

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

КУРСОВАЯ РАБОТА

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА  
ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЁЛЫХ ЯДЕР НА УСКОРИТЕЛЕ  
НУКЛОТРОН(ОИЯИ)**

Выполнил студент  
203 группы  
Злобин Савелий Сергеевич

\_\_\_\_\_

Научный руководитель  
к.ф.- м.н. Подорожный Дмитрий Михайлович

\_\_\_\_\_

Допущена к защите \_\_\_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

Москва  
2023

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1 Анализ стойкости и исследование интегральных схем с помощью ДЧС</b>	<b>3</b>
1.1 Линейные потери энергии (ЛПЭ) . . . . .	4
1.1.1 Модель Бете-Блоха . . . . .	4
1.2 Анализ особенностей стойкости к эффектам, вызванным однократным воздействием . . . . .	6
1.3 Устройство основных методов исследования интегральных схем . . .	7
1.3.1 Импульсные лазеры . . . . .	7
1.3.2 Ускорители тяжёлых частиц . . . . .	8
1.4 Детекторная часть станции (ДЧС) . . . . .	10
<b>2 Установка для испытаний интегральных микросхем</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 Требования к трековой системе для экспериментального изучения чувствительности отдельных эффектов . . . . .	13
2.2 Детекторная часть установки . . . . .	14
<b>Выводы</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>17</b>

## Введение

В последние десятилетия наблюдается увеличение объема использования электроники в различных отраслях промышленности, науки и быта. Однако современные интегральные микросхемы всё также уязвимы к воздействию тяжелых ядер, что может привести к сбоям и отказам в работе систем, оснащенных такими микросхемами. Такие случаи неоднократно происходили:

1. В 1962 году космическая радиация повредила аппаратуру на борту первого американского спутника связи Telstar, приведя к сбою в передаче данных.
2. В 1975 году аппаратура на борту космической станции «Союз» вышла из строя из-за сильной солнечной вспышки, что привело к необходимости экстренной эвакуации команды.
3. В 1984 году аппаратура на борту космического телескопа «Хаббл» вышла из строя из-за повреждения электронных компонентов космической радиацией.
4. В 2003 году космическая радиация повредила аппаратуру на борту спутника связи АМС-12, приводя к потере контроля над спутником и его переходу на другую орбиту.
5. В 2017 году космическая радиация повредила аппаратуру на борту спутника связи Galaxy 15, приводя к его выходу из строя и переходу на другую орбиту.

Таким образом, необходимо проводить тестирование интегральных микросхем на стойкость к воздействию тяжелых ядер, чтобы избежать подобного в будущем.

В данной курсовой работе мы рассматриваем установку для испытаний интегральных микросхем (ИС) на воздействие тяжелых ядер (ТЗЧ) на ускорителе НУКЛОТРОН. Данный ускоритель является одной из наиболее мощных установок в мире, предназначенных для исследования ядерных реакций. Он обладает высокой энергией, что позволяет воспроизводить условия космического пространства и оценивать стойкость ИС к воздействию космической радиации.

В работе описывается устройство установки, а также принцип ее работы. Описаны процедуры обработки результатов испытаний и их анализ.

Целью данной работы является изучение принципов работы установки для испытания микросхем на воздействие ТЗЧ на ускорителе НУКЛОТРОН.

# Глава 1. Анализ стойкости и исследование интегральных схем с помощью ДЧС

Современные микросхемы состоят из элементов с субмикронными размерами, что приводит к тому, что меньшие заряды и токи необходимы для хранения и изменения информации. Электроника, находящаяся в космическом пространстве, подвергается влиянию солнечных лучей и галактических частиц, причём чем выше скорость функционирования сложных больших интегральных микросхем (СБИС), тем сильнее это влияние. Эти факторы накладываются друг на друга из-за чего даже частицы с маленькими энергиями и зарядами могут привести к сбою в работе СБИС. При создании специализированной электроники для работы в условиях космической радиации, необходимо учесть два типа возникающих явлений [1]:

- накопленная доза ионизации — Total Ionizing Dose (TID);
- эффекты однократного действия (ЭОД) — Single Event Effect (SEE).

Накопленная доза ионизации приводит к постепенному ухудшению работы схемы из-за накапливаемого заряда. SEE вызываются одиночными высокоэнергетическими ионизирующими частицами, и их воздействие носит перемежающийся характер, связанный со случайным попаданием отдельных частиц в чувствительные микрообъемы элементов памяти, вызывая, в частности, переключение логического состояния [1].

ЭОД можно разделить на два типа на обратимые и необратимые [2]. В данный момент существуют эффективные методы обнаружения и коррекции обратимых переключений, которые реализуются как на аппаратном уровне, так и на уровне программного обеспечения.

Большую опасность представляют события, которые приводят к необратимым изменениям в микросхеме. Основными разновидностями таких катастрофических отказов являются радиационно-индуцированная защёлка (single-event latchup, SEL), радиационное выжигание мощных МОП-транзисторов (single-event burnout, SEB), а также пробой окислов транзисторов, вызванный одиночной частицей (single-event gate rupture, SEGR).

- При SEL внешние заряды, созданные ионизирующим излучением, могут запирают внутренние структуры полупроводникового прибора в состоянии с

высоким сопротивлением, что может привести к потере функциональности микросхемы или даже ее разрушению.

- SEB происходит из-за кумулятивного эффекта накопления зарядов в изоляционных слоях МОПТ под воздействием высокоэнергетических частиц, таких как космические лучи или радиоактивные частицы в окружающей среде. Это может привести к увеличению порогового напряжения в защитном диоде МОПТ, снижению коэффициента передачи тока и уменьшению максимальной мощности, которую МОПТ может выдержать.
- SEGR — это явление, при котором одиночная заряженная частица, попадая в оксидный слой транзистора, вызывает пробой в этом слое. Это может привести к разрыву металлической воротной линии транзистора и образованию постоянного короткого замыкания между истоком и стоком.

## 1.1 Линейные потери энергии (ЛПЭ)

В данной работе достаточно часто упоминается такой термин как линейные потери энергии (ЛПЭ), поэтому было бы неплохо его пояснить. ЛПЭ — это потери энергии заряженных частиц при их прохождении через вещество, вызванные возбуждением атомов и ионизацией среды. ЛПЭ зависят от типа частицы, ее энергии и среды, через которую она проходит.

$$\frac{dE}{dx} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_e + \left( \frac{dE}{dx} \right)_n \quad (1.1)$$

Удельные потери энергии заряженных частиц определяются в ядерной физике для столкновений частиц с электронами вещества (ионизационные потери, обозначаются индексом “e”) и с ядрами вещества (атомно-ядерные потери, обозначаются индексом “n”). Значения этих величин в зависимости от энергии заряженных частиц известна для многих веществ [3; 4]. На Рис. 1.1 показаны ЛПЭ в зависимости от частиц и их энергий.

### 1.1.1 Модель Бете-Блоха

Модель Бете-Блоха — это математическая модель, описывающая взаимодействие заряженных частиц с веществом. Она представляет собой аппроксимацию зависимости линейных потерь энергии (ЛПЭ) заряженных частиц в веществе от их скорости. Модель основана на законах электродинамики и учитывает такие

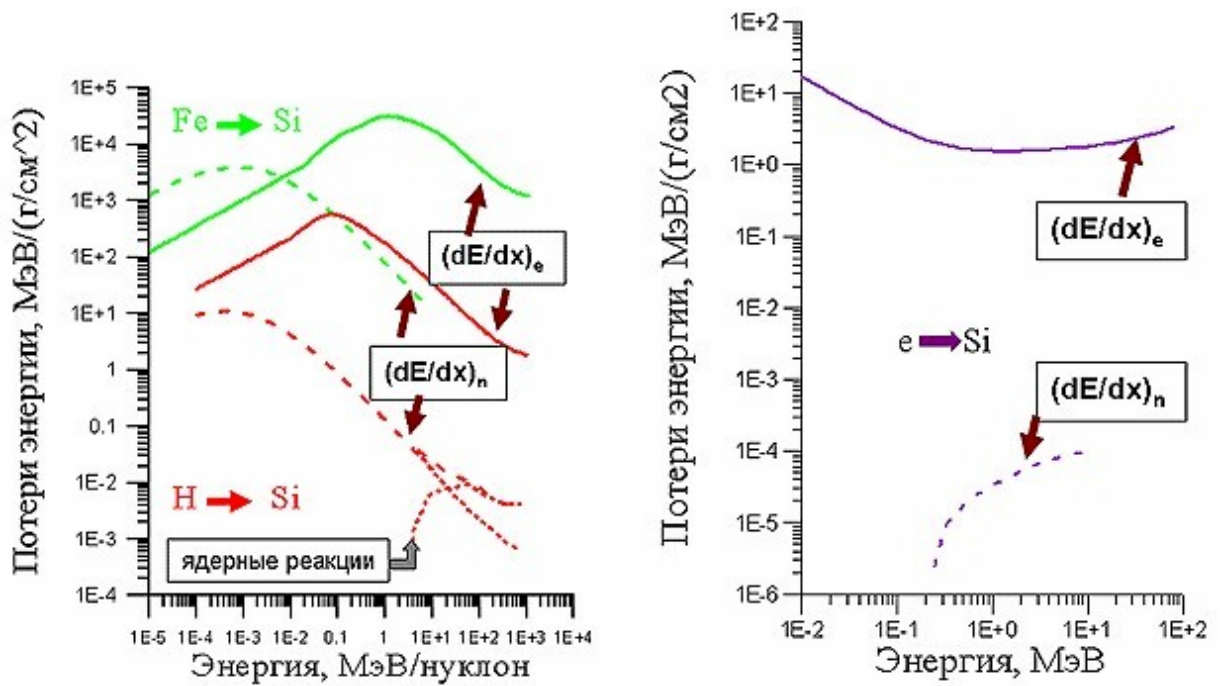


Рис. 1.1: Для примера на рисунках приводятся значения  $(dE/dx)_e$  (сплошные кривые) и  $(dE/dx)_n$  (пунктирные кривые) в кремнии **Si**, в зависимости от энергии протонов (ядер водорода **H**) (красные кривые), ядер железа **Fe** (зеленые кривые) и электронов **e** (фиолетовые кривые). Учтено, что при больших энергиях протонов ( $> 30$  МэВ) дополнительный вклад в их атомно-ядерные потери энергии дают ядерные реакции. Важно подчеркнуть, что для высокоэнергичных заряженных частиц, которые присутствуют в космическом пространстве,  $(dE/dx)_e \gg (dE/dx)_n$ .

факторы, как рассеяние на атомах и молекулах, ионизация атомов и молекул, возбуждение атомов и молекул и торможение электронов в проводящих материалах.

Модель Бете-Блоха широко используется в физике элементарных частиц и ядерной физике для описания взаимодействия заряженных частиц с веществом в различных условиях. Она позволяет определить потери энергии частиц в материале, что важно для расчета проникновения заряженных частиц через вещество и для понимания физических процессов, происходящих в детекторах частиц.

Однако эта модель имеет некоторые ограничения и плохо описывает другие процессы, такие как ионизация вещества. Кроме того, модель не учитывает эффекты квантовой механики, которые могут быть важными в некоторых случаях, например, в описании поведения электронов в кристаллах.

Ионизационные потери тяжелых заряженных частиц с зарядом  $z$  в среде с зарядом  $Z$  описываются формулой Бете-Блоха:

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A \beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (1.2)$$

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2} \quad (1.3)$$

$$\frac{K}{A} = \frac{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2}{A} \quad (1.4)$$

где  $I$  из уравнения (1.2) — это средний потенциал ионизации;

где  $T_{max}$  из уравнения (1.3) — это максимальная кинетическая энергия, которая может быть передана частицей с массой  $M$  свободному электрону в одном соударении;

где  $\delta$  из уравнения (1.2) — это поправки, учитывающие эффект плотности среды.

## 1.2 Анализ особенностей стойкости к эффектам, вызванным однократным воздействием

На данный момент для изучения стойкости СБИС применяются два метода, которые дополняют друг друга: исследования в пучках тяжёлых ядер низких энергий и исследования с помощью импульсных лазеров [5–9]. Эти методы имеют как свои достоинства, так и недостатки [10; 11]. Одной из проблем, с которыми приходится сталкиваться при исследовании на ускорителях, является размер пучка, который зачастую превышает размеры образца, из-за чего можно

получить лишь усреднённые по всему образцу данные. При этом вполне понятно, что значения линейных потерь энергии (ЛПЭ) может отличать для различных частей СБИС, ведь транзисторы, уязвимые к переключению логического значения микрообъёмы памяти и другие элементы, которые чувствительны к попаданию заряженных частиц, распределены по микросхеме неравномерно.

Одно из решений для избежания трудностей при измерении сечений ЭОД — использование лазерного имитатора с сфокусированным пятном диаметром в несколько микрометров и точностью его наведения, что позволяет обойти данную проблему [9; 11]. Однако, такой метод имеет свои сложности. Например, на поверхности современных СБИС имеется многослойная металлизация, которая может вызывать «холостые выстрелы» лазерного излучения и, таким образом, искажать измеренную величину сечений ЭОД. Даже если лазерное излучение проникает сквозь защитные слои, его ЛПЭ оказываются заниженными по сравнению с реальной ионизирующей частицей, что может приводить к систематическим ошибкам при определении пороговых ЛПЭ.

Чтобы решить эти проблемы, можно сочетать исследования на лазерных имитаторах с экспериментами на ускорителях ионов, используя специальную аппаратуру для точного определения места попадания частицы ускорителя в образец. Однако, такие исследования не могут полностью заменить испытания с лазерным имитатором, потому что проведение измерений на ускорителе достаточно дорого, особенно при необходимости измерений в широком диапазоне ЛПЭ для различных видов ЭОД [10]. Несмотря на это, использование координатной привязки при испытаниях на ускорителе позволит калибровать данные, полученные на лазерном имитаторе, путем измерения, например, систематических сдвигов критических величин ЛПЭ. В роли аппаратуры, которую можно использовать для таких исследований, выступают трековые системы.

## **1.3 Устройство основных методов исследования интегральных схем**

### ***1.3.1 Импульсные лазеры***

Для создания импульсов в импульсных лазерах используется квантовый генератор, состоящий из активной среды, оптического резонатора и элемента, обеспечивающего возбуждение активной среды. Активная среда может быть

различной природы, например, твердотельной (кристаллы, стекла) или газовой ( $CO_2$ ).

Оптический резонатор состоит из зеркал, отражающих световые лучи внутри резонатора, создавая тем самым оптическую обратную связь. Один из зеркал является частично прозрачным, что позволяет части света выходить из резонатора в виде лазерного излучения. Для наглядности стоит приложить схему устройства рубинового лазера Рис. 1.2.

Возбуждение активной среды может осуществляться различными способами, например, электрическим разрядом, светом, химической реакцией и т. д. При возбуждении активной среды создается инверсная заселенность атомов или молекул, которые затем при вынужденном излучении начинают излучать лазерное излучение. Это излучение затем усиливается при прохождении через оптический резонатор и выходит из лазера в виде коротких импульсов.

Импульсные лазеры широко используются в медицине, науке, промышленности, а также в военных исследованиях. Например, они могут использоваться для маркировки материалов, лазерной резки и сварки, а также для создания изображений в медицинской диагностике.

### **1.3.2 Ускорители тяжёлых частиц**

Ускорители тяжелых частиц отличаются от ускорителей легких частиц своими большими размерами и мощными магнитными полями, необходимыми для ускорения и фокусировки тяжелых заряженных частиц. Они используются для исследования ядерных реакций и физики высоких энергий.

Существует несколько типов ускорителей тяжелых частиц, включая:

1. Циклотроны: это круглые ускорители, которые используют переменное магнитное поле для ускорения частиц по спирали. Циклотроны могут ускорять заряженные частицы до нескольких МэВ, что достаточно для медицинских приложений и изучения некоторых свойств ядер.
2. Синхротроны: это ускорители, которые используют постоянные магнитные поля и переменные электрические поля для ускорения и фокусировки частиц. Они могут достигать энергий до нескольких ТэВ и используются в исследованиях физики элементарных частиц и астрофизики.
3. Линейные ускорители (линаки): это прямолинейные ускорители, которые используют переменные электрические поля для ускорения частиц. Линаки

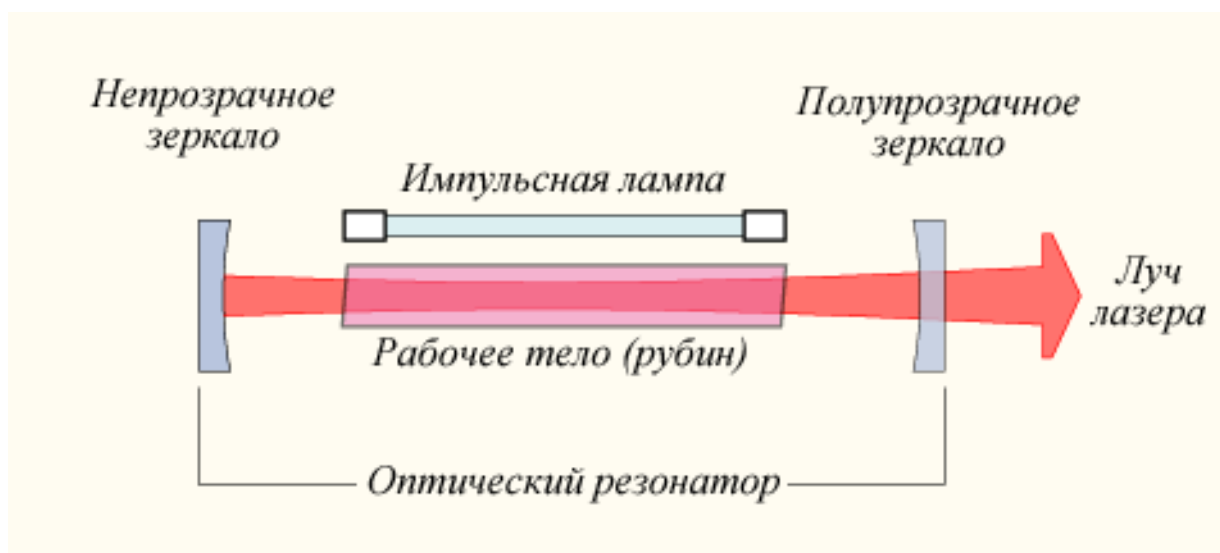


Рис. 1.2: Схема устройства рубинового лазера.

могут достигать энергий до нескольких ГэВ и используются в медицинских приложениях и изучении свойств ядер.

4. Кольцевые ускорители: это ускорители, которые используют кольцевую конфигурацию магнитных полей для ускорения и фокусировки частиц. Они могут достигать энергий до нескольких ТэВ и используются для исследования физики элементарных частиц и ядерной физики.

Ускоритель Нуклотрон является сверхпроводящим синхротроном [12]. Схематично устройство синхротрона выглядит так Рис. 1.3.

## 1.4 Детекторная часть станции (ДЧС)

ДЧС — это опытная установка, которая используется для восстановления траектории (трека) и энергии частиц, попадающих в нее, на основе энергосъемления в ее слоях [13; 14]. Установка состоит из нескольких плоскостей детекторов (ДП), которые расположены в перпендикулярном направлении к пучку ускорителя и расположены друг за другом (расположение плоскостей приведено на Рис. 1.4).

В системе используются плоскости трёх типов:

- детектирующие плоскости с высоким координатным разрешением (ДП-ВКР);
- детектирующие плоскости с низким координатным разрешением (ДП-НКР);
- детектирующие плоскости без координатной чувствительности (ДП-БКЧ).

Все типы ДП имеют одинаковую центрально-симметричную форму, расположенную вдоль оси пучка ускорителя, независимо от установленного детектора. Кремниевый детектор, являющийся чувствительным элементом, находится в центре каждой плоскости. Крепление ДП к пучку одинаково для всех типов плоскостей.

Ещё к ДЧС относятся блоки, которые не устанавливаются под пучок ускорителя:

- блок плат контроллеров и платы выработки сигнала запуска чтения данных (БК — блок контроллеров);
- блок связи с компьютером управления ДЧС;
- блоки питания.

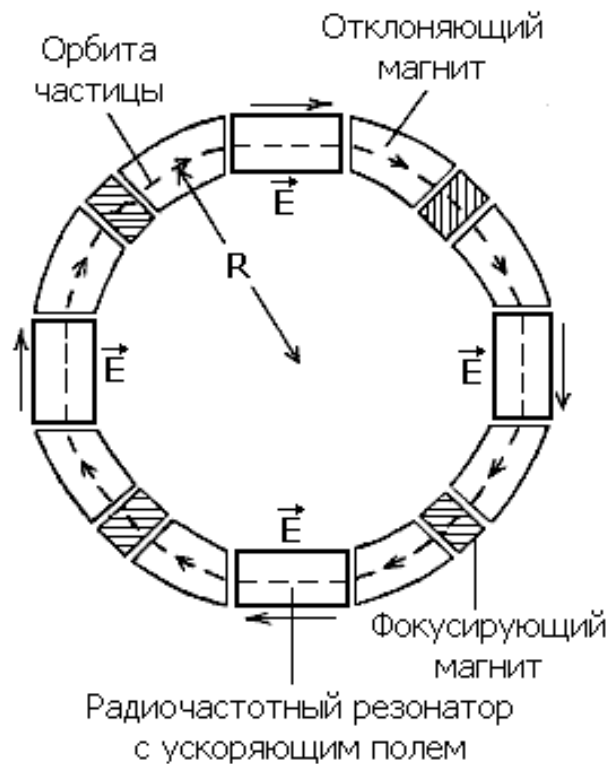


Рис. 1.3: Схема синхротрона.

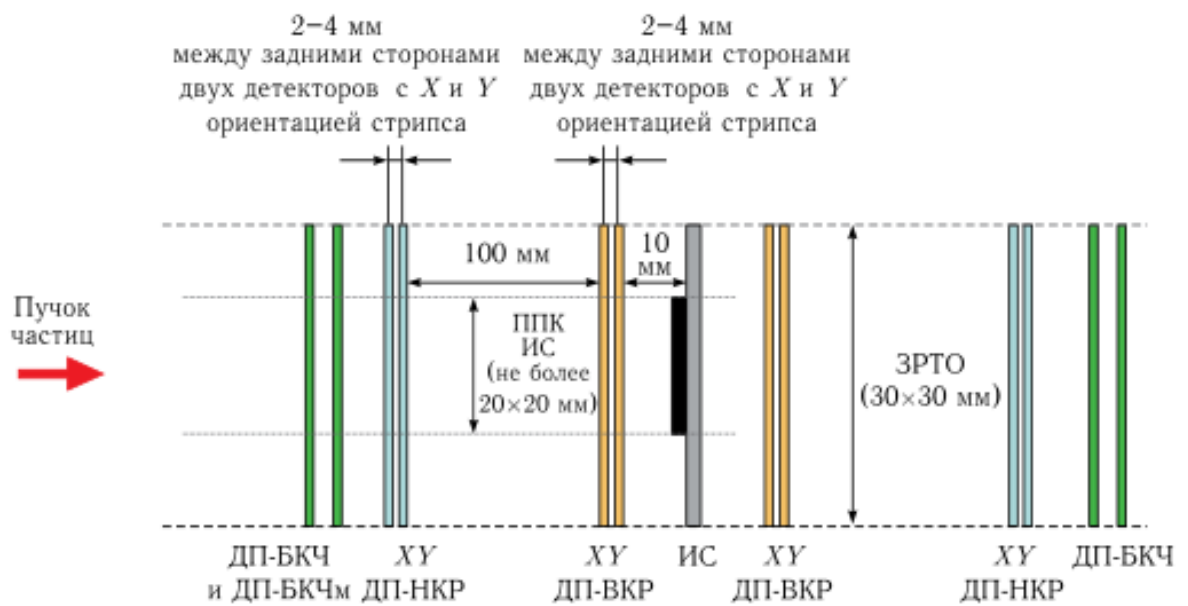


Рис. 1.4: Схема расположения плоскостей ДЧС.

К ДЧС также относится управляющий компьютер, на котором находится специализированное ПО.

## Глава 2. Установка для испытаний интегральных микросхем

### 2.1 Требования к трековой системе для экспериментального изучения чувствительности отдельных эффектов

В России для изучения устойчивости микросхем к воздействию ТЗЧ используются ускорители ионов с энергией пучка около сотен МэВ/нуклон. Однако, трековая система не может быть установлена на стенд У-400 (ОИЯИ), так как энергия частиц-снарядов недостаточна для прохождения значительной толщины координатных датчиков. В настоящее время создается стенд СОДИТ на базе ускорителя НУКЛОТРОН, где энергия ядер может варьироваться в диапазоне 0,5 – 4,5 ГэВ/нуклон. Это позволяет расположить перед образцом несколько координатных детекторов.

Перечислим основные особенности трековой системы для задачи исследования радиационной стойкости:

1. Малая суммарная толщина датчиков;
2. Умеренные требования к координатному разрешению;
3. Высокие требования к энергетическому разрешению;
4. Высокое быстродействие системы;
5. Высокая радиационная стойкость датчиков и считывающей электроники.

Первое требование очевидно связано с тем, что частицы в пучке имеют невысокую энергию. Связанное с этим второе требование — многократное рассеяние нерелятивистских частиц в координатных датчиках приводит к отклонению траекторий от прямолинейных и вызывает неустраняемые случайные ошибки в восстановлении координат. Увеличение точности измерений в самих координатных датчиках не позволяет компенсировать эти ошибки.

В отличие от классических задач физики высоких энергий, где энергетическое разрешение в трековых датчиках не является критическим, третье требование для рассматриваемой трековой системы является уникальным. В нашей задаче хорошее энергетическое разрешение в трековых датчиках играет важную роль, поскольку необходимо точно измерять потерю энергии частиц-снарядов после прохождения через трекер, чтобы определить ЛПЭ в образце с высокой точностью.

Требование быстродействия не является уникальным для нашей трековой системы, так как современные трекеры, применяемые в коллайдерных экспериментах, также должны обрабатывать потоки частиц до  $10^7 c^{-1}$ . Однако, в нашем случае потоки частиц не банчируются, а постоянны или имеют периодичность порядка нескольких секунд. Это отличается от коллайдерных экспериментов, где потоки частиц обычно сгруппированы в короткие импульсы продолжительностью несколько наносекунд, разделенные значительными промежутками времени.

Для обеспечения работоспособности системы на протяжении нескольких исследовательских сеансов очевидно необходима высокая радиационная стойкость.

## 2.2 Детекторная часть установки

Кремниевые стриповые детекторы наилучшим образом соответствуют предъявленным требованиям. В данной системе трек частицы восстанавливается на основе данных, полученных с двух пар датчиков. Каждая пара датчиков даёт координату частицы (X или Y). Две пары датчиков обеспечивают две точки, по которым определяется прямолинейный трек частицы и точка её попадания в образец. Толщина датчиков должна быть выбрана на основе моделирования установки и составляет примерно 300 мкм.

Шаг стрипов в стриповом датчике определяет его координатное разрешение, однако для получения сигнала с каждого стрипа необходимо определенное время. Для повышения скорости работы системы необходимо оптимизировать ее по параметрам "координатное разрешение — скорость что будет выполнено на этапах моделирования установки [15]. В качестве предварительного решения предлагается использовать пары датчиков с шагом 1 мм на большом расстоянии от образца и пары датчиков с шагом 100 мкм вблизи образца. Таким образом, плохое разрешение "дальних" датчиков будет компенсироваться большой длиной пролетного промежутка от них до образца. Ожидаемая точность определения места попадания частицы в образец должна быть не менее 50 мкм.

Для датчиков необходимо выбирать размеры, которые больше, чем размеры тестируемого образца. Предположительно, будут использоваться датчики размером  $3 \times 3$  см. На Рис. 2.1 приведена упрощенная схема трековой части стенда СОДИТ.

Особое внимание следует уделить требованию высокого энергетического разрешения в трековых датчиках. При регистрации ТЗЧ сигнал значительно пре-

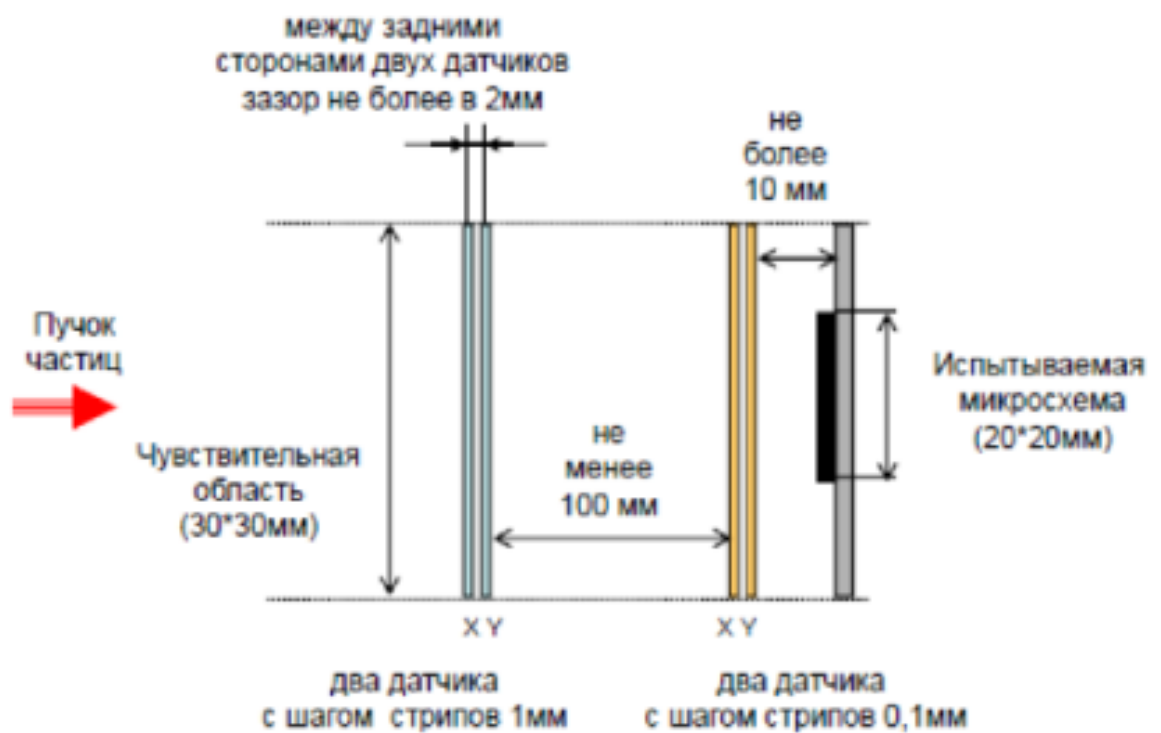


Рис. 2.1: Упрощенная схема трековой системы в стенде СОДИТ ускорителя НУКЛОТРОН (ОИЯИ) для определения мест попадания частиц-снарядов в исследуемую микросхему.

вышает сигналы от однозарядных частиц в стандартных трековых системах, что делает невозможным использование стандартной электроники. Вместе с НИЯУ МИФИ, НИИЯФ МГУ разработал специализированную микросхему НУКЛОН для кремниевых датчиков с уникальным уровнем входного сигнала (до 100 пКл), которая позволяет регистрировать ядра элементов вплоть до золота, что обеспечивает необходимый исследовательский диапазон сигналов ТЗЧ. Кроме того, в датчиках трековой системы предусмотрено считывание сигналов с обратной стороны на один считывающий канал, что позволяет разделить координатную и энергетическую задачу на две электронные схемы. Микросхема НУКЛОН будет использоваться для решения координатной задачи, в то время как для энергетической задачи планируется создать специализированный тракт с помощью малошумящего операционного усилителя и настройки его на работу с сигналами нужного уровня.

## **Выводы**

1. В данной работе были рассмотрены и описаны различные виды воздействия радиации на интегральные схемы. Также были рассмотрены такие методы как импульсные лазеры и ускорители ТЗЧ для исследования микросхем. Рассмотрено общее устройство детекторной части станции, которая позволяет отслеживать треки частиц и их энергии.
2. Представлено устройство, которое может увеличить точность измерения параметров чувствительности электроники к одиночным радиационным эффектам. Оно основано на восстановлении треков частиц, падающих на образец. Устройство представляет собой набор стриповых кремниевых детекторов с шагом 1 мм и 100 мкм, которые позволяют определить точку попадания частицы на образец с точностью до десятков микрометров. Разработка этого устройства осуществляется для стенда СОДИТ на ускорителе НУКЛОТРОН в ОИЯИ для исследования радиационной стойкости интегральных микросхем.

## Литература

1. *Танеро К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. — 2012. — С. 304.
2. Single Event Effects Specification. — URL: <https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/SEEspec.pdf>.
3. *Ziegler J. F.* — 1995.
4. Радиационные эффекты. — URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/crd2.htm>.
5. *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на ИМС // М.: Радио и связь. — 2004. — С. 320.
6. *Allen G. R.* Compendium of Test Results of Single Event Effects Conducted by the Jet Propulsion Laboratory // IEEE Radiation Effects Data Workshop Record. — 2008.
7. *Pouget V.* Fundamentals of Laser SEE Testing and Recent Trends // RALFDAY, EADS France, Suresnes. — 2009. — Сент.
8. *Jones R.* Comparison between SRAM SEE Cross-Section from Ion Beam Testing with Those Obtained Using a New Picosecond Pulsed Laser Facility // IEEE Trans. NS. — 2000. — С. 539–544.
9. Возможности использования локального лазерного излучения для моделирования эффектов от воздействия отдельных ядерных частиц в ИМС / А. И. Чумаков [и др.] // Микроэлектроника Т.33. — 2004. — № 2. — С. 128–133.
10. Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов / А. В. Яненко [и др.] // Спецтехника и связь. — 2011. — № 4, 5.
11. *Чумаков А. И.* Возможности и ограничения лазерных методов при оценке параметров чувствительности БИС к эффектам воздействия тяжелых заряженных частиц // Безопасность информ. технологий. — 2019. — № 3.
12. Нуклотрон. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/projects/nuclotron.php>.

13. ТЕКУЩИЙ СТАТУС МИССИИ «НУКЛОН-2» / О. В. Васильев [и др.] // Письма в ЭЧАЯ Т.18. — 2021. — № 1. — С. 35—57.
14. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТА ДЧС-NISA / О. В. Васильев [и др.] // Письма в ЭЧАЯ Т.17. — 2020. — № 6. — С. 833—843.
15. Применение трековых методов при исследовании параметров чувствительности интегральных микросхем к воздействию тяжелых заряженных частиц. / О. В. Васильев [и др.]. —