частицы;

Эксперимент STAR (БНЛ 2000 г.) – решает задачи подобные ALICE, но при более низких энергиях. Впервые применяется многослойная цилиндрическая структура, составленная из 216 линейных КДД (5,62 x 7,05 см). Уже в начале эксперимента столкнулись с нестабильностью работы МОП-инжекторов (Металл-Оксид-Полупроводник) (в то время как инжекторы на P-N переходе работают нормально).

Суммируя перечисленные проблемы, перед автором были поставлены задачи:

1. Проверить надежность всех алгоритмов вычислений координат и коррекций ошибок до того как детектор будет собран и начнет работу в составе всей системы ALICE. Для этой цели в течении нескольких лет в ЦЕРН проводились эксперименты с КДД на пучках ускорителя SPS. Основные результаты, полученные при обработке экспериментальных данных, используются при создании алгоритмов восстановления треков всей системы детекторов, входящих в установку ALICE;
2. Провести анализ данных, полученных при исследованиях КДД для наклонных треков для углов вплоть до 45° – максимального угла, ожидаемого в ALICE (ранее такие исследования не проводились);
3. Провести анализ влияния радиационного облучения на работу КДД. Особое внимание уделить исследованиям работоспособности МОП-инжекторов и эволюции влияния неоднородностей легирования кремния на координатное разрешение;

Автор также участвовал в разработке программного обеспечения для контроля качества производимых детекторов и непосредственно в тестовых измерениях, связанных с отбором детекторов.

Актуальность данной работы определяется важностью создания как можно более точных алгоритмов обработки и коррекции ошибок при получении физических данных с КДД. Это в свою очередь определяет успешность использования этих детекторов в составе ВТС ALICE.

Цель работы

Цель настоящей работы – исследование свойств прототипов и рабочей версии КДД ALICE для доказательства соответствия их характеристик требованиям к внутренней трековой системе эксперимента ALICE.

В частности, исследовать координатное разрешение КДД при перпендикулярном и не перпендикулярном падении минимально ионизирующей частицы (МИЧ) на детектор и определить особенности восстановления координатной информации при влиянии искажающих факторов, таких как температура и неоднородности распределения легирующей примеси внутри объема кремниевой пластины, на которой изготовлен детектор. Исследовать влияние радиационной дозы, полученной детектором, на изменение его основных характеристик и определить пригодность предложенных процедур коррекции для облученного детектора.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Построена физическая модель КДД. С её помощью проведено моделирование работы КДД в различных условиях и конфигурациях электрического поля в детекторе.
2. Проведены лабораторные тесты партии детекторов, изготовленных в Чешской Республике, с целью отработки методики выбора детекторов с наилучшими параметрами для их дальнейшего исследования. Для нескольких детекторов проведены долговременные измерения температурной стабильности основных параметров с целью определения влияния основных внешних факторов (температура и влажность) на работу детектора.
3. Проведены исследования детекторов фирмы CANBERRA со считывающей электроникой на пионном пучке SPS в ЦЕРН при перпендикулярном и не перпендикулярном падении частиц на детектор.
4. Проведен анализ экспериментальных данных с помощью программного обеспечения, разработанного на базе пакета ROOT. Изучено координатное разрешение детекторов. Исследовано влияние неоднородности распределения легирующей примеси на разрешение детектора.
5. Проведен анализ данных с КДД после получения им эквивалентной дозы, которую детектор получит в установке за время в два раза большее планируемого времени работы ALICE, с целью исследовать изменение основных параметров детектора после облучения.

Научная новизна и практическая ценность работы

Впервые детально исследована и проанализирована работа КДД с электроникой окончательной версии, разработанных для эксперимента ALICE, на тестовых пионных пучках SPS, ЦЕРН. Впервые проведено сравнение разрешения КДД для частиц, попадающих в детектор перпендикулярно и не перпендикулярно плоскости детектора. Проведен анализ зависимости эффективности сбора заряда и размера кластера от угла наклона трека к плоскости детектора.

Впервые исследовано координатное разрешение и эффективность сбора заряда детектора при получении им дозы эквивалентной той, которая будет получена за 20 лет его работы на ускорителе БАК.

Был промоделирован сбор заряда в КДД, изготовленном в ЧР, с целью выбрать оптимальную конфигурацию электрического поля для повышения эффективности сбора заряда. Проведены долговременные измерения темнового тока детектора и исследована его зависимость от температуры. Показано существование случайных флуктуаций темнового тока для отдельных анодов. Флуктуации обусловлены перезарядкой ловушек на границе кремний - диоксид кремния.

Результаты и алгоритмы обработки применяются при создании программного обеспечения для анализа данных ALICE и также могут быть использованы в других областях применения КДД. Одним из дополнительных результатов проведенного анализа является методика, позволяющая с большой точностью определять неоднородности легирования кремния.

Основные научные положения работы, выносимые на защиту

1. Разработан и апробирован измерительный комплекс для отбора кремниевых дрейфовых детекторов. С помощью этого комплекса в лабораторных условиях проведено исследование характеристик КДД, изготовленных фирмами ICM, Прага и TESLA SEZAM. Дополнительным практическим результатом является применение комплекса для отбора детекторов по заказу эксперимента DISK на нуклотроне ОИЯИ в Дубне для детектора множественности. Первый детектор с электроникой считывания поставлен в ОИЯИ в 2001 г.;
2. На основе анализа экспериментальных данных о прохождении заряженной частиц наклонно к плоскости детектора в анодном направлении показано, что по сравнению со случаем перпендикулярных треков:
 - а) величина собираемого на анодах заряда увеличивается в зависимости от угла наклона трека и согласуется с геометрическими оценками;
 - б) координатное разрешение КДД в анодном направлении существенно улучшается для дрейфовых расстояний меньших 10 мм;
3. Экспериментально показано, что при накоплении радиационных дефектов в объеме КДД соответствующих 20 годам проведения эксперимента ALICE:
 - а) потеря заряда возрастает до 40 %, при этом большим временам дрейфа соответствуют большие потери заряда;
 - б) усиливается влияние токов утечки, что проявляется увеличением систематических отклонений измеряемой координаты (отклонения обусловлены изменением линейности встроенного делителя КДД и могут быть скорректированы);
 - в) координатное разрешение остается в пределах десятков микрон, что полностью удовлетворяет требованиям эксперимента ALICE.

Апробация работы

Результаты работы применялись для оценки и сравнения характеристик прототипов КДД и электроники считывания, разрабатываемых для эксперимента ALICE. Основные результаты опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях, а также докладывались и обсуждались на Международных совещаниях и конференциях, рабочих совещаниях эксперимента ALICE в ЦЕРНе, семинарах ОИЯИ и ОИЯ АН ЧР:

1. TIME'05, Workshop on Tracking In high Multiplicity Environments , Zürich, Switzerland, October 3-7, 2005
2. RNP-2005, VIII International workshop "Relativistic Nuclear Physics: From MeV to TeV", Dubna, Russia, May 23-28, 2005
3. ISHEPP-International Baldin Seminar of High Energy Physics Problems, Dubna, Russia, September 27- October 2, 2004
4. XLI International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio, Italy, January 26-February 2, 2003
5. International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV", Varna, Bulgaria, September 10-16, 2001
6. 10th Internal Workshop on Vertex Detectors, Brunnen, Switzerland, September 23-28, 2001
7. Quark Matter, International conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus collisions, Torino, Italy, May 15-22, 1999

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц текста, включая 90 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 59 наименований (кроме работ автора).

Содержание работы

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

В первой главе проведено краткое описание научной программы эксперимента ALICE[3] и экспериментальной установки. Детекторы установки Время-проекционная камера (ВПК) и Внутренняя трековая система (ВТС) должны обеспечить максимальное трековое разрешение для ожидаемой в эксперименте экстремальной плотности треков (вплоть до 8000 заряженных частиц на единицу псевдобыстроты). ВПК – это цилиндрический детектор с чувствительной областью радиусом от 90 см и до 250 см. Выбор минимального радиуса связан с возможностью разделения отдельных треков при максимальной загрузке детектора. Внешний радиус выбирался из необходимости обеспечить разрешение лучше 10 % по ионизационным потерям dE/dx .

На радиусах меньше 90 см и, следовательно, на больших плотностях треков, трековая реконструкция будет осуществляться с помощью ВТС, предназначенной для восстановления вершин событий и идентификации низкоэнергетичных частиц с высоким разрешением по импульсу.

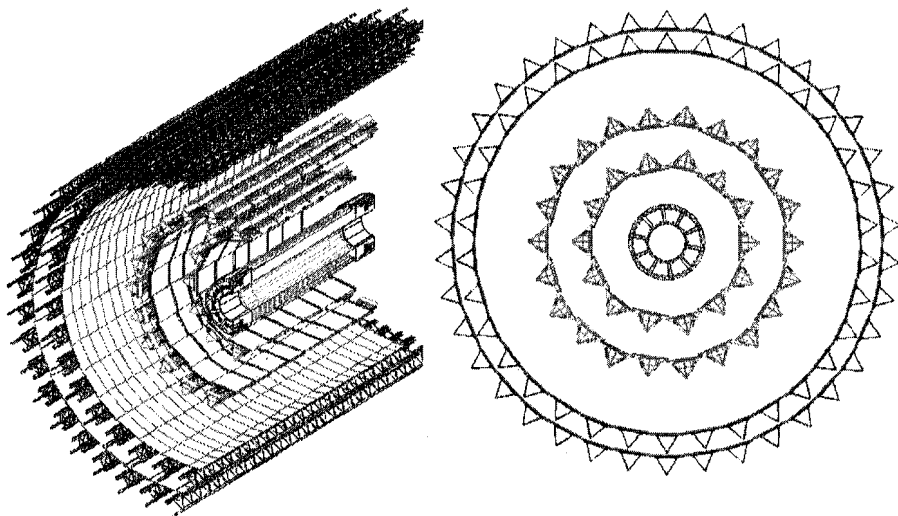


Рис.1. Схема Внутренней трековой системы

Конструктивно ВТС состоит из шести цилиндрических слоев кремниевых детекторов (Рис. 1). Так как плотность треков сильно меняется с радиусом, ВТС использует три разных технологии детекторов, особенностью которых является высокая гранулярность и высокая пространственная точность. Число слоев и их размещение оптимизировались, чтобы обеспечить максимальную эффективность восстановления треков. Внешний радиус ВТС определяется необходимостью согласования треков с ВПК, в то время как внутренний — это практически достижимый минимум, соизмеримый с диаметром пучка (3 см).

Из-за высокой плотности частиц (вплоть до 90 см^{-2}) четыре ближайших к пучку слоя детекторов должны иметь высокое пространственное разрешение и высокую эффективность регистрации.

С этой целью в первом и втором слое ВТС установлены быстрые Кремниевые пиксельные детекторы (КПД), далее в третьем и четвертом слоях установлены Кремниевые дрейфовые детекторы (КДД), разрешение которых должно достигать 30 мкм. Внешние два слоя, где плотность треков ниже 1 см^{-2} , состоят из двухсторонних кремниевых Микрополосковых детекторов (МКД). При сравнимом с МКД пространственном разрешении КДД имеют в два раза меньшее число каналов считывания, что позволяет при их использовании существенно уменьшить количество постороннего вещества вблизи вершины

взаимодействия, что следовательно снижает вероятность взаимодействия вторичных частиц. Именно поэтому КДД установлены ближе к первичной вершине.

Во второй главе обсуждаются физические принципы, лежащие в основе работы КДД. Подробно рассмотрена конструкция КДД, созданного для эксперимента. Полупроводниковые дрейфовые детекторы являются сложными электронными устройствами, разработка которых практически невозможна без моделирования физических свойств. Большое значение играет моделирование и для лучшего понимания работы КДД и для их оптимального использования. Основой для работы КДД является наличие электрического поля в объеме детектора. Для партии прототипов детекторов, произведенных в Чешской Республике фирмами ICM, Прага и TESLA, SEZAM[10] было важно определить наилучшее распределение напряжений на фокусирующих электродах для обеспечения наиболее эффективного сбора заряда на анодах. Для поиска наилучшего варианта смещения производилось моделирование электрического поля в области вблизи анодов при помощи программы POSIBIN. Приводятся примеры конфигураций поля и траекторий движения электронов для разных напряжений на электродах вблизи анодов.

Для проверки результатов моделирования и отбора детекторов с наилучшими параметрами была собрана измерительная установка (Рис. 2), которая позволила измерять некоторые из важных свойств детектора (скорость дрейфа, эффективность сбора заряда). Практическая ценность установки была дополнительно подтверждена тем, что с ее помощью был отобран наилучший детектор для установки DISK [10] (для измерений на Нуклотроне в ОИЯИ в Дубне). Установка и программное обеспечение к ней используется и в настоящее время для исследования КДД с целью более глубокого понимания законов их работы [11].

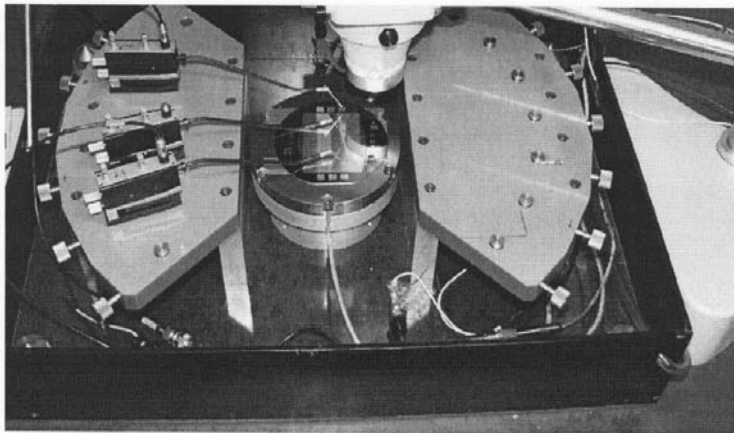


Рис.2 Фотография измерительной установки и детектора

В третьей главе описана экспериментальная установка и электроника для тестов КДД на пучке ускорителя SPS в ЦЕРНе. Подробно представлена процедура обработки данных на примерах экспериментальных измерений нескольких КДД с перпендикулярными и наклонными треками [1-2].

Детекторы фирмы CANBERRA были протестированы на пучках пионов с импульсом 100 [5-7] и 120 ГэВ/с. Рабочая версия КДД (Рис. 3) была произведена на пластине с толщиной 12,5 см из трансмутационно-легированного нейтронами кремния с удельным сопротивлением 3 КОм/см и толщиной 300 мкм. Активная площадь КДД - 7,0 x 7,5 см², на каждой половине которой расположены 292 катода для создания дрейфового поля, с шагом 120 мкм и 256 анодов, собирающих заряд, с шагом 294 мкм. Отношение чувствительной площади детектора к общей его площади равно 88 %.

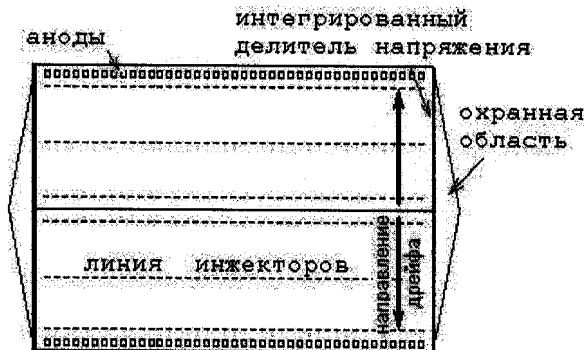


Рис.3. Схема кремниевого дрейфового детектора ALICE

Для обеспечения точности восстановления трека КДД помещались на пучке внутри телескопа, состоящего из пяти пар односторонних микрополосковых детекторов с разрешением 5 мкм. Большинство данных было получено для одиночных треков, перпендикулярных плоскости КДД. Часть данных была измерена для наклонных треков. Результаты сравнения характеристик КДД приводятся в главах 3 и 4.

Алгоритм обработки данных включает в себя температурные коррекции скорости дрейфа и коррекции координаты с учетом влияния неоднородностей кремния. Важное значение имеет коррекция данных с учетом особенностей работы электроники в каждом тесте на пучке (калибровка телескопа, фильтрация шума, подбор времени формирования сигнала детектора, определение пьедесталов сигнала).

В эксперименте ALICE требуется координатное разрешение в обоих r и z направлениях (соответственно направление дрейфа и направление вдоль линии анодов) порядка нескольких десятков мкм. Следовательно, необходимо измерить скорость дрейфа с точностью приблизительно 0,1 %, что соответствует изменениям температуры 0,1 К°.

Для этой цели КДД оборудован МОП-инжекторами (Металл-Оксид-Полупроводник), которые вводят контролируемое количество заряда в объем детектора на точно известном расстоянии от анодов. Измерение времени между импульсом инжектора и поступлением заряда к анодам обеспечивает калибровку скорости дрейфа.

Результаты тестов на пучке показали достаточно высокую стабильность работы большинства МОП-инжекторов при различных условиях тестов. Это позволило рассчитать скорость дрейфа в зависимости от времени проведения эксперимента и выполнить температурную коррекцию. Скорость дрейфа v может быть выражена, как функция подвижности электронов μ_e и приложенного электрического поля E как: $v = \mu_e E$. При типичном значении поля дрейфа 600 В/см, скорость дрейфа будет порядка 7 мкм/нс (при температуре 300°K).

Дальнейший анализ данных направлен на изучение распределений амплитуды и размера кластера, реконструируемого от электронного облака, от времени дрейфа. Эти характеристики помогают понять сбор заряда в КДД. На рисунке 4.а показана зависимость наиболее вероятной величины заряда от времени дрейфа для перпендикулярных и наклонных на 22° и 36° треков. Собранный заряд уменьшается с увеличением времени дрейфа. Потеря заряда уже наблюдалась при лабораторных тестах. Необходимость понять причину явления обусловила выбор серии КДД для измерений на пучке SPS. Причина потерь заряда связана с существованием уровней ловушек в кремнии. Ловушки появляются из-за наличия случайных примесей и дефектов при технологическом цикле производства кремния и при производстве самого детектора. Сравнение результатов тестов на пучке с данными производственного цикла позволяет определить причину загрязнения кремния и корректировать проблему в последующем производстве детекторов. Характер потери заряда одинаков для перпендикулярных и наклонных треков, при этом величина заряда обратно пропорциональна косинусу угла наклона, что соответствует увеличению длины прохождения частицы в кремнии. Как следствие увеличивается размер кластера. На рисунке 4.б приведено отношение величины заряда для перпендикулярных и наклонных треков. Несмотря на флуктуации – это константа, которая не зависит от времени дрейфа и согласуется с величиной косинуса угла наклона трека.

В четвертой главе приведены результаты анализа данных, полученные в тестах КДД на ускорителе SPS, ЦЕРН. Получены значения координатного разрешения КДД с рабочей версией электроники. Проведено сравнение координатного разрешения для случаев перпендикулярных и наклонных треков.

Трудоемкой задачей является коррекция систематических отклонений координаты, обнаруженных впервые в ранних тестах в 1997 г.[4]. Отклонение измеренной координаты прохождения частицы через детектор частицы вызваны неоднородностями легированного кремния. Эти неоднородности влияют на разрешение КДД, т.к. индуцируют паразитное электрическое поле, компоненты которого изменяют траекторию движения электронного облака к анодам.

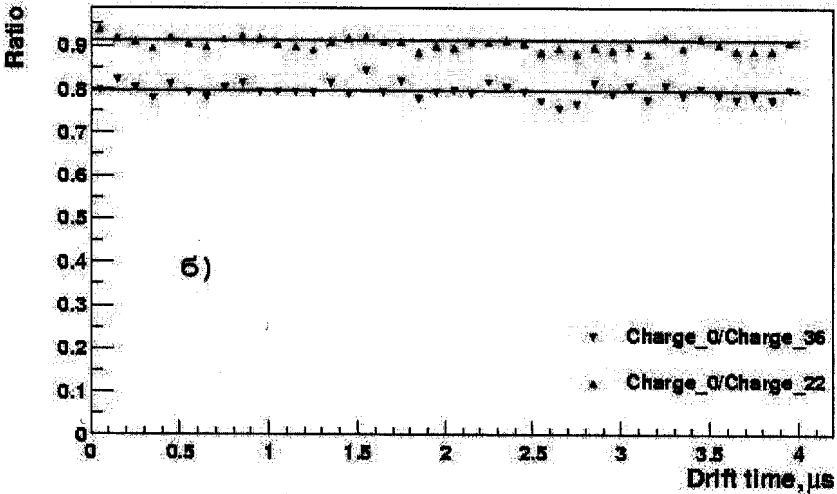
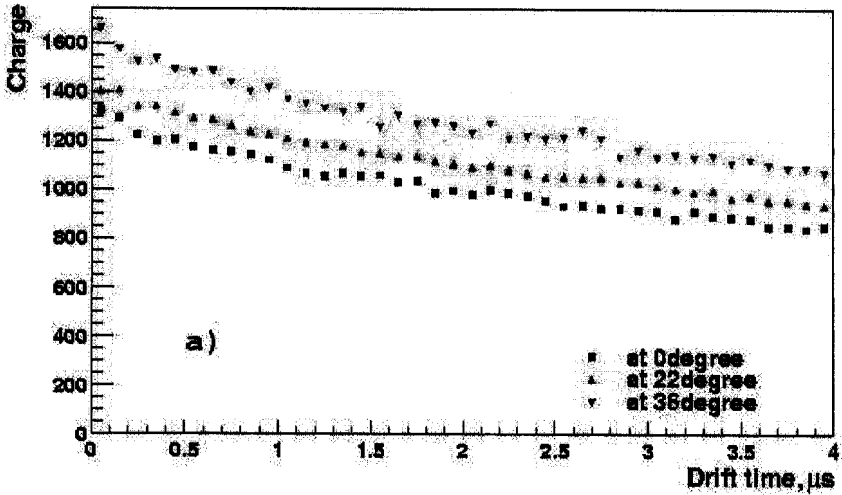


Рис. 4.а) зависимость величины заряда от времени дрейфа
 б) отношение величины заряда для перпендикулярных и наклонных треков как функция времени дрейфа. Величины отношения соответствуют значениям $\cos 22^\circ$ (верхняя линия) и $\cos 36^\circ$ (нижняя линия)

Решением данной проблемы является построение карт отклонений по отношению к координате, восстановленной благодаря микрополосковому телескопу. Карты должны быть построены для всей плоскости детектора. Необходимо выполнить сложную “сшивку” данных, полученных с площадок $2 \times 2 \text{ см}^2$ из-за ограниченного диаметра пучка.

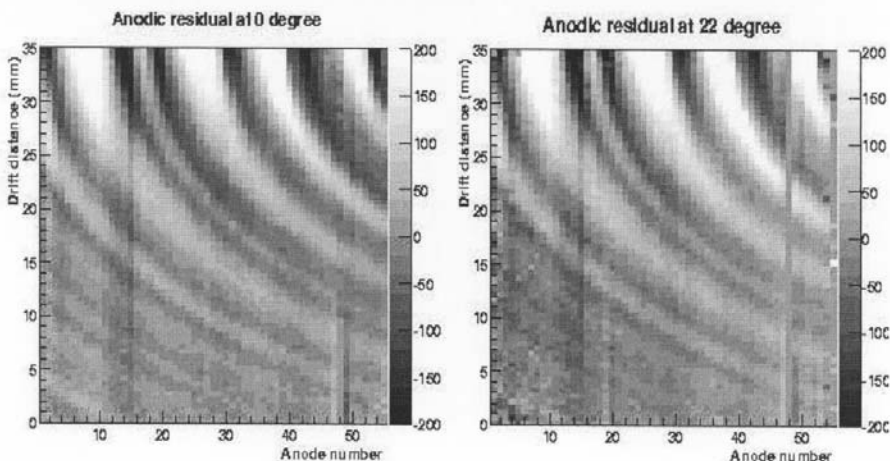


Рис.5 Карты систематических отклонений координат, измеренных КДД по отношению к координатам, восстановленным посредством телескопа, как функции анодной координаты и дрейфовой дистанции для случая перпендикулярного трека (слева) и наклонного под 22° (справа)

На рисунке 5 приведен пример карты систематических отклонений, полученных в тестах КДД на перпендикулярных (слева) и на наклонных (справа) треках. Прослеживается достаточно идентично структура круговых неоднородностей. Отклонения координаты по направлениям дрейфа и вдоль линии анодов достигают 200-400 мкм в некоторых областях детектора. Полученные величины являются базой в процедуре коррекции пространственного разрешения.

Координатное разрешение КДД определяется как среднеквадратичное отклонение распределения разности между координатой, измеренной КДД и координатой, определенной с помощью микрополоскового телескопа. После коррекций влияния флуктуаций неоднородностей разрешение КДД (с рабочей версией электроники) вдоль направления дрейфа в среднем составляет $23 \pm 2 \text{ мкм}$, а вдоль направления анодов $20 \pm 2 \text{ мкм}$ [7]. Для больших дрейфовых расстояний наблюдается слабое ухудшение разрешения, обусловленное уменьшением отношения сигнал-шум (S/N) из-за потери заряда и распространением сигнала на большее число анодов, вызванное диффузией. Для разрешения в направлении линии анодов на расстоянии 8 мм от анода получено минимальное значение разрешения – 17 мкм. При меньшем расстоянии от анодов разрешение ухудшается из-за того, что электронное облако имеет размер меньше ширины анода.

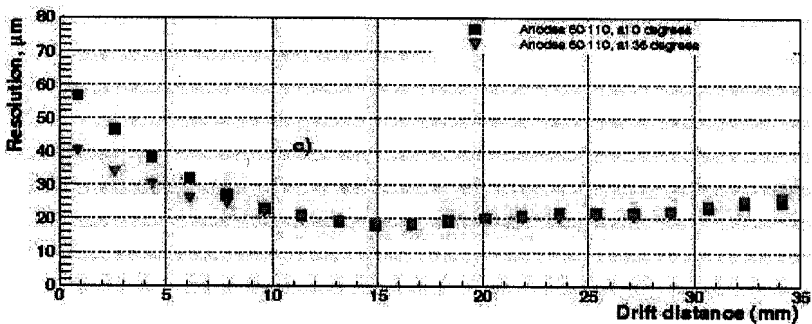
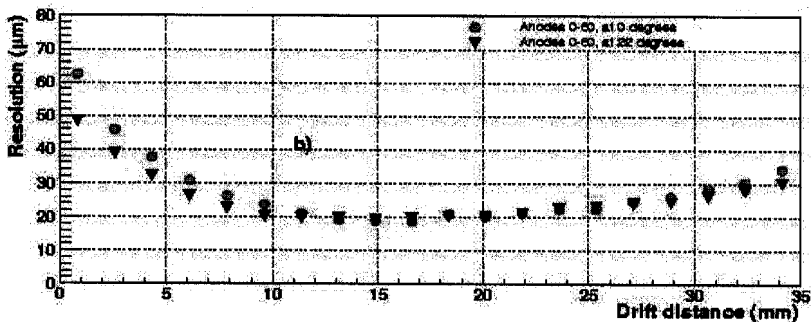
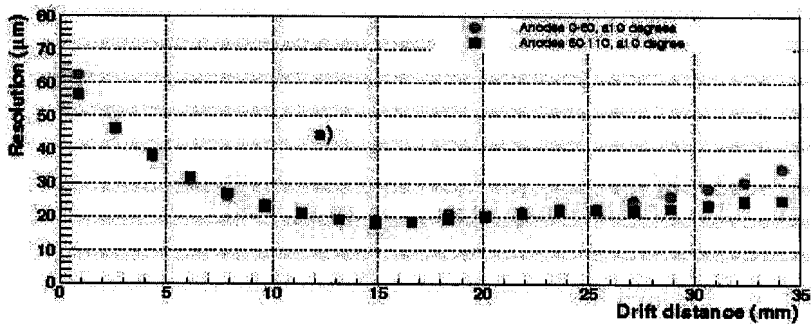


Рис. 6. Координатное разрешение вдоль линии анодов как функция дрейфового расстояния и сравнение между разрешением, обнаруженным для перпендикулярных треков для разной группы анодов (а) и для наклонных треков б) при 22° с) при 36° .

Для наклонных треков исследование разрешения координаты в анодном направлении показало значительное улучшение его величины (Рис. 6). Вблизи анодов величина разрешения становится лучше относительно к перпендикулярным трекам. Такое поведение вызвано уменьшением числа узких

кластеров в событиях с наклонными треками. При больших расстояниях дрейфа величина разрешения становится близкой к величине для перпендикулярных треков. За исключением коротких времен дрейфа средняя величина разрешения лучше чем 30 мкм.

Пятая глава посвящена исследованиям влияния радиационных повреждений на основные параметры КДД, что является важной частью работы по обеспечению работоспособности детектора в течении длительного времени его использования в установке ALICE. При достаточно больших дозах облучения происходит инверсия типа проводимости кремния, из которого изготовлен детектор. При меньших дозах за счет накопления поверхностных дефектов возрастают токи утечки катодов, на которые подается напряжение смещения с делителя. В результате изменяется соотношение напряжения на делителе напряжения и нарушается однородность распределения электрического поля в детекторе, а следовательно появляется ошибка определения координаты.

Для исследований радиационной чувствительности детектор был подвергнут радиационному облучению на синхротроне "Eletra" в Триесте (Италия). Доза электронов для облучения была выбрана такой, чтобы соответствовала суммарной дозе от электронов, пионов и нейтронов, ожидаемой для КДД в установке ALICE за 20 лет его непрерывной работы. Равномерно по площади был облучен весь детектор, после чего были промерены темновые токи и затем детектор был протестирован в ЦЕРНе на пионном пучке.

Важно отметить, что и после облучения детектора инжекторы оставались в рабочем состоянии. Это позволило впервые получить точную информацию о поведении координатного разрешения и эффективности сбора заряда для КДД после его радиационного облучения. В результате анализа данных был впервые обнаружен эффект увеличения отклонения измеренной координаты, который проявляется в виде вертикальных полос на карте систематических ошибок.

Потери заряда возросли до 40 % при максимальном дрейфовом расстоянии. Однако, это не сказалось существенно на ухудшении координатного разрешения и величина координатного разрешения остается в пределах 17-33 мкм вдоль линии анодов и 28-48 мкм в направлении дрейфа, что в условиях облучения, соответствующего двойному времени проведения эксперимента ALICE, вполне допустимо. Это является еще одним важным доказательством соответствия КДД требованиям для их применения в эксперименте ALICE.

Основные результаты, полученные в работе

1. Впервые исследовано координатное разрешение кремниевых дрейфовых детекторов большой площади на тестовом пучке пионов в ЦЕРН для наклонных треков (при 22° и 36°).
2. Впервые экспериментально доказано, что величина собираемого на анодах заряда для наклонных треков от минимально ионизирующих частиц (МИЧ) в кремниевых дрейфовых детекторах увеличиваются обратно пропорционально косинусу угла наклона трека по сравнению со случаем перпендикулярных треков.

3. Впервые экспериментально доказано, что увеличение размера кластера в направлении анодов, при наклонном прохождении частицы через детектор, приводит к увеличению числа многоанодных кластеров и к уменьшению числа одно-анодных кластеров. Это приводит к улучшению координатного разрешения в направлении анодов для частиц, попадающих в область вблизи анодов.
4. Впервые проведено исследование КДД после облучения его дозой, соответствующей 20 годам эксплуатации в установке ALICE и экспериментально доказано, что МОП-инжекторы, служащие для калибровки КДД, сохраняют работоспособность в течение всего времени эксперимента.
5. Впервые экспериментально доказано, что эффективность нахождения кластера снижается на 5-10% после облучения предельной дозой.
6. Впервые обнаружено увеличение влияния паразитного поля на траекторию дрейфа электронного облака в облученном детекторе, которое проявляется на карте систематических ошибок для координат в виде контрастных вертикальных полос, наложенных на круговые структуры, порождаемые неоднородностями легирующей примеси. Характер распределения поля в детекторе изменяется после облучения таким образом, что поле увеличивается в центре детектора и уменьшается у анодов. Это вызвано добавочной компонентой темнового тока, протекающей через сопротивления внутреннего делителя на КДД. При анализе характера зависимости напряжения на делителе было показано появление параболической компоненты в распределении напряжения делителя (до облучения распределение имело линейный характер).
7. Показано количественное увеличение числа многоанодных кластеров для облученного детектора, что связано с увеличением коэффициента диффузии электронов в кремнии и увеличением шума детектора.
8. На основе анализа данных получено, что скорость потери заряда возрастает в три раза (потеря заряда составляет 40% при максимальном времени дрейфа) по сравнению с потерями в КДД до облучения, что объясняется увеличением количества радиационных дефектов в кремнии после облучения.
9. Экспериментально доказано, что для облученного детектора применение ранее опробованных методов коррекции систематических ошибок позволяет получить разрешение вдоль линии анодов 17-32 мкм и вдоль направления дрейфа 28-48 мкм.
10. Проведено детальное сравнение характеристик детекторов до и после облучения для фрагмента в центральной части детектора. Анализ показал, что величины координатного разрешения сравнимы на большей части дрейфовой области. Для малых времен дрейфа для детектора после облучения наблюдается существенное улучшение разрешения в анодном направлении, что обусловлено увеличением числа широких кластеров на этом участке.
11. Важным результатом работ по исследованию кремниевых дрейфовых детекторов является также создание измерительного комплекса для исследования статических характеристик детекторов. Комплекс использовался для отбора и отбраковки детекторов, изготовленных на предприятиях TESLA в Чешской Республике.

В целом проведенные исследования позволили усовершенствовать алгоритмы обработки данных, получаемых с кремниевых дрейфовых детекторов и улучшить коррекцию ошибок при вычислении координат, обусловленных неоднородностью легирования кремния.

Научно-практическая значимость полученных результатов заключается в доказательстве того, что КДД, разработанный для вершинной трековой системы ALICE, полностью удовлетворяет требованиям эксперимента. Даже после получения детектором радиационной дозы соответствующей той, которую он получит за 20 лет работы установок, детектор сохраняет полную работоспособность и его основные параметры не выходят за пределы допустимых, что позволяет эффективно эксплуатировать детектор в эксперименте.

Результаты, представленные в диссертации, были выполнены автором в научных лабораториях: ОИЯИ (Дубна, 1997-2005), ИЯФ АН ЧР(Ржеш у Праги, 1997-2005), ЦЕРН(Женева, 1999-2005), Национальный институт ядерной физики (Турин/ Рим/ Триест, Италия, 2000-2005).

Основные результаты работы опубликованы в следующих изданиях:

- [1] E. Crescio, S.Kouchpil *et al.*, Results from beam test of large area silicon drift detectors , Nucl. Instr. Meth. A 539 1/2 (2005) 250-261
- [2] S. Kouchpil *et al.*, Study of the silicon drift detector performance with inclined tracks, Part. Nucl. Lett. 2004. V.1, No. 4(121). P. 70-79
- [3] ALICE Collaboration: F Carminati,...,S.Kouchpil et al., ALICE: Physics Performance Report, Volume I J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 1517-1763, 2004
- [4] D. Nouais, S. Kouchpil *et al.*, The ALICE Silicon Drift Detector System, Nucl. Instr. and Meth. A 501/1 (2003) 119-125
- [5] A. Kolozhvari, S. Kouchpil *et al.*, Measurement of the SDD two track resolution, ALICE-INT-2004-016
- [6] S. Kouchpil *et al.*, Study of the silicon drift detector performance with inclined tracks, ALICE-INT-2003-033
- [7] E. Crescio, S. Kouchpil *et al.*, Performance of the silicon drift detectors for the ALICE experiment, Proceedings of the XLI International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio, January 26-February 2, pp.307-316
- [8] ALICE Collaboration: P. Cortese,..., S. Kouchpil *et al.*, ALICE: Addendum to the technical design report of ITS , CERN-LHCC-2002-016, Apr 2002. 154pp.
- [9] V. Kouchpil, S. Kouchpil, M. Šumbera, Silicon Drift Detector Readout controlled by PC, Proceedings of the International Workshop "Relativistic nuclear Physics: from hundred of MeV to TeV", Bulgaria, Varna, 10-16 September 2001, V2, p.238-245
- [10] V. Petráček, S. Kouchpil et al., Large Area Silicon Drift Detector Prototypes for Experiment ,ALICE-INT-1999-26; Geneva : CERN, 1999
- [11] V. Kouchpil, S. Kouchpil, V. Petráček, Impulse Method for Temperature , JINR Rapid Communications No.3[95]-99

Получено 5 декабря 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 06.12.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,28. Тираж 100 экз. Заказ № 55132.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/