

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.Скобельцына

На правах рукописи  
УДК 539.1.074.55

Карманов Дмитрий Евгеньевич

Разработка и создание передней части трекера  
эксперимента D0 (FNAL)

Специальность: 01.04.23 – физика высоких энергий,

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в отделе экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

**Меркин Михаил Моисеевич**  
кандидат физико-математических наук  
НИИЯФ МГУ.

Официальные оппоненты:

**Гришин Владислав Константинович**  
доктор физико-математических наук  
физический факультет МГУ

**Семенов Павел Александрович**  
кандидат физико-математических наук  
ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино).

Ведущая организация:

Лаборатория физики высоких энергий  
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
ОИЯИ (г. Дубна).

Защита состоится «10» ОКТЯБРЯ 2008 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, корпус 19, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан «3» СЕНТЯБРЯ 2008 г.

Ученый секретарь совета Д501.001.77  
профессор



Страхова С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертации.

В современной экспериментальной физике высоких энергий (ФВЭ), в частности, в эксперименте D0 на протон-антипротонном коллайдере “Тэватрон”(США) для исследований событий с  $t$ -кварком и при поиске бозона Хиггса низкие сечения процессов (единицы пб) требуют применения ускорительной техники с высокой светимостью ( $L > 10^{32} \text{ см}^{-2}/\text{с}$ ) и больших сроков работы аппаратуры (более пяти лет), что ведет к росту влияния эффектов радиационной деградации на работу детекторов. Также для новых экспериментальных установок постоянно ужесточаются требования по периоду считывания данных (менее 100нс) и максимальной толщине детекторов в трековых системах. Для трековых систем это ведет к необходимости создания длительно и надёжно работающей регистрирующей аппаратуры с минимальным количеством слоёв детекторов и максимальной (~100%) эффективностью регистрации в каждом слое.

С 1993 г. НИИЯФ МГУ сотрудничает в коллаборации эксперимента D0 где, в частности, участвовал в создании части трековой системы этого эксперимента, т.н. торцевых дисков. В трековых системах современных экспериментальных установок ФВЭ широко применяются кремниевые координатно-чувствительные детекторы на основе структур с рп-переходом. Наиболее простым и надёжным прибором такого типа можно считать односторонние микростриповые детекторы с ёмкостным съёмом сигнала. Детекторы этого типа предполагалось использовать и в трековой системе эксперимента D0. В сочетании с многоканальными зарядо-чувствительными усилителями в интегральном исполнении, эти приборы являются лучшими на сегодняшний день инструментами для прецизионного восстановления треков заряженных частиц, сочетая высокое координатное разрешение (до единиц микрон) с высоким быстродействием (до десятков наносекунд). Так как торцевые диски служат для регистрации треков частиц вблизи оси пучка ускорителя к ним предъявляются специфические требования, связанные с высокой светимостью ускорителя и, соответственно, повышенным радиационным фоном в области дисков. Это определяет **актуальность** задачи разработки кремниевых микростриповых детекторов для работы в таких условиях. В диссертационной работе реализован комплексный подход к *разработке и оптимизации кремниевых микростриповых детекторов, учитывающий эффекты радиационной деградации и свойства конкретной считывающей электроники*, а также предложены *методики испытаний*, позволившие провести полный контроль дефектности изготовленных детекторов.

**Целью работы** автора являлась разработка кремниевых микростриповых детекторов для торцевых дисков трековой системы установки D0 с координатным разрешением не хуже 12мкм, способных обеспечить эффективность регистрации однозарядных релятивистских частиц не хуже 98% при работе в условиях высоких радиационных нагрузок – до  $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и частоте считывания до 10МГц.

### Основные результаты полученные в диссертации:

1. Для торцевых дисков установки D0 разработаны оригинальные микростриповые детекторы, удовлетворяющие требованиям эксперимента. Детекторы способны эффективно работать после облучения эффективным интегральным потоком нейтронов до  $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при периоде считывания 132нс и обеспечивают в этих условиях необходимую эффективность регистрации треков частиц и координатное разрешение не хуже 12мкм.
2. В России разработана оригинальная технология и изготовлены кремниевые микростриповые детекторы для крупного физического эксперимента, полностью

удовлетворяющие его требованиям. В диссертации разработаны оригинальные методики массового тестирования микростриповых детекторов, позволяющие быстро и достоверно оценивать качество приборов до подключения считывающей электроники. Проведено тестирование более 1500 детекторов для торцевой части трекера D0 в соответствии с предложенными методиками. Полученные результаты позволили, в частности, скорректировать технологию изготовления детекторов, для лучшего соответствия их характеристик требованиям эксперимента.

3. Создана часть трековой системы установки D0 - торцевые диски. Диски позволяют регистрировать пологие треки частиц ( $2 < |\eta| < 3.2$ ), что повышает "акцептанс" установки. Информация торцевых дисков используется, в частности, в алгоритмах "мечения" событий с рождением  $b$ -кварка ( $b$ -tagging), это позволило другим авторам коллаборации D0 получить ряд важных физических результатов, в том числе, впервые наблюдались осцилляции  $B_s^0$ .

**Научная новизна диссертации** определяется **новым** - комплексным подходом к оптимизации конструкции кремниевого микрострипового детектора, учитывающим сложные условия его работы в составе экспериментальной установки, в особенности:

- *высокие интегральные потоки адронной радиации* - до  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>, когда на работу детектора влияет эффект инверсии типа проводимости п-кремния;
- *высокую частоту считывания данных*, к тому же, повышающуюся в процессе работы ускорителя (период считывания данных меняется от 396нс до 132нс) и соответствующий рост шумов считывающей электроники;
- *шумовые свойства многоканальной считывающей электроники* на основе быстрого зарядочувствительного усилителя SVX-2E, в частности, шум усилителя, связанный с ёмкостной нагрузкой на его входе, при значительной длине стрипов детектора.

Также в диссертации предложен ряд **новых**, оригинальных методик испытаний многоканальных кремниевых детекторов, позволяющих получить достоверную и достаточно полную информацию о качестве всех каналов детекторов без подключения штатной считывающей электроники.

**Практическая ценность** работы по созданию торцевых дисков для эксперимента D0:

- К 2008 году с использованием информации торцевых дисков коллаборацией D0 получен ряд важных результатов, в том числе, впервые зарегистрирован процесс одиночного рождения  $t$ -кварка, открыт новый барион  $\Xi_b^-$  (dsb) и впервые наблюдались осцилляции  $B_s^0$ .
- Впервые в России разработана оригинальная технология изготовления кремниевых микростриповых детекторов. По этой технологии впервые в России изготовлены кремниевые микростриповые детекторы для крупного физического эксперимента. В дальнейшем полученный опыт позволил с минимальными изменениями технологии изготовить в России детекторы для других экспериментов (ATIC, СВД-2, НУКЛОН) и планировать создание детекторов для новых проектов (CBM, PANDA, CLAS12 и др.).
- Реализованы достаточно универсальные методики испытаний детекторов, которые позднее полностью или частично применялись в других экспериментах, использовавших кремниевые детекторы (ATIC, ATLAS, AMS, СВД-2, НУКЛОН) и могут использоваться в будущем при работе в новых проектах (CBM, PANDA, CLAS12 и др.).

**Личный вклад автора** в рамках работ по созданию торцевых дисков:

- Автором проведено моделирование точности восстановления треков и поперечных импульсов однозарядных релятивистских частиц в торцевых дисках.

Моделирование позволило выбрать оптимальное с точки зрения физических задач эксперимента и возможностей технической реализации координатное разрешение детекторов дисков – 12мкм.

- Автором проведена комплексная оптимизация конструкции микрострипового детектора торцевых дисков. В том числе:
  - С помощью расчетов и моделирования конкретной конструкции детекторов и считывающей электроники показано, что необходимое координатное разрешение детекторов - 12мкм достигается при шаге стрипов 40мкм и считывании данных с *каждого второго стрипа* (шаг считывания 80мкм). Этот результат позволяет получить необходимое координатное разрешение при вдвое меньшем числе каналов считывающей электроники.
  - Проведены расчеты шумовых свойств системы “микростриповый детектор-усилитель SVX-2E”, в том числе, под действием радиации, позволившие выбрать оптимальные размеры стрипов: полная длина <140мм, ширина алюминия - 14мкм. При этом обеспечивается отношение “сигнал/шум”>5 в самых жестких условиях работы системы: эффективный интегральный поток нейтронов  $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , период считывания 132нс и сигнал от однозарядной релятивистской частицы делится между двумя соседними стрипами.
  - По результатам радиационных испытаний прототипов детекторов определены оптимальные параметры кремния для изготовления детекторов торцевых дисков – кремний n-типа с концентрацией донорной примеси  $N_d = (3.2 \div 15) \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Такой выбор позволяет работать с постоянным напряжением смещения детекторов <100В в течении всего периода эксплуатации (до эффективных интегральных потоков  $\sim 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ).
  - Выполнены расчеты и проведены испытания по исследованию устойчивости конструкции микрострипового детектора к высоковольтному пробую. Полученные результаты использованы при оптимизации технологии изготовления детекторов торцевых дисков, в частности, оптимизированы дозы и профили легирования pn-переходов стрипов, охранных колец и блокирующего контакта задней стороны детектора.
- Автором была предложена и реализована оригинальная методика массового тестирования кремниевых детекторов. Её применение позволило быстро и полно проверять все детекторы торцевых дисков и, в результате, изготовить в запланированные сроки диски с низким числом дефектных каналов - <2%.
- С участием автора разработаны и реализованы методики контроля точности сборки торцевых дисков, позволившие собрать диски с точностью лучше 20 мкм по критическим направлениям.

**Достоверность результатов**, полученных автором при разработке, оптимизации и испытаниях кремниевых микростриповых детекторов для торцевых дисков трековой системы эксперимента D0, подтверждается успешной работой этих детекторов в составе трекера эксперимента D0 и соответствием их рабочих характеристик параметрам, заложенным при разработке.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах, проводимых коллаборацией D0, и на рабочем совещании в ОИЯИ (г.Дубна). Кроме того, по методам измерений параметров кремниевых детекторов, и по результатам их массового тестирования для эксперимента D0 был сделан доклад на рабочем совещании в CERN:

1-st Workshop on Quality Assurance Issues in Silicon Detectors, CERN, Geneva,

17-18 May 2001. "Quality assurance for the D0 silicon main tracker." D0 Collaboration.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. V.M Abazov, ... D. Karmanov et al. (D0 collaboration)\*, "The upgraded D0 detector." Nucl. Instr. Meth., 2006 Vol. A565, p.463.
2. П.Ф. Ермолов, Д.Е. Карманов, В.М. Мананков.  
"Нейтронно-наведенные эффекты в зонном кремнии, обусловленные дивакансионными кластерами с тетравакансионным ядром."  
ФТП, 2002г. №10, том 36, стр. 1194.
3. П.Ф. Ермолов, А.Г. Воронин, Е.Г. Зверев, Д.Е. Карманов, Е.Н. Кузнецов, А.К. Лефлат, М.М. Меркин, Е.К. Шабалина.  
"Методика массового тестирования односторонних микростриповых детекторов."  
ПТЭ, 2002 г. №2, стр.54.
4. П.Ф. Ермолов, Е.Г. Зверев, Д.Е. Карманов, А.К. Лефлат, М.М. Меркин, Е.К. Шабалина.  
"Методика и сравнительный анализ результатов тестирования модулей кремниевого трекера для коллайдерного эксперимента D0 (FNAL)."  
ПТЭ, 2002г. №2, стр.42.

**Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав и заключения, содержит 155 страниц, включая 76 рисунков, 14 таблиц и 64 библиографические ссылки.

**СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, указывается цель работы, показана новизна и практическая ценность диссертации. Сформулированы основные результаты полученные автором и выносящиеся на защиту.

**В первой главе** представлены основные направления исследований на установке D0 ускорителя Тэватрон (ФНАЛ, США) и кратко описана конструкция экспериментальной установки. Рассмотрены требования к трековой системе установки D0 и основные элементы её конструкции.

Протон-антипротонный ускоритель Тэватрон имеет энергию 1.96 ТэВ в СЦМ и светимость  $\sim 2.5 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Сочетание высокой энергии и светимости (уникальное до запуска LHC) дает возможность получить важные результаты при исследовании как редких процессов (событий с  $t$ -кварком и, возможно, бозоном Хиггса -  $H$ ), так и при уточнении параметров известных и сравнительно частых процессов (рождение  $W^\pm$ ,  $Z$  бозонов  $V$ -мезонов и др.). Ниже приведены некоторые из направлений исследований на этом ускорителе:

- исследование событий с  $t$ -кварком и уточнение его массы;
- прямой поиск  $H$ -бозона и эффектов подтверждающих его существование;
- физика  $V$ -мезонов, в том числе:
  - поиск  $B_s$ -осцилляций;
  - исследование  $CP$ -нарушений в распадах  $B^0$ .

Экспериментальная установка D0, созданная для исследований в этих и других направлениях, включает:

---

\* См. список соавторов "D0 collaboration" от российских институтов в Приложении.

- трековую систему, состоящую из кремниевого микрострипового вершинного детектора (SMT), внешнего трекера из сцинтилляционного оптоволокна (CFT) и сверхпроводящего магнита;
- электромагнитный калориметр и адрон-электронный сепаратор (“preshower”);
- адронный калориметр из обедненного урана с жидким аргонем в качестве чувствительного элемента;
- мюонную систему состоящую из трёх слоёв сцинтиллирующего пластика и дрейфовых камер. Между первым и вторым слоями детекторов расположен слой железа (т.н. “тороид”).

Трековая система (ТС) - одна из основных компонентов установки D0. Основными задачами трековой системы D0 являются:

- определение импульсов заряженных продуктов  $\bar{p}p$ -взаимодействия;
- выделение вторичной вершины для событий с рождением короткоживущих частиц в широком диапазоне величин поперечных импульсов и углов вылета;

также важной задачей ТС является уточнение калибровки калориметра. Исходя из направлений исследований на установке D0, были сформулированы некоторые важные требования к параметрам ТС D0:

1. Все системы установки, в том числе ТС, должны перекрывать возможно больший телесный угол, в частности, необходима эффективная регистрация частиц в области псевдобыстрот  $|\eta| \geq 2$ .
2. Координатное разрешение в поперечной плоскости  $R\phi$  ( $\sigma_{R\phi}$ ) должно обеспечивать эффективное выделение вторичных вершин от распадов  $B$ -мезонов ( $B$ -tagging для поиска  $t$ -кварка и, возможно, бозона Ниггса). Приемлемая эффективность выделения в среднем (для разных процессов с участием  $b$ -кварка и разных направлений его вылета) достигается при  $\sigma_{R\phi} \leq 20$  мкм.
3. Точность определения импульса заряженных частиц должна быть максимальной. Простое ограничение на приемлемую величину относительной ошибки определения импульса можно получить, например, для задачи калибровки калориметров:  $\sigma p/p \leq \sigma E_{EM}/E_{EM}$  для электромагнитного калориметра и  $\sigma p/p \leq \sigma E_{HAD}/E_{HAD}$  для адронного. Для установки D0 результаты моделирования позволяют конкретизировать эти ограничения:  $\sigma p/p \approx 2\% \div 9\%$  при поперечном импульсе частиц ( $p_t$ ) в диапазоне  $1 \div 50$  ГэВ/с.

**Во второй главе** обосновывается необходимость создания торцевых дисков, как элемента трековой системы для регистрации “пологих” треков ( $|\eta| > 2$ ).

На этапе проектирования ТС D0 было показано, что трековая система, состоящая из внутреннего кремниевого трекера (SMT) и внешнего трекера на основе сцинтиллирующего оптоволокна (CFT) плохо восстанавливает пологие треки ( $|\eta| > 2$ ). Проблема, в частности, связана с конструкцией трекера, которая представляет собой систему вложенных цилиндров (“баррелей”). Пологие треки пересекают только малую часть этих цилиндров, что уменьшает количество измеренных точек на треке. Кроме того, максимальный измеренный радиус -  $R_{max}$  (расстояние от точки взаимодействия до последней измеренной точки трека в плоскости  $R\phi$ ) в этом случае также оказывается мал, что резко снижает точность измерения, как промахов треков, так и импульсов. Было предложено использовать в этой части трековой системы кремниевые детекторы, расположив их в виде нескольких дисков в плоскости  $R\phi$ . Причем координатное разрешение по  $\phi$  и  $R$  этих детекторов должно быть близким к разрешению детекторов SMT, а радиационная длина не должна быть больше, чем у системы CFT+SMT в области  $|\eta| \approx 0$ . Эти соображения послужили основанием для

создания третьего элемента SMT, так называемых торцевых дисков - ТД (или *H*-disks).

Выбор кремниевых микростриповых детекторов в качестве датчиков в торцевых дисках был не случаен, так как требования по быстродействию, координатному разрешению и отсутствию искажений в магнитном поле исключают применение в этой части трекера газовых детекторов. Что касается возможности использования сцинтилляционных волокон, как в CFT, то их применимость ограничивается, в основном, требованиями по радиационной стойкости. Кроме того, координатное разрешение CFT значительно уступает внутренним дискам SMT.

Моделирование радиационных фонов в области торцевых дисков показало, что основной причиной радиационной деградации в этой части установки являются нейтроны. Для детекторов торцевых дисков ожидаемый интегральный поток нейтронов составит  $2.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  ( $\sim 0.6 \text{ МРад}$ ) при интегральной светимости  $4 \text{ фб}^{-1}$ , т.е. за весь планируемый срок работы трековой системы.

Простые оценки зависимостей точности измерения промахов и поперечных импульсов от размера торцевых дисков и их положения на пучке, а также моделирование этих зависимостей показали, что для улучшения точностей измерений нужно чтобы:

- торцевые диски находились возможно дальше по  $Z$  от условной точки взаимодействия;
- диаметр торцевых дисков должен быть максимально возможным;
- количество дисков должно обеспечивать уверенное восстановление треков при  $|\eta| > 2$ ;
- количество дополнительных детекторов и элементов конструкции не должно сильно увеличивать радиационную длину трековой системы в области больших  $|\eta|$ .

Исходя из последних двух соображений, а также из соображений суммарной стоимости конструкции трекера, было определено, что в передней и задней частях трекера должно быть установлено по два торцевых диска. Их размеры и расположение составили:

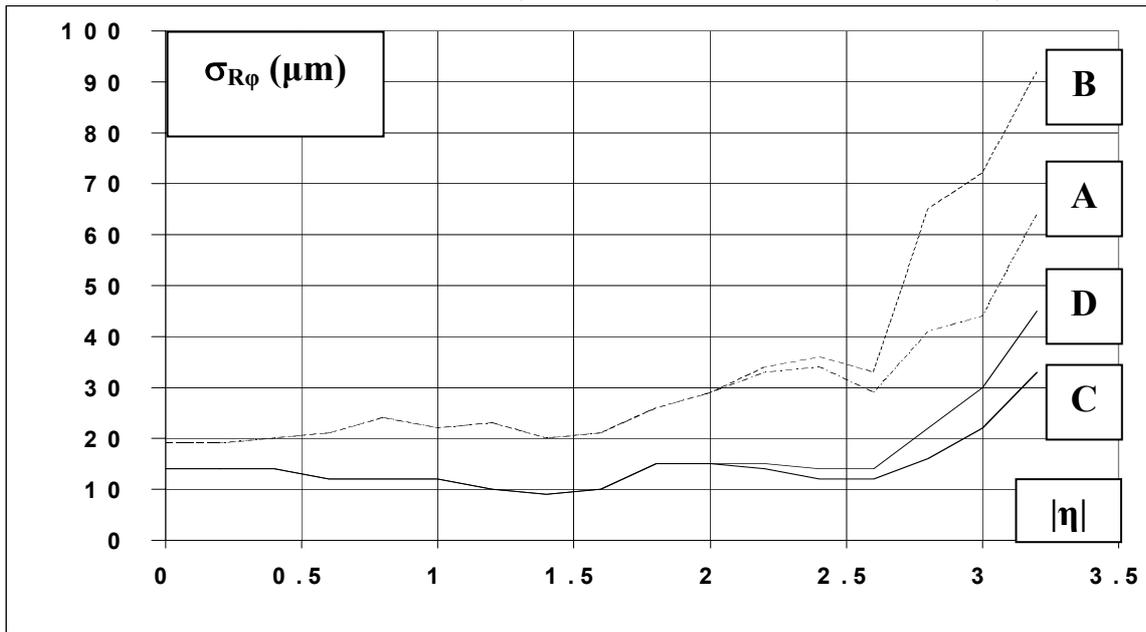
- расстояние от условной точки взаимодействия до первого диска –  $Z_{\min}^H = 100.0 \text{ см}$ ;
- расстояние от условной точки взаимодействия до последнего диска -  $Z_{\max}^H = 121.0 \text{ см}$ ;
- внешний радиус активной области дисков -  $R_{\max}^H = 23.8 \text{ см}$ ;
- внутренний радиус активной области дисков -  $R_{\min}^H = 9.6 \text{ см}$ ;

Каждый торцевой диск состоит из нескольких десятков отдельных детекторов. Конструкция имеет модульную структуру. Каждый из четырёх торцевых дисков состоит из 24 модулей в форме сектора, называемых "веджами". В свою очередь, каждый ведж состоит из двух частей - "полуведжей" склеенных "спина к спине". "Полуведж" состоит из двух кремниевых детекторов трапециевидальной формы - внешнего и внутреннего, наклеенных на бериллиевую подложку таким образом, что стрипы одного детектора продолжают стрипы другого. Стрипы детекторов параллельны одной из боковых сторон.

Для выбора координатного разрешения детекторов торцевых дисков проводилось моделирование восстановления треков с их участием, в котором использовались две величины координатного разрешения детекторов ТД –  $\sigma_{det.\varphi} = 50 \text{ мкм}$  и  $12 \text{ мкм}$ . Предполагалось, что стрипы детекторов расположены под углом  $\pm 7.5^\circ$  к оси  $R$ . На [рис.1](#) представлены результаты моделирования разрешения трековой системы по величине "промаха" треков в плоскости  $R\varphi$  -  $\sigma_{R\varphi}$ . На основе этих результатов было уточнено моделирование эффективности выделения  $B$ -мезонов по "промахам" треков

от продуктов их распада ("*B* tagging"). Для этого разыгрывалось рождение  $b\bar{b}$  пар и требовалось, чтобы  $b$  адронизировался как  $B_d$ . Продукты распада  $B$ -мезонов в основном имеют поперечный импульс в несколько ГэВ/с. Из рис. 1 видно, что при таких импульсах в центральной области ( $0 \leq |\eta| \leq 2$ ) -  $\sigma_{R\phi} \approx 25$  мкм, а в "передне-задней" области ( $2 < |\eta| \leq 3$ ) при использовании детекторов с координатным разрешением  $\sigma_{det.\phi} = 12$  мкм -  $\sigma_{R\phi} \approx 45$  мкм. Тогда можно записать следующие условия выделения адронной струи с  $b$ -кварком по двум трекам ("t1" и "t2") лежащим в узком конусе струи и имеющим "промахи" -  $\mathcal{R}_{R\phi} > 3\sigma_{R\phi}$ :

- При  $0 \leq |\eta(t1, t2)| \leq 2$  (струя в центральной области установки):  
 $[ (|\eta(t1)| < 2 \text{ и } \mathcal{R}_{R\phi}(t1) > 75 \text{ мкм}) \text{ и } (|\eta(t2)| < 2 \text{ и } \mathcal{R}_{R\phi}(t2) > 75 \text{ мкм}) ]$ .
- При  $|\eta(t1, t2)| > 2$  (струя в передней или задней части установки):  
 $[ (|\eta(t1)| > 2 \text{ и } \mathcal{R}_{R\phi}(t1) > 135 \text{ мкм}) \text{ и } (|\eta(t2)| > 2 \text{ и } \mathcal{R}_{R\phi}(t2) > 135 \text{ мкм}) ]$ .

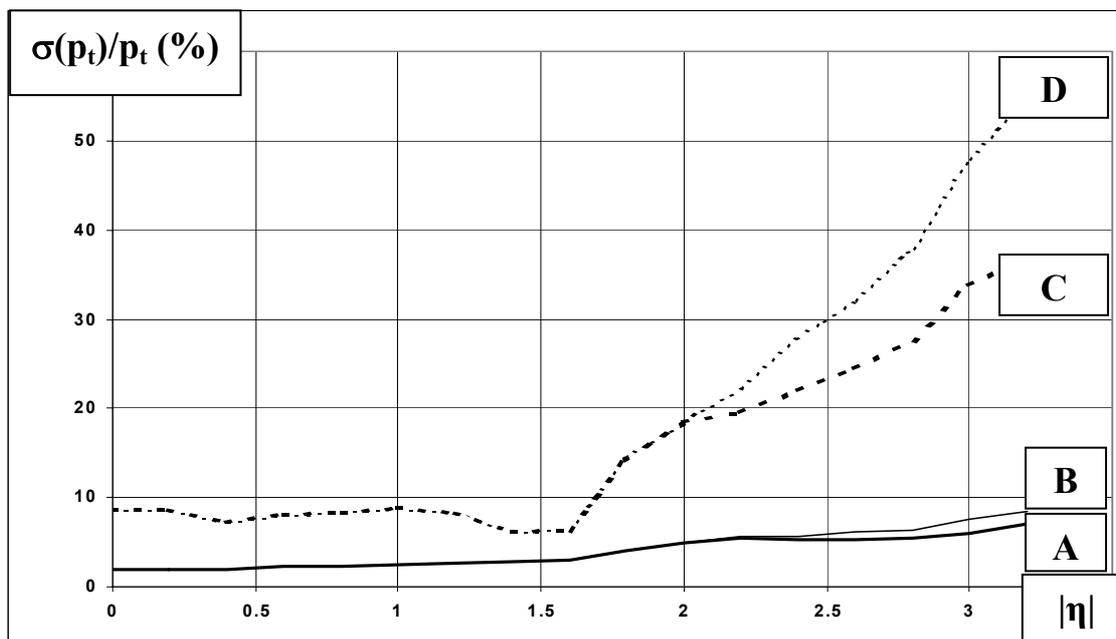


**Рис.1.** Разрешение трековой системы по "промаху" в плоскости  $R\phi$  в зависимости от  $|\eta|$  для  $p_t = 1$  ГэВ/с и  $\sigma_{det.\phi}$  в торцевых дисках - 12мкм (A), 50мкм (B), а также для  $p_t = 10$  ГэВ/с и  $\sigma_{det.\phi}$  в ТД - 12мкм (C), 50мкм (D).

Критерий отбора "а" оставляет  $\sim 50\%$  чисто центральных событий. Критерий "б" оставляет  $\sim 25\%$  событий с большими  $|\eta|$ . Если использовать в области  $2 < |\eta| < 3$  детекторы с координатным разрешением  $\sigma_{det.\phi} = 50$  мкм ошибка определения "промахов" составит уже  $\sigma_{R\phi} \approx 70$  мкм и доля событий, отобранных по критерию "б", упадет до 8%.

Результаты моделирования величины относительной ошибки определения поперечного импульса одиночных лептонов с  $|\eta| < 3.5$  и  $p_t = 1$  ГэВ/с и 50 ГэВ/с при различном координатном разрешении торцевых дисков представлены на рис.2. Видно, что введение в систему торцевых дисков с разрешением  $\sigma_{det.\phi} \approx 12$  мкм позволяет для поперечных импульсов  $p_t \approx 1$  ГэВ/с получить для диапазона  $2 < |\eta| < 3$  точность определения поперечного импульса не уступающую центральной части трека. Для больших величин поперечного импульса -  $p_t > 20$  ГэВ/с, точность измерения импульсов в передне-заднем направлении падает, и использование детекторов с лучшим координатным разрешением не позволяет выправить ситуацию. Рост ошибки измерения импульсов (как и промахов) в области больших  $|\eta|$  определяется быстрым уменьшением параметра  $R_{max}$ . И компенсация этого влияния

улучшением координатного разрешения детекторов в области  $|\eta| > 2$  при фиксированных размерах трековой системы невозможна. Однако и здесь относительная ошибка измерений поперечных импульсов при  $\sigma_{det,\varphi} \approx 12\text{мкм}$  остаётся не хуже 30%, в то время как без ТД импульс в этой области определить невозможно.



**Рис.2.** Зависимость относительной ошибки определения поперечного импульса от  $|\eta|$  в трековой системе для  $p_t = 1$  ГэВ/с и  $\sigma_{det,\varphi}$  в ТД - 12мкм (А), 50мкм (В), а также для  $p_t = 50$  ГэВ/с и  $\sigma_{det,\varphi}$  в ТД - 12мкм (С), 50мкм (D).

Можно сделать вывод, что **торцевые диски с координатным разрешением  $\sigma_{det,\varphi} \approx 12\text{мкм}$  обеспечивают приемлемые характеристики трековой системы в области больших  $|\eta|$ .**

**В третьей главе** показано как на основании рассмотренных выше основных требований к параметрам торцевых дисков, в том числе, координатному разрешению, радиационной стойкости, быстродействию и эффективности сформулировать требования к основному элементу дисков - кремниевым микростриповым детекторам (КМСД).

Как известно, принцип действия кремниевых детекторов основан на регистрации первичной ионизации, вызванной прохождением ионизирующей частицы через материал детектора и, вообще говоря, слабо отличается от принципа работы газовой ионизационной камеры. В настоящей работе отправной точкой при проектировании кремниевого детектора стало рассмотрение эффектов радиационной деградации. Как было указано ранее, КМСД трековой системы D0 должны уверенно работать после облучения вплоть до эффективного интегрального потока нейтронов  $2.1 \times 10^{13} \text{см}^{-2}$  ( $\sim 0.6\text{МРад}$ ). При этом облучение приведёт к росту токов утечки в каналах КМСД, изменению напряжения полного обеднения (а следовательно, и рабочего напряжения), а также к изменению ряда других параметров детектора (уменьшению времени жизни неосновных носителей, уменьшению сопротивления между соседними p-n-переходами КМСД, росту плотности поверхностного заряда в поверхностном слое окисла и др.). В представленной работе используется принятая в настоящее время параметризация (основанная на большом объеме экспериментальных данных) основных эффектов радиационной деградации высокоомного кремния:

- Обратный ток облученного детектора пропорционален интегральному потоку радиации:  

$$I(\Phi) = I_0 + \alpha\Phi \times Sd, \quad (1)$$
 где  $S$  и  $d$  – площадь и толщина детектора;  $\Phi$  – интегральный поток радиации, нормированный на поток нейтронов энергией 1 МэВ;  $I_0$  – обратный ток до облучения;  $\alpha$  – постоянная деградации,  $\alpha \approx 6.7 \times 10^{-17}$  А/см (через час после облучения при температуре  $+21^\circ\text{C}$ ).

- Зависимость эффективной концентрации носителей в n-кремнии от нормированного интегрального потока радиации обычно аппроксимируется выражением следующего вида:  

$$N_{eff}(\Phi) = N_{d(\Phi=0)} \times \exp(-c\Phi) + b\Phi, \quad (2)$$
 где  $N_{eff}$  – эффективная концентрация носителей,  $N_{d(\Phi=0)}$  – начальная концентрация донорной легирующей примеси в n-Si; параметр  $c$  обычно называют постоянной удаления доноров, а параметр  $b$  – постоянной введения акцепторов. Обобщенные экспериментальные результаты дают:  $b_{exp} = (7 \pm 2) \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  и  $c_{exp} = (2.0 \pm 0.5) \times 10^{-14} \text{ см}^2$  (при концентрации легирующей n-примеси в исходном кремнии  $N_d \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

Зависимость (2) позволяет выбрать исходный материал для КМСД (ограничить диапазон удельного сопротивления кремния). Зависимость (1), совместно с параметризацией шумов в системе “КМСД-считывающая электроника” и при заданной временной диаграмме ускорителя (периодичность считывания данных и периодичность “обнуления” зарядо-чувствительной секции усилителя - ЗЧУ) позволяют оценить ожидаемое отношение “сигнал/шум” в системе, что прямо связано с эффективностью регистрации. Для считывания информации с кремниевых детекторов SMT D0 используются 128-ми канальные микросхемы SVX-2E, содержащие зарядочувствительную входную секцию, аналоговую память и АЦП. Параметры этой микросхемы, в частности параметризация шумов, предложенная разработчиком, используются при анализе шумовых свойств системы и эффектов связанных с ёмкостным делением заряда между соседними каналами.

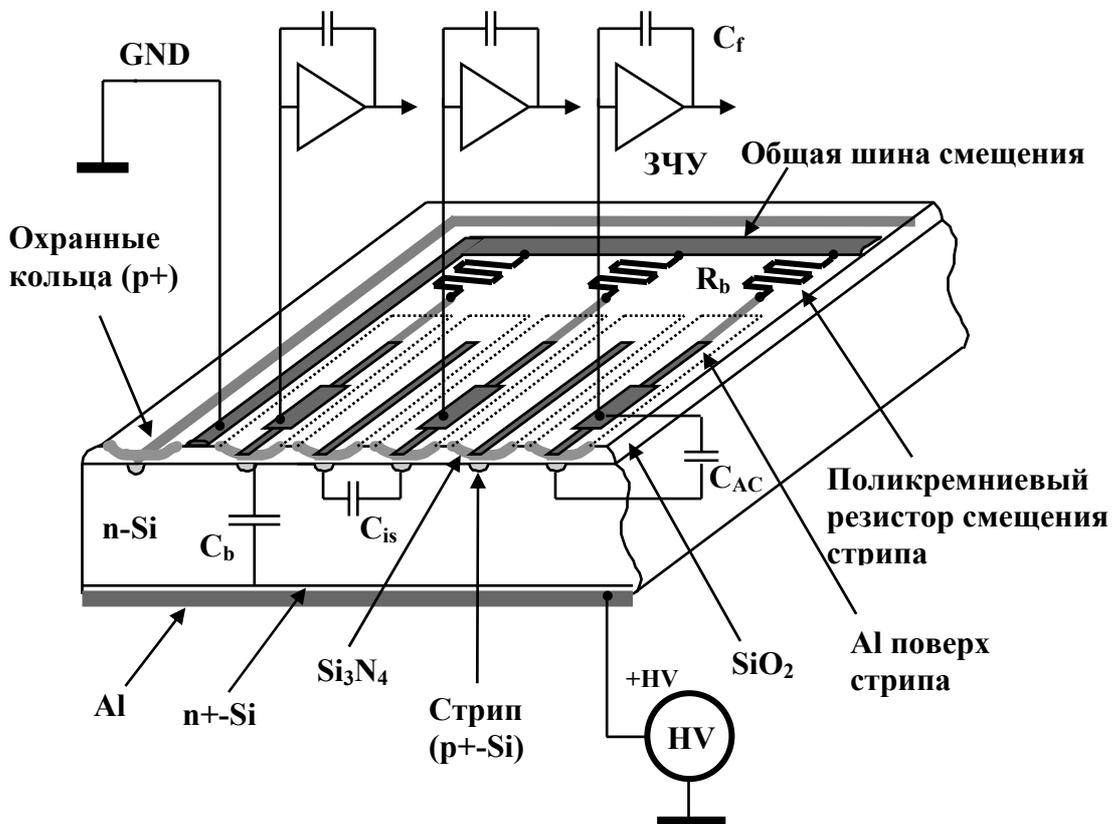
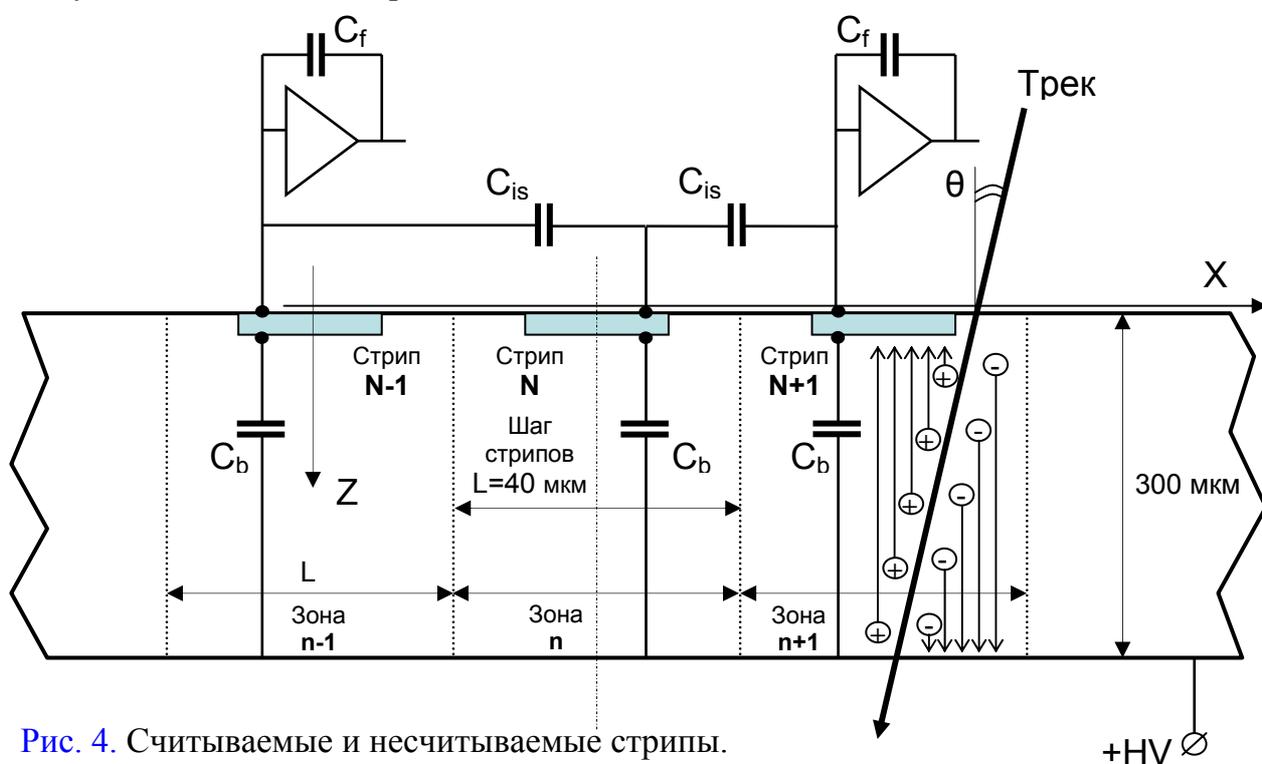


Рис. 3 Схематичный вид детектора торцевых дисков трека D0.

С точки зрения конструкции детектора всё вышесказанное определяет предельные размеры одного стрипа (канала) детектора, так как ток утечки стрипа пропорционален его площади, а шум в канале растёт как с ростом тока утечки, так и с ростом ёмкости стрипа. Также рост токов утечки под облучением определяют и конструкцию КМСД – **микростриповый детектор с ёмкостным съёмом сигнала**, это означает, что вход усилителя подключен к стрипу детектора через разделительную ёмкость. Такая конструкция не позволяет постоянному току утечки стрипа влиять на работу усилителя (за исключением шума тока). Иллюстрация конструкции детектора этого типа приведена на [рис.3](#).

Координатное разрешение КМСД в первом приближении определяется шагом считываемых стрипов. Однако, так как электроника считывания SMT позволяет измерять амплитуду сигнала в каждом канале, то точность измерения координаты при данном шаге считываемых стрипов может быть повышена. Для этого в промежутке между считываемыми стрипами располагают стрипы не подключенные к считывающей электронике (несчитываемые). Рассмотрим подробнее как реализуется идея улучшения координатного разрешения в этой системе. Пусть в системе из трех соседних стрипов – N-1, N и N+1 стрипы N-1 и N+1 считываемые, а N – несчитываемый – [рис. 4](#). Если трек частицы проходит вблизи считываемого стрипа (в зоне “n-1” или “n+1”), то практически все носители образованные ионизирующей частицей вдоль трека стягиваются в стрипы N-1 или N+1, образуя заряд  $Q_{mip}$  на входе ЗЧУ соответствующих каналов и сигнал соответствующей амплитуды на выходе. Если трек проходит в зоне “n”, то носители также стягиваются на металлизацию стрипа N, создавая на ней заряд  $Q_{mip}$ , однако, эта обкладка не подключена к каналу ЗЧУ и заряд попадает на входы ЗЧУ каналов N-1 или N+1 делясь примерно поровну между ними за счет межстриповых емкостей  $C_{is}$ .



[Рис. 4](#). Считываемые и несчитываемые стрипы.

Таким образом, если координата трека лежит в зоне “n”, то вместо сигнала в одном канале с амплитудой  $Q_r \approx Q_{mip}$  мы получим сигналы в двух соседних каналах с амплитудами  $Q_{nr} \approx 1/2 \times Q_{mip}$  – т.н. “кластер”. Для несчитываемых стрипов существенно, что эти равенства приближенные, так как часть заряда остаётся на ёмкостях  $C_b$ . Можно показать, что для полного сбора заряда из стрипа на ёмкость обратной связи

ЗЧУ нужно требовать выполнения нескольких условий о соотношении емкостей  $C_b$ ,  $C_{AC}$ ,  $g \times C_f$  и  $C_{is}$ , где  $C_{AC}$  - ёмкость переходного конденсатора (см. [рис.3](#)) и  $g$  - петлевое усиление по напряжению усилителя в секции ЗЧУ. Первое из этих условий -  $g \times C_f \gg C_{AC}$ , второе -  $C_{AC} \times g \times C_f / (C_{AC} + g \times C_f) \gg C_{is}$  и третье  $C_{is} \gg C_b$ . Отметим, что величина  $g \times C_f$  - фиксирована (для микросхемы SVX-2E), а возможности по увеличению  $C_{AC}$  не безграничны по технологическим соображениям, кроме того, величина  $C_b$  практически определяется только отношением площади детектора к количеству стрипов на нем (для стрипов равной длины). В этой ситуации удовлетворить все три условия достаточно сложно и нужно выяснять, какое соотношение величин  $C_{is}/C_b$  является оптимальным. Для этого проводилось моделирование сбора заряда из детекторов торцевых дисков для различных значений отношения  $C_{is}/C_b$ . На [рис.5](#) представлена зависимость величины сигнала на считываемом стрипе от расстояния между треком частицы и этим стрипом при двух значениях  $C_{is}/C_b = 1.5$  и  $C_{is}/C_b = 10$ . Сигнал нормирован на единицу, когда частица попадает в считываемый стрип. Точка “0мкм” соответствует середине считываемого стрипа, соответственно “40мкм” – середина несчитываемого стрипа и “80мкм” – середина следующего считываемого стрипа. Идеализированная зависимость, учитывающая только емкостное деление и вертикальные треки, представляет собой ступеньку 100%-50%-0% (на рисунке – линия “а”), т.е. при удалении трека от считываемого стрипа сигнал в нем уменьшается, спадая до 50% при попадании в зону несчитываемого стрипа и достигает нуля, когда частица попадает в соседний стрип. Для такой зависимости точность определения координаты определяется шириной горизонтальных участков и равна  $40\text{мкм}/\sqrt{12}$ , так как на горизонтальных участках нет способа уточнить положение трека. Т.е. точность такая же, как для детектора с шагом считывания 40мкм и без анализа амплитуды.

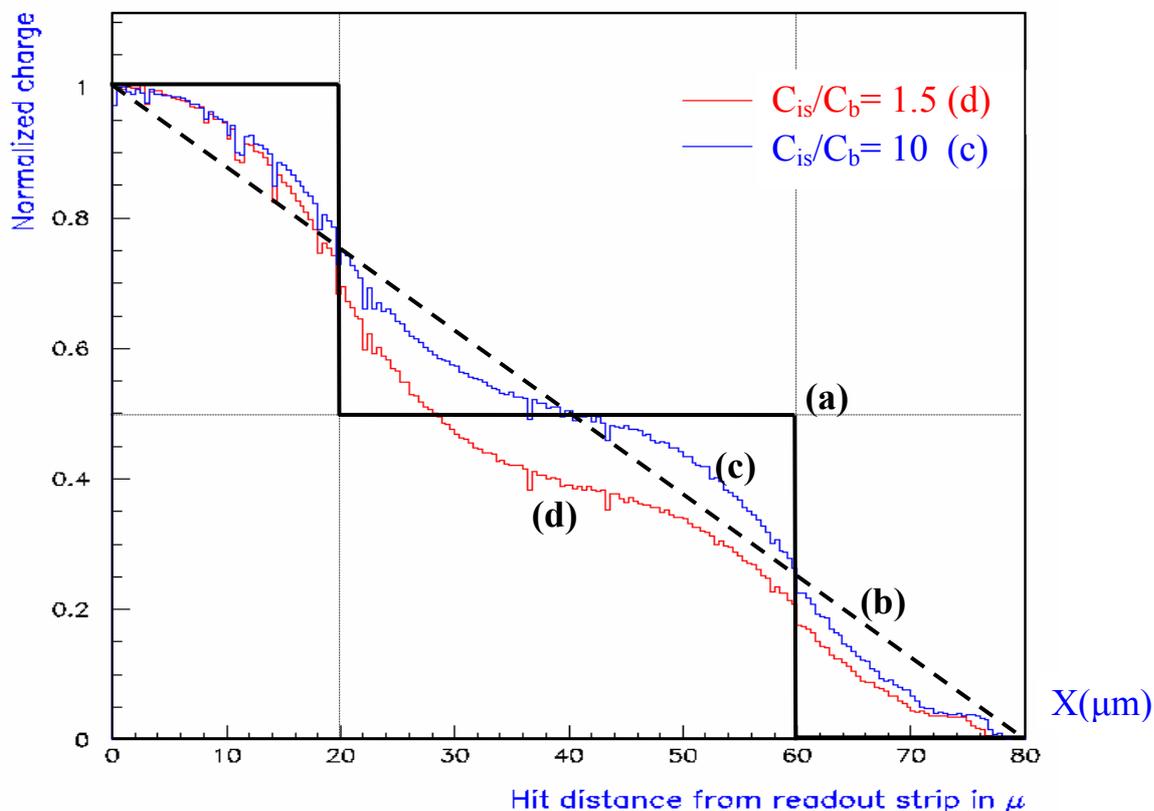


Рис. 5. Средняя величина сигнала на считываемом стрипе, в зависимости от расстояния между этим стрипом и треком частицы в детекторе.

С другой стороны, если бы зависимость представляла собой прямую линию – линия “b” на рисунке, то точка прохождения трека определялась бы точно, по отношению амплитуд в двух стрипах N-1 и N+1 образующих кластер:  $I_{N-1}/I_{N+1} = Q_{N-1}/Q_{N+1}$  ( $I_{N-1}$  и  $I_{N+1}$  – расстояния от трека до стрипов N-1 и N+1 соответственно). Точность определения координаты трека в этом случае определялась бы только точностью измерения амплитуд сигнала в каналах и была бы значительно лучше чем  $40\text{мкм}/\sqrt{12}$ . Реальные зависимости (кривые “c”, “d”) занимают промежуточное положение между “a” и “b”. Из [рисунка 5](#) также видно, что если частица попадает в детектор в зоне несчитываемого стрипа, то при  $C_{is}/C_b=1.5$  значительная часть заряда не попадает на считываемый стрип, а “застревает” на емкостях  $C_b$ . Потери заряда при  $C_{is}/C_b=10$  заметно меньше. Для треков попадающих в зону сбора несчитываемого стрипа (двухканальные кластеры) при  $C_{is}/C_b=1.5$  в два канала соберётся суммарно  $78\% \div 96\%$  от  $Q_{\text{mip}}$  в зависимости от точки попадания трека, а остальной заряд теряется на емкостях  $C_b$ . При  $C_{is}/C_b=10$  суммарный собранный заряд равен  $\sim 92\%$  от  $Q_{\text{mip}}$ , как для одноканальных событий так и для двухканальных кластеров. Таким образом, из результатов моделирования можно сделать вывод, что при  $C_{is}/C_b \approx 10$  сбор заряда из несчитываемых стрипов практически оптимален. С другой стороны нужно иметь в виду, что увеличение  $C_{is}$  пропорционально увеличивает шум в системе “КМСД+SVX-2E”. Для прояснения этого вопроса рассматривалось как меняется отношение заряда, собранного в считываемый стрип, к величине шума для треков приходящих в центр между двумя считываемыми стрипами (“hit distance” =  $40\text{мкм}$  на [рис.5](#)) при различных величинах  $C_{is}$ . Было получено, что для необлученного детектора максимальное отношение сигнала к шуму (S/N) для треков попадающих в зону сбора несчитываемого стрипа достигается при  $C_{is}/C_b \approx 1.5$ . Однако, в процессе облучения и соответственного роста шумов связанных с током стрипа, максимум сдвигается к  $C_{is}/C_b \approx 3$ . При этом сама величина максимального отношения сигнала к шуму после облучения значительно падает (от 14 до облучения к 6 после). Таким образом, для эффективной работы системы как до, так и после облучения при различных периодах столкновений нужно иметь величину отношения  $C_{is}/C_b \approx 3$ . В этом случае для двухканальных кластеров в канал ближний к треку попадает не менее  $\sim 43\%$   $Q_{\text{mip}}$ . При соблюдении всех перечисленных условий **детектор с шагом стрипов  $40\text{мкм}$ , шаге считывания  $80\text{мкм}$  и анализе амплитуд сигналов должен обеспечивать координатное разрешение не хуже чем  $40\text{мкм}/\sqrt{12} \approx 12\text{мкм}$** , что соответствует требованиям к координатному разрешению торцевых дисков из гл. 2.

Эти и другие соображения позволили сформулировать спецификацию КМСД торцевых дисков трековой системы D0, основная часть которой представлена в [таблице 1](#).

В четвертой главе представлены основные этапы и особенности технологии изготовления детекторов торцевых дисков, доработанной с учетом специфических требований к детекторам. Детекторы изготавливаются на пластинах монокристаллического n-кремния ориентации  $\langle 111 \rangle$  высокой степени очистки, полученного методом бестигельной зонной плавки. Удельное сопротивление кремния -  $6 \pm 2$  кОм×см выбирается таким образом, чтобы напряжение полного обеднения за весь период облучения было ниже 100В, в этом случае можно рассчитывать, что детекторы проверенные на работоспособность до облучения при начальном напряжении 100В сохраняют свои свойства и в процессе работы. Для такого выбора, из формулы (2), описывающей влияние облучения на эффективную концентрацию носителей в кремнии -  $N_{\text{eff}}$  и известной формулы, связывающей эту концентрацию с удельным сопротивлением -  $\rho = (q \times \mu \times N_{\text{eff}})^{-1}$  (где  $\mu$  - подвижность носителей

соответствующего типа) можно оценить приемлемый диапазон начальных удельных сопротивлений материала.

**Таблица 1.** Спецификация кремниевых детекторов торцевых дисков.

Основные размеры	Обозначение	Внеш. детектор	Внутр. детектор
Большое основание трапеции [мм]		64.780	47.980
Малое основание трапеции [мм]		48.300	27.61
Высота трапеции [мм]		64.500	76.870
Количество стрипов [шт.]	$N_s$	1562	1126
Угол между стрипами и нормалью к основанию трапеции [град.]		7.5	
Шаг стрипов [мкм]	$s$	40	
Толщина детектора [мкм]	$D$	300+15	
Электрические параметры			
Максимальный общий ток утечки всех стрипов (при 70В) [нА]	$I_{bias}$	5000	
Сопротивление поликремниевого резистора стрипа [МОм]	$R_b$	1 МОм $\pm 20\%$	
Напряжение полного обеднения детектора [В]	$V_{fd}$	20÷90 В	
Напряжение пробоя конденсаторов стрипов [В]	$V_{bd AC}$	> 60 В	
Дефектные каналы			
А. Максимальное количество конденсаторов считываемых стрипов с повышенным током утечки ( $I_{cap} > 5$ нА при 60В)		4	
В. Максимальное количество замкнутых считываемых стрипов (с сопротивлением замыкания <10 кОм)		4	
С. Максимальное количество стрипов с повышенным током утечки ( $I_s > 10$ нА при рабочем напряжении)		8	
Максимальное количество дефектных стрипов по всем категориям А, В, С.		10	
Минимальное межстриповое сопротивление [МОм]	$R_{intrst}$	1000	
Ёмкость переходного конденсатора "стрип-вход предусилителя" [пФ/см]	$C_{AC}$	не менее 20	
Ёмкость стрипа на обратную сторону детектора [пФ/см]	$C_b$	не более 0.2	
Ёмкость между двумя стрипами [пФ/см]	$C_{is}$	1.0±0.5 ( $C_{is}/C_b < 5$ )	

В производстве микростриповых детекторов использованы стандартные процессы МОП и ТТЛ технологий. Однако имеется ряд особенностей связанных с:

- большой площадью детектора ( $\sim 30\text{см}^2$ ) при малом количестве дефектных элементов;
- использованием нестандартного для микроэлектроники высокоомного кремния;
- влиянием задней стороны пластины на работу прибора (при работе детектора в режиме полного обеднения).

Всё это накладывает жесткие требования на чистоту, бездефектность и однородность исходного кремния. Кроме того, так как допустимое количество неработоспособных стрипов на детекторе не должно превышать  $\sim 1\%$ , то необходимо использовать бездефектные шаблоны и предъявлять особые требования к качеству фотолитографии. При формировании структуры детектора, из-за большой площади прибора применяется контактная фотолитография с зазором (около 5мкм).

Детекторы были изготовлены в ОАО "НИИ Материаловедения" (Зеленоград, Москва). Чертёж части детектора представлен на рис.6.

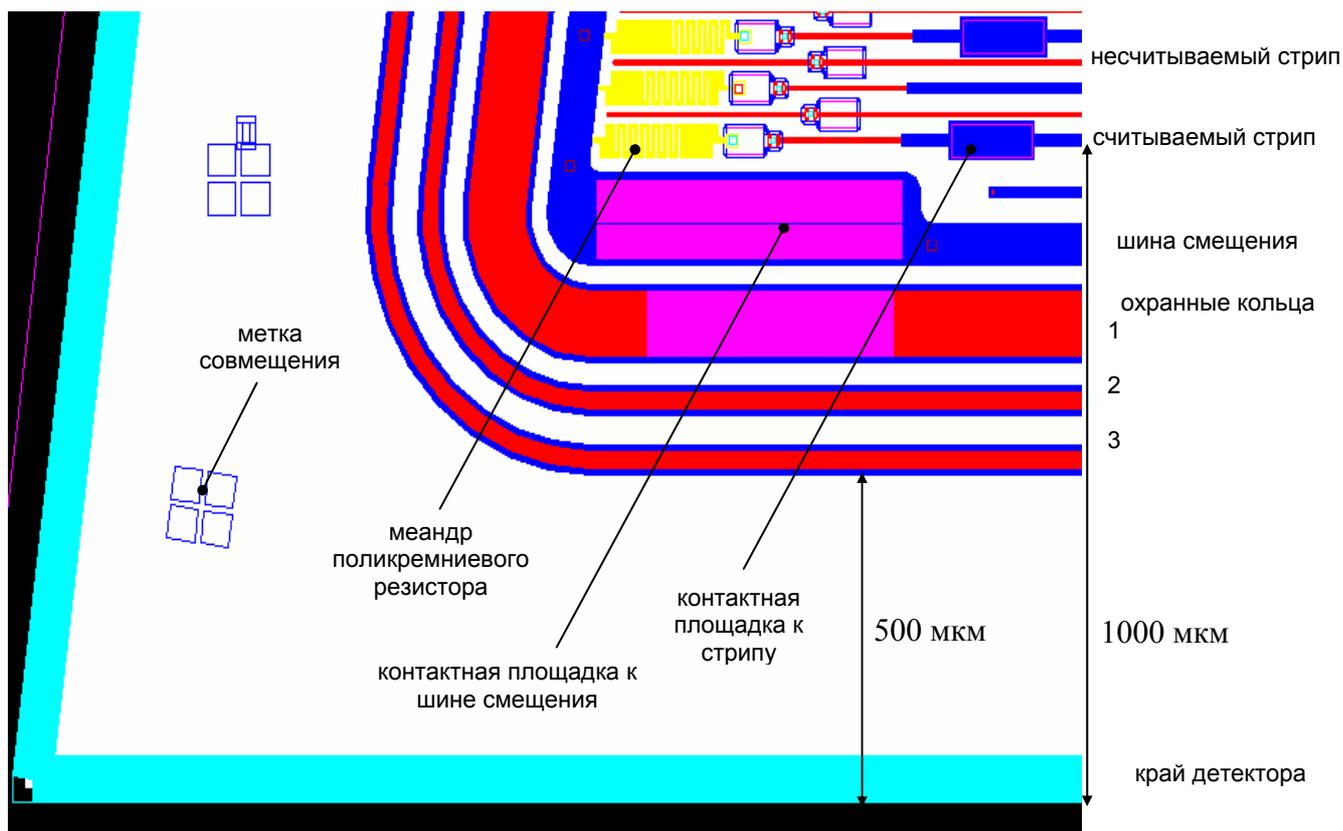


Рис. 6. Чертёж части детектора торцевых дисков.

Далее приведены основные этапы изготовления детекторов:

1. Очистка пластин: травление верхнего слоя пластин для снятия окисла и очистки.
2. Создание толстого окисла (~0.5мкм) окислением в сухом кислороде. Низкая скорость роста окисла обеспечивает его высокую плотность и безфектность.
3. Нанесение фоторезиста на лицевую сторону пластины, травление окисла с обратной стороны пластины. Формирование на обратной стороне пластины  $p^+$  области диффузией фосфора.
4. Фотолитография по толстому окислу (шаблон №1). Формирование  $p^+$  областей стрипов и охранных колец ионной имплантацией бора. Отжиг дефектов, созданных имплантацией, и разгонка примеси бора.
5. Нанесение поликремния для создания резисторов смещения стрипов осаждением из газовой фазы (моносилан). Имплантация поликремния бором для обеспечения необходимого сопротивления резисторов.
6. Фотолитография по поликремнию (шаблон №2). Формирование геометрии резисторов.
7. Напыление нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ) – одного из слоёв диэлектрика в переходных конденсаторах стрипов.
8. Фотолитография по слою нитрида кремния (шаблон №3).
9. Для обеспечения надежного, линейного и не шумящего контакта поликремниевых резисторов к Al-металлизации и  $p^+$  стрипам проводится дополнительная фотолитография по технологическому окислу (шаблон №4), в ходе которой в тонком окисле, образовавшемся на поликремнии после этапа 5, вскрываются окна

на концах поликремниевых резисторов. В эти окна делается дополнительная имплантация бора в поликремний.

10. Для обеспечения контакта  $p^+$  областей охранных колец к металлизации проводится вторая дополнительная фотолитография по технологическому окислу (шаблон №5), в ходе которой в тонком окисле, образовавшемся на поверхности легированных охранных колец на этапах 4-9, вскрываются окна.
11. Напыление алюминия на лицевую сторону пластины.
12. Напыление алюминия на обратную сторону пластины.
13. Фотолитография по алюминию лицевой стороны (шаблон №6).
14. Вжигание алюминия лицевой и обратной стороны обеспечивает хороший контакт металлизации к кремнию.
15. Нанесение защитного покрытия (пассивации) на лицевую сторону. В качестве защитного покрытия для детекторов торцевых дисков использовалась пленка фосфорно-силикатного стекла (ФСС) -  $\text{SiO}_2(90\%)+\text{P}_2\text{O}_5(10\%)$ , которая наносится на детектор из смеси газов (моносилан, кислород, пары фосфора).
16. Фотолитография по пассивации (шаблон №7). Вскрываются контактные площадки к стрипам, охранным кольцам и общей шине.

В процессе массового производства детекторов требуется постоянный контроль их качества. По этому измерялись все параметры включенные в спецификацию (табл. 1), в том числе:

- на каждом детекторе:
  - напряжение полного обеднения -  $V_{fd}$ ;
  - зависимость общего тока детектора  $I_{bias}$  от напряжения обеднения  $V_{appl}$ , до  $V_{appl} = V_{fd} + 20\text{В}$ ;
  - ток утечки каждого переходного конденсатора на напряжении 30В и 60В, для определения пробитых конденсаторов;
  - ток утечки каждого стрипа на напряжении  $V_{fd} + 20\text{В}$ ;
- на нескольких образцах из технологической партии:
  - величины поликремниевых резисторов -  $R_b$  (на тестовых структурах или нескольких стрипах);
  - межстриповое сопротивление -  $R_{intrst}$ ;
  - межстриповая ёмкость -  $C_{is}$  и ёмкость стрипа на заднюю сторону детектора -  $C_b$ ;
  - ёмкость переходного конденсатора стрипа -  $C_{AC}$ ;
  - напряжение пробоя конденсаторов стрипов -  $V_{bdAC}$ .

Ряд параметров -  $R_b$ ,  $R_{intrst}$ ,  $C_{is}$ ,  $C_b$ ,  $C_{AC}$ ,  $V_{bdAC}$ , определяются коллективными этапами технологического процесса изготовления детекторов: выращивание слоёв окисла и поликремния, травление алюминия, нанесение и травление пассивации, имплантация, в том числе имплантация бора в поликремний при создании резисторов. Что позволяет измерять эти величины не для каждой пластины, а на небольшой выборке из технологической партии. Другие параметры -  $I_{bias}$ ,  $V_{fd}$ , количество дефектных каналов, определяются свойствами конкретной кремниевой пластины или дефектами на тех этапах технологического процесса, которые каждая пластина проходит индивидуально (все фотолитографии). В связи с чем, необходимо измерять эти параметры на каждой пластине. В случае несоответствия параметров образца спецификации иногда требуется ряд дополнительных измерений для установления причин, в частности, для контроля соблюдения технологического процесса. Измерения проводятся или непосредственно на детекторе, или на специальных

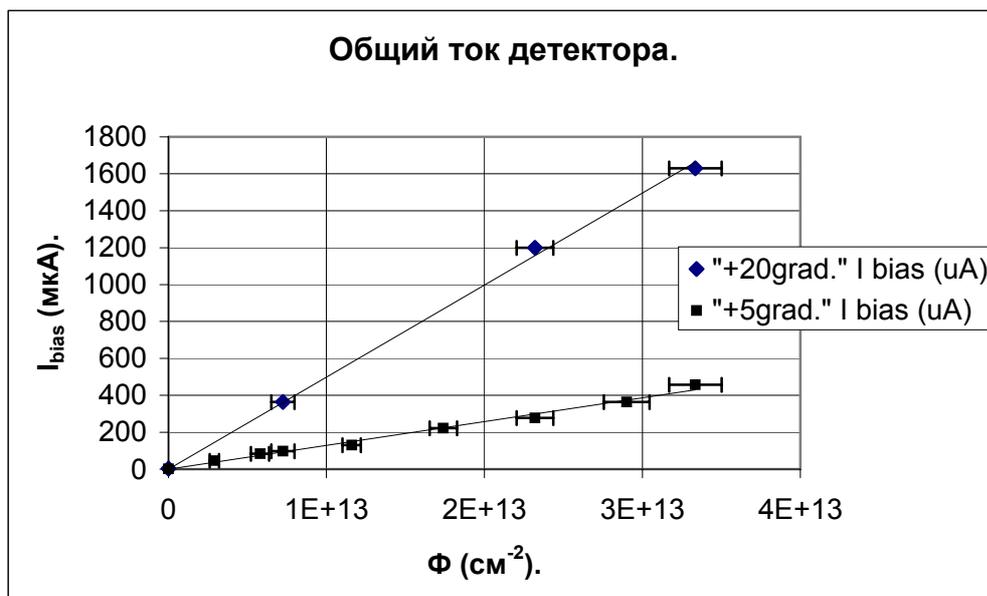
тестовых структурах, которые не являются частью детектора, но изготавливаются на той же кремниевой пластине, что и детектор, в одном технологическом цикле.

Основу стендов для измерения параметров детекторов составляют зондовые установки. Для измерения токов и сопротивлений необходимы цифровой измеритель тока с разрешением не хуже 0.01 нА и управляемый источник напряжения с диапазоном 0.1÷500 В и минимальным шагом 0.1 В. Для ёмкостных измерений требуется цифровой измеритель ёмкости с диапазоном 10 пФ÷1 нФ и амплитудой тестирующего сигнала не более 100 мВ. Идеальным представляется использование прибора с несколькими рабочими частотами в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц. Использование низких частот при измерениях ёмкости позволяет с достаточной точностью измерять ёмкость структур с невысокой добротностью. Наиболее распространённым стандартом для управления измерительными приборами такого типа в настоящее время является GPIB-интерфейс. Методики измерений параметров детекторов, как правило, требуют от измерительных приборов и программ не высокого быстродействия, а надёжной работы в течении нескольких часов или суток. Общее количество изготовленных детекторов ~1500 штук, из них годных согласно требованиям спецификации - 560 штук. Коэффициент выхода годных детекторов составил ~40%. Рассмотрим некоторые результаты измерений более подробно:

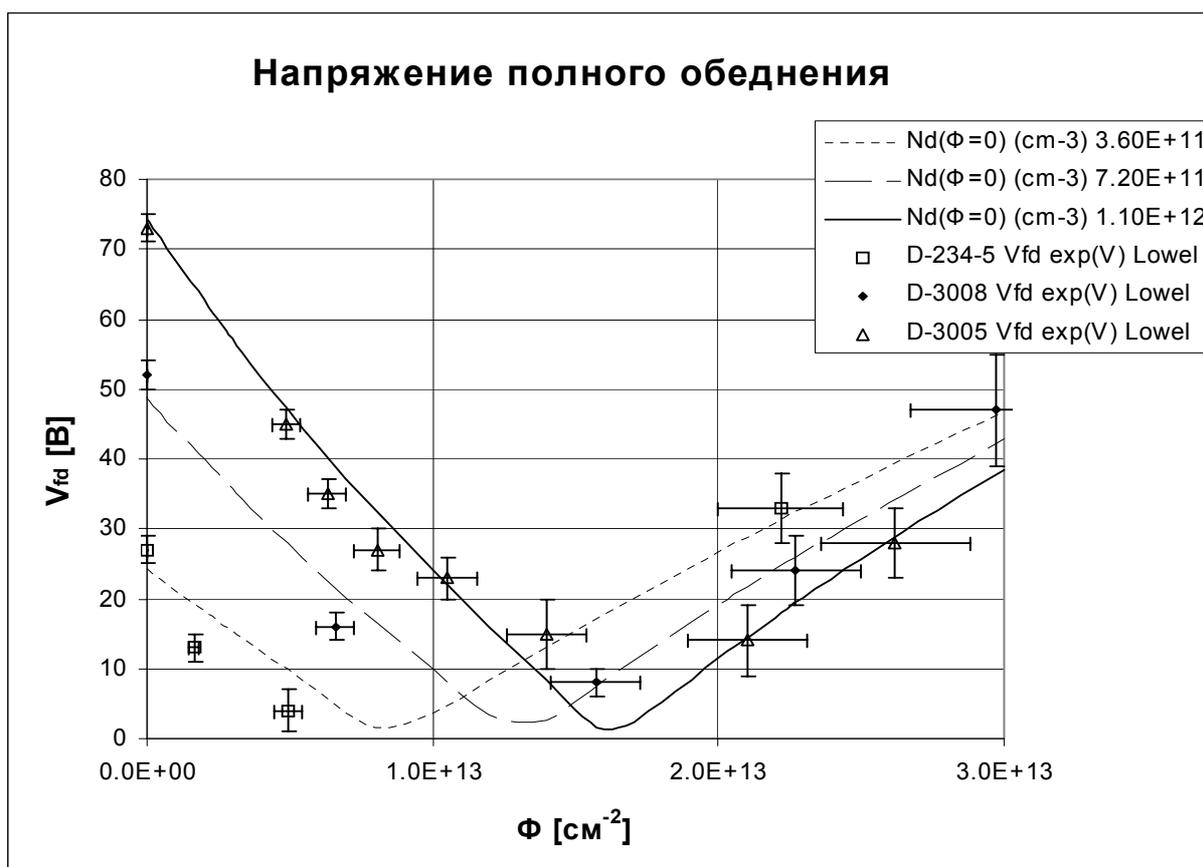
- Средний *общий ток утечки* годных детекторов в среднем составил  $I_{bias}=1.1$  мкА или  $i_{bias}=35$  нА/см<sup>2</sup> при полном обеднении и комнатной температуре, это означает, что среднее время жизни носителей в ОПЗ детектора  $\tau_0=1.1$  мс.
- Среднее *напряжение полного обеднения* составило  $V_{fd}=39\pm 15$  В (или удельное сопротивление кремния  $\rho_{n(\Phi=0)}=6\div 13$  кОм×см), что соответствует требованиям по радиационной стойкости.
- *Сопротивления поликремниевых резисторов и  $p^+$ -имплантации* удовлетворяет спецификации по номиналу и линейности -  $R_b=1$  МОм±20%.
- *Ёмкость переходного конденсатора* составила 13 пФ/см, что ниже планировавшихся 20 пФ/см. Это явилось результатом утолщения слоёв нитрида кремния в двухслойном диэлектрике этого конденсатора. Было принято решение не корректировать технологический процесс, так как полученная величина также удовлетворяет требованиям связанным с координатным разрешением детектора. А, кроме того, в процессе сборки элементов трека D0 выяснилось, что уменьшение толщин диэлектрических слоёв в переходном конденсаторе сильно повышает вероятность механического повреждения этих слоёв при микросварке.
- *Межстриповая ёмкость и соотношение  $C_{is}/C_b$* . Экспериментальное значение соотношения  $C_{is}/C_b$  лежит в диапазоне 3.5÷5, что соответствует требованиям спецификации.
- *Дефектные каналы*. Среднее количество текущих конденсаторов на годных детекторах составило 1.7 конденсатора на детектор (~0.15%).

Детекторы торцевых дисков из первой изготовленной партии проходили радиационные испытания. На облученных образцах измерялось напряжение полного обеднения, ток утечки детектора и межстриповое сопротивление. На [рис.7](#) представлены измеренные величины токов утечки детекторов и аппроксимация данных стандартной зависимостью (1). Величина параметра деградации  $\alpha$  при 20°C:  $\alpha = (5\pm 1)\times 10^{-17}$  А/см, что близко к обобщённым экспериментальным результатам других групп приведенным ранее:  $\alpha = 6.7\times 10^{-17}$  А/см (для измерений, сделанных после быстрого отжига при комнатной температуре +21°C).

Результаты измерений напряжений обеднения для различных величин эффективных интегральных потоков нейтронов приведены на [рис.8](#), здесь же показана аппроксимация данных стандартной зависимостью (2).



**Рис. 7.** Зависимости общего тока детектора от интегрального потока нейтронов (с энергией 1 МэВ) -  $\Phi$ . Объем детектора 0.9см<sup>3</sup>.



**Рис. 8.** Зависимости напряжение полного обеднения  $V_{fd}$  от интегрального потока нейтронов  $\Phi$  (с энергией 1 МэВ). Точки - экспериментальные данные, кривые - аппроксимация данных выражением (2) для соответствующих начальных концентраций легирующей n-примеси ( $N_{d(\Phi=0)}$ ).

Полученные значения параметров  $b$  и  $c$  составили:  $b = (2.5 \pm 0.5) \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  и  $c = (6 \pm 1) \times 10^{-14} \text{ см}^2$ , что близко к обобщенным экспериментальным результатам других групп:  $b_{exp} = (7 \pm 2) \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  и  $c_{exp} = (2.0 \pm 0.5) \times 10^{-14} \text{ см}^2$  (в области  $N_d \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

По результатам радиационных испытаний можно сделать несколько выводов:

1. Хорошее совпадение величины параметра деградации  $\alpha$  с ожидаемым значением свидетельствует о том, что основные элементы детектора – pn-переходы стрипов, нормально работают при облучении. Наблюдаемый рост тока утечки связан с уменьшением времени жизни носителей в объёме кремния, а вклад поверхностных токов в общий ток утечки детектора составляет менее 10% при дозах до 5МРад
2. Предполагая, что весь рост тока pn-переходов при облучении связан с падением времени жизни носителей мы получаем оценку этого времени  $\sim 1 \text{ мкс}$  при предельном облучении, что более чем на порядок превышает время сбора заряда из объёма детектора на рабочем напряжении  $V_{fd} + 20 \text{ В}$  –  $\tau_{acc} \approx 30 \text{ нс}$ . Это обеспечивает эффективность сбора заряда не ниже 99% при на рабочем напряжении  $V_{fd} + 20 \text{ В}$  и интегральных потоках облучения до  $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .
3. Точка инверсии типа проводимости кремния лежит в диапазоне эффективных интегральных потоков  $(1 \div 2) \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  в зависимости от начальной величины  $V_{fd}$ . При достижении этого диапазона, удельное сопротивление кремния сильно повышается. Следовательно, в процессе работы эксперимента, в этот момент можно снизить рабочее напряжение детекторов до  $20 \div 30 \text{ В}$  без потери амплитуды сигнала. В противном случае окажется, что напряжение смещения сильно превышает напряжение полного обеднения –  $V_{appl} > V_{fd}$  и повышается вероятность пробоя pn-переходов. При дальнейшем облучении напряжение смещения должно быть вновь повышено до исходного значения  $\sim 100 \text{ В}$ .
4. Величина межстрипового сопротивления лежит в мегаомном диапазоне при интегральных потоках  $\sim 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , следовательно, межстриповое деление заряда определяется в основном ёмкостным делением, и координатное разрешение КМСД не должно ухудшаться после инверсии типа проводимости в объёме кремния.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что **поведение изготовленных детекторов при облучении до  $5 \times 10^{13} \text{ н/см}^{-2}$  ( $\sim 1 \text{ МРад}$ ) соответствует требованиям эксперимента D0.**

**В пятой главе**, в начале, коротко описывается процедура сборки торцевых дисков, которую можно разбить на четыре этапа:

- сборка полуведжей,
- сборка веджей (два полуведжа склеиваются “спина-к-спине”),
- установка веджей на диск,
- монтаж готовых дисков в установку.

Упрощенный вид полуведжа представлен на [рис.9](#), общий вид собранного диска на [рис.10](#). В процессе сборки частей диска наиболее критической операцией было подсоединение стрипов детектора к микросхемам считывания SVX-2E. Соединение выполнялось алюминиевой проволокой толщиной 25мкм с помощью микросварки ультразвуком.

Также большое внимание при сборке уделялось точности установки детекторов, которая, естественно, сильно влияет на точность последующего восстановления треков в системе. В силу ограниченной точности измерительных устройств и юстировочных приспособлений, невозможно абсолютно точно установить детекторы в номинальное положение. Из-за этого возникает дополнительная ошибка в измерении положения треков. Как было показано ранее ошибка в определении координаты трека по  $\phi$  –  $\sigma_{det.\phi}$  в торцевых дисках не должна превышать 12мкм,

соответствующее ограничение на ошибку в определении координаты трека по R -  $\sigma_{det.R}$  составит  $\sigma_{det.R(max)} \approx \sigma_{det.} / \sin 7.5^\circ = 92 \text{ мкм}$ , где  $7.5^\circ$  стереоугол детекторов.

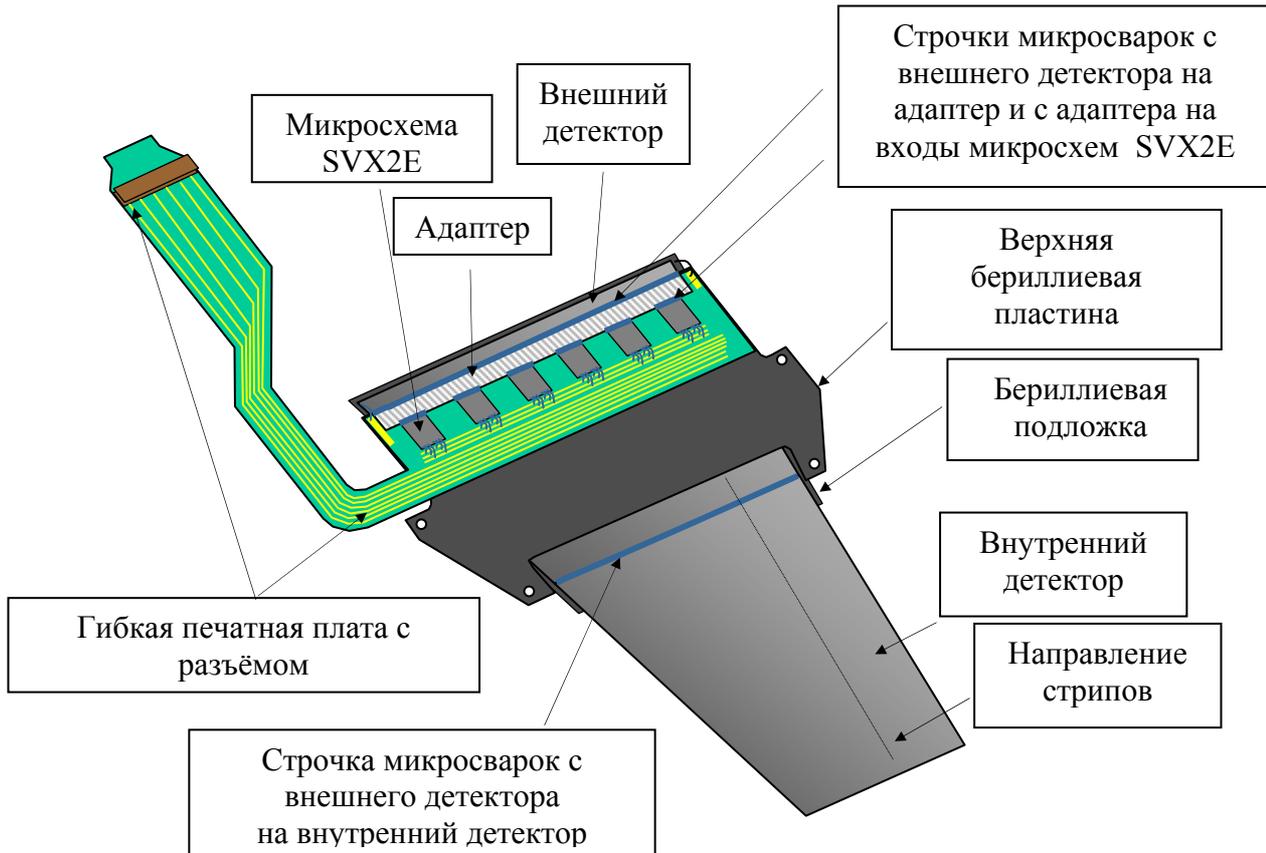


Рис.9. Внешний вид “полуведжа” – основного элемента торцевых дисков.

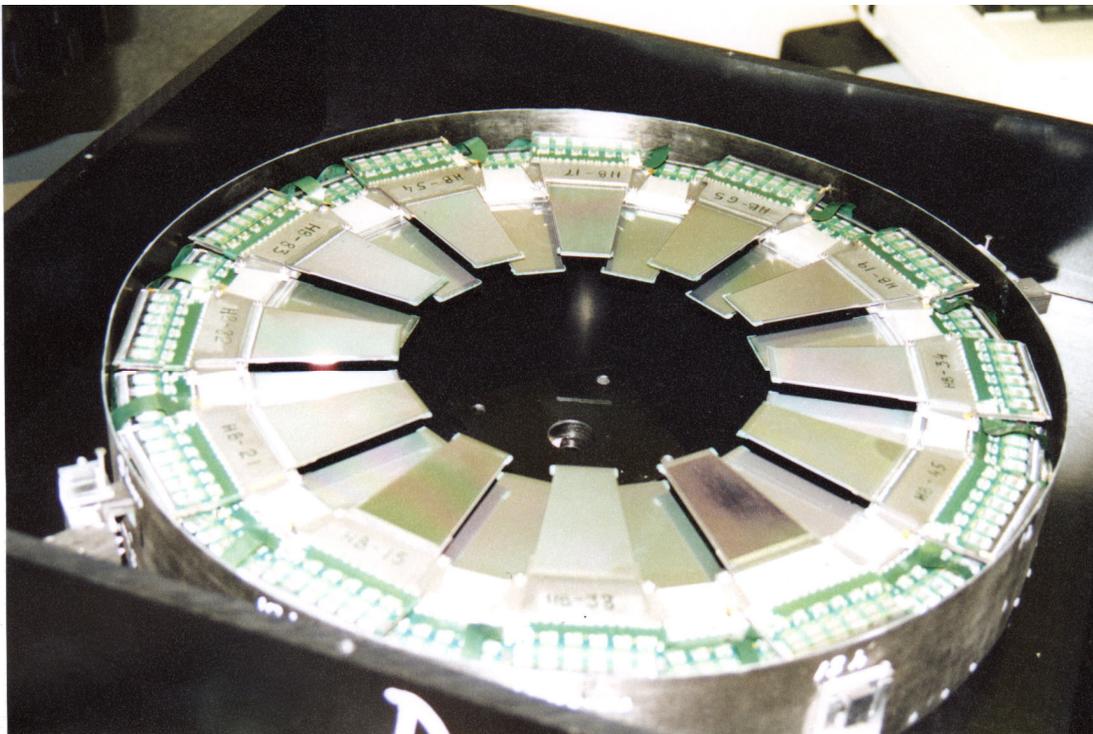


Рис.10. Внешний вид торцевого диска трековой системы эксперимента D0.

Точность сборки контролировалось по положению координат специальных меток, нанесенных на лицевую сторону детекторов в процессе их изготовления (см. рис.6).

Точность расположения меток на детекторе определяется точностью процесса фотолитографии и не хуже 0.5 мкм. Измерение положения меток проводилось на оптических измерительных машинах, точность измерений которых не хуже 1мкм. Сборки с максимальными отклонениями стрипов от номинальных положений -  $\Delta R(max) > 50\text{мкм}$  и  $\Delta\varphi(max) > 7\text{мкм}$  отбраковывались.

Предложенные методы сборки и контроля её точности позволили собрать диски с высокой точностью:

- диск №1:  $RMS_{\varphi} = 22\text{ мкм}$ ,  $RMS_R = 20\text{ мкм}$  ;
- диск №2:  $RMS_{\varphi} = 8\text{ мкм}$ ,  $RMS_R = 13\text{ мкм}$  ;
- диск №3:  $RMS_{\varphi} = 10\text{ мкм}$ ,  $RMS_R = 11\text{ мкм}$ ;
- диск №4:  $RMS_{\varphi} = 6\text{ мкм}$ ,  $RMS_R = 8\text{ мкм}$ .

Далее в пятой главе представлены методики и основные результаты испытаний частей дисков. Система испытаний модулей трекера включает три основных теста:

- функциональный тест;
- тест надёжности;
- лазерный тест.

Функциональный тест предназначен для быстрой проверки работоспособности одного модуля (обычно полуведж) в процессе сборки или ремонта. Функциональный тест проверяет работоспособность считывающих чипов и может определить некоторые проблемы с отдельными каналами детектора и электроники. Считается, что модуль прошел испытания, если ток утечки детекторов при рабочем напряжении не превышает 20мкА и все микросхемы сборки функционируют.

Тест надёжности предназначен для проверки надёжности работы модуля в условиях близких к реальным в течении нескольких суток. Кроме того, он позволяет выявлять шумящие каналы. По результатам теста годными считаются модули, где общее количество шумящих каналов плюс суммарное количество каналов с подозрением на другие дефекты не превышает 2%.

Лазерный тест предназначен для обнаружения каналов не реагирующих на воздействие в детекторе аналогичное ионизации от частицы. Тестируемый модуль крепится под оптическую систему, к которой по оптоволоконному кабелю подводится излучение импульсного лазера с длиной волны 1064нм, которое проникает в кремний на глубину  $>300\text{мкм}$ , вызывая генерацию носителей в объёме кремния, так же как при пролете ионизирующей частицы. Этот сигнал собирается в несколько соседних стрипов и считывается электроникой. Если сигнал от лазера в засвеченном канале  $<70\%$  от среднего по детектору, то канал считается "мертвым".

Важно отметить, что **стрипы с утечкой переходного конденсатора  $>100\text{нА}$  практически всегда соответствуют мертвым каналам.** С другой стороны, выяснилось, что **что большая часть мертвых каналов (более 80%) появилась в процессе монтажа,** причем основное подозрение падает на процесс микросварки детектора и усилителя. По результатам всех испытаний годными считались модули, где общее количество мертвых и шумящих каналов не превышает 2%.

Последняя часть пятой главы содержит некоторые методические результаты работы дисков в составе трекера установки D0. Эксперимент D0 начал работу в рамках сеанса Run-2 весной 2001 года. Торцевые диски были включены в общую систему нахождения треков частиц и определения их параметров. В частности, информация с дисков используется для выделения событий с  $B$ -мезоном (" $b$ -tagging"), что важно, например, при поиске событий с  $t$ -кварком, распад которого с высокой вероятностью происходит по каналу  $t \rightarrow Wb$  и адронизацией  $b$ -кварка в  $B$ -мезон. Как было показано в

главе 2, эффективность такого выделения в области  $|\eta|>2$  полностью определяется точностью определения “промахов” треков в торцевых дисках. Соответствующие зависимости суммарной эффективности выделения (“*b*-tagging”) представлены на рис.11. Видно, что в области торцевых дисков эффективность падает примерно вдвое, что соответствует результатам главы 2, показывающим неизбежное ухудшение точности определения “промахов” в области  $|\eta|>2$ . С другой стороны, эффективность выделения событий с *b*-кварком сохраняется в этой области на уровне 30%, что существенно повышает акцептанс установки в целом.

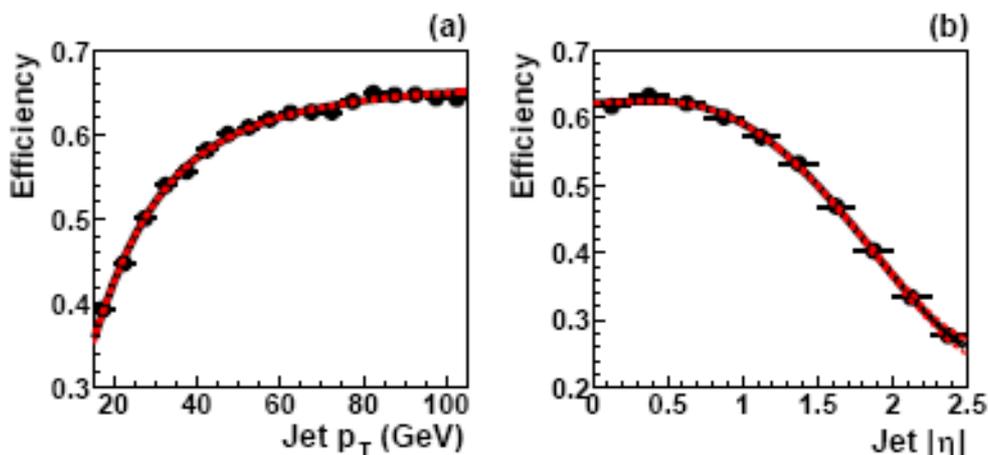


Рис. 11. Суммарная эффективность выделения событий с *b*-кварком в зависимости от поперечного импульса (а) и псевдобыстроты (б) струи с *b*-кварком.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

**Приложение:** Список соавторов “The D0 collaboration” от российских институтов на 2006-2008 г.г.

V.M. Abazov<sup>36</sup>, Alexeev<sup>36</sup>, G. Alkhalov<sup>40</sup>, E.E. Boos<sup>38</sup>, V. Bunichev<sup>38</sup>, S.P. Denisov<sup>39</sup>, L.V. Dudko<sup>38</sup>, P. Ermolov<sup>38</sup>, V.N. Evdokimov<sup>39</sup>, V. Gavrilov<sup>37</sup>, D. Karmanov<sup>38</sup>, Y.M. Kharzhev<sup>36</sup>, A.V. Kozelov<sup>39</sup>, V.A. Kuzmin<sup>38</sup>, A. Leflat<sup>38</sup>, V.V. Lipaev<sup>39</sup>, A. Lobodenko<sup>40</sup>, V.L. Malyshev<sup>36</sup>, M. Merkin<sup>38</sup>, P. Neustroev<sup>40</sup>, G. Obrant<sup>40</sup>, M. Perfilov<sup>38</sup>, G. Safronov<sup>37</sup>, Y. Scheglov<sup>40</sup>, A.A. Shchukin<sup>39</sup>, V. Stolin<sup>37</sup>, D.A. Stoyanova<sup>39</sup>, V.V. Tokmenin<sup>36</sup>, L. Uvarov<sup>40</sup>, S. Uvarov<sup>40</sup>, I.A. Vasilyev<sup>39</sup>, L.S. Vertogradov<sup>36</sup>, Y.A. Yatsunenkov<sup>36</sup>, E.G. Zverev<sup>38</sup>

36 - Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

37 - Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

38 - Moscow State University, Moscow, Russia

39 - Institute for High Energy Physics, Protvino, Russia

40 - Petersburg Nuclear Physics Institute, St. Petersburg, Russia

Работа поступила в ОНТИ “28” мая 2008 г.  
Цифровая печать. Тираж 100 экз.  
Заказ № Т-763

Отпечатано в типографии КДУ  
Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)