

РЕФЕРАТ

Отчёт 66 с., рис.25, табл.5, , 1 приложение.

ALICE, ITS, модернизация ITS, пиксельный детектор, EUTelescope, MAPS, ALPIDE, трекинг частиц, кварк- глюонная плазма, циклотрон, радиационная устойчивость, кластеризация.

Цель работы — Комплексное исследование кремниевых пиксельных детекторов для модернизации Внутренней Трековой Системы эксперимента ALICE

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Анализ данных детекторов во время тестов на наклонном пучке в ускорительном комплексе протонного синхротрона (PS) CERN
2. Изучение характеристик облученного чипа ALPIDE.
3. Разработка программного обеспечения для установки по проведению эксперимента по облучению на циклотроне U-120M

В процессе выполнения работы проводилось изучение внутренней трековой системы ALICE, принципов работы пиксельных сенсоров, принципов считывания информации в детекторе ALPIDE, способы исследования эффективности трекинга частиц, установка типа телескоп, установка циклотрон, радиационная устойчивость.

Результаты проекта будут использованы для дальнейшей модификации детектора ALPIDE, в целях симуляционной группы ITS ALICE.

Содержание

1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Кварк – глюонная плазма.....	5
1.1.2 Характеристика КГП.....	6
1.2 Детектор ALICE.....	6
1.3 Планы по модификации ALICE.....	9
1.4. Физические Цели обновления ITS ALICE.....	9
1.5. Стратегия обновления ITS ALICE.....	10
1.6. Концепт обновления ITS ALICE.....	11
1.7. Макет обновления ITS.....	13
1.8.1 Пиксельный чип MAPS.....	14
1.8.2 Собирающий диод.....	18
1.8.3. Генерация и сбор заряда в MAPS.....	20
1.9 Архитектура Чипа.....	24
1.10.1.1 Сброс при помощи диода.....	25
1.10.1.2 Сброс с использованием ПМОС транзистора.....	27
1.10.2. Аналоговая часть цепи по переднему фронту.....	27
1.10.3 Порог заряда.....	30
1.10.3 Напряжения и токи смещение цепи по переднему фронту.....	31
1.11. Адрес – Ресет Энкодер (AERD).....	33
1.12 Тестовые платы.....	34
2. Практическая часть.....	36
2.1 ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТЕКТОРА.....	36
2.1.1 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	36
2.1.1.1 Ассинхронный циклотрон U-120М.....	37
2.1.1.2 Описание установки для проведения тестов.....	40
2.1.1.3 Описание эксперимента.....	42
2.1.1.4 Эксперимент на циклотроне.....	43
2.1.1.4 Лабораторный эксперимент.....	45
2.1.1.5 Исследование активационной функции и внутреннего шума.....	47
2.1.1.6 Статическая функция компонентов цепи по переднему фронту.....	50
2.1.1.6. Исследование потребляемого аналогового тока.....	53

2.1.2 ТЕСТЫ НА ПУЧКЕ	54
2.1.2.1 EUTELESCOPE.	56
2.1.3.1 Исследование размеров и форм кластеров для частиц с энергией 250 МэВ	59
2.1.3.2 Сравнение размеров кластеров для частиц с различными энергиями.....	60
2.1.3.3 Сравнение размеров кластеров для частиц с различными углами.	63
Заключение	65
Приложение А. Алгоритм обработки данных в EUTElescope	66

ВВЕДЕНИЕ

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) является одним из экспериментов на Большом Андронном Коллайдере (БАК) и разработан специально для изучения физики сильных взаимодействий, в частности, для характеристики кварк – глюонной плазмы (КГП). Во время периода второй длительной остановки (LS2) БАК, ALICE подготавливает крупное обновление аппаратного оснащения, направленное как на улучшение точности измерений, так и для улучшения скорости считывания данных. Ключевым элементом данного обновления является новая ультра легкая и высокоточная Внутренняя Трекингвая Система (ITS), оснащенная монолитными кремниевыми пиксельными детекторами (ALPIDE).

В данный момент прогресс разработки и исследования пиксельного детектора ALPIDE находится в финальной стадии. В декабре 2016 года был представлен финальный образец данного детектора, но перед запуском в массовое производство необходимо произвести полноценные исследования финальной версии детектора и уточнить некоторые эффекты в прошлой версии (pALPIDE v3).

Цель работы — Комплексное исследование кремниевых пиксельных детекторов для модернизации Внутренней Трековой Системы эксперимента ALICE

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Анализ данных детекторов во время тестов на наклонном пучке в ускорительном комплексе протонного синхротрона (PS) CERN
2. Изучение характеристик облученного чипа ALPIDE.
3. Разработка программного обеспечения для установки по проведению эксперимента по облучению на циклотроне U-120M

1. Теоретическая часть.

1.1. Кварк – глюонная плазма

Квантовая Хромодинамика является частью Стандартной Модели ядерной физики частиц и описывает сильные взаимодействия, фундаментальные взаимодействия между кварками и глюонами. Она объясняет зависимость между интенсивностью взаимодействий, иными словами константу сильного взаимодействия a_s , и величиной переданного импульса Q .

При малой величине переданного импульса Q , константа сильного взаимодействия велика ($a_s > 1$) и кварки связаны в виде мезонов или барионов. Свойство того, что не было зафиксировано свободных кварков имеет название конфайнмент. При большом переданном моменте Q^2 , a_s уменьшается до тех пор, пока кварки становятся квазисвободными частицами, это условие так же известно как асимптотическая свобода.

Кроме того, в квантовой хромодинамике предполагается, что когда адроны с конечным размером начинают перекрывать друг друга при очень высоких температурах или плотностях, то кварки и глюоны формируют деконфайнмент фазу материи, которая так же известна как КГП. Предполагается, что эта фаза существовала в период “ранней вселенной”, во времена порядком 10 пс после Большого Взрыва, длящегося примерно 10 мкс. При низком барио-химическом потенциале μ_B^2 критическая температура T_C , необходимая для перехода из конфайнмент состояния адронов в состояние КГП, достигается энергиями порядком от 100 МэВ до 200 МэВ. В лабораторных условиях КГП создается при ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов.

ЛНС позволяет ускорять и сталкивать протоны и ядра Pb до беспрецедентных энергий на центр масс, вплоть до $s^{0.5} = 14$ ТэВ для протонов и

до $s_{NN}^{0.5}=2.76$ ТэВ на ядерную пару для *Pb*. В сравнении с предыдущими экспериментами над тяжелыми ионами в CERN (SPS или BNL RHIC) данный эксперимент предоставляет сильное увеличение энергии пучка, приходящаяся на большее сечение рассеяния для *hard probes*, более высокую плотность и создает более горячую, большую и долгоживущую КГП.

1.1.2 Характеристика КГП

Для описания КГП используются различные методы измерения для ультрарелятивистских А-А столкновения на беспрецедентных энергиях. Для предоставления относительных данных, кроме А-А столкновений ALICE так же производит точные измерения, используя протон-протон (p-p) и протон-нуклид (p-A) столкновения.

При определении свойств КГП существует сложность, связанная с коротким временем жизни и фактом, что КГП наблюдаема только косвенно после ее превращения в адронную материю.

В основе характеристики КГП лежит анализ *heavy flavor* – частиц, образующихся после стадии КГП. Из-за отсутствия достаточно эффективных критериев отбора искомым частиц, то метод данного анализа очень выигрывает от увеличения объема статистических данных. Критерии отбора часто основаны на составе участвующих кинематических переменных и идентификации распадающихся частиц, а так же последующему поиску вторичного или даже третичного вертекса, совместимого с топологией распада оговоренных частиц

1.2 Детектор ALICE

Направленность ALICE на столкновения тяжелых ионов приводит к требованиям, отличным от остальных ЛНС экспериментов. Высокие плотности частиц в центральном *Pb-Pb* столкновении требуют создания детектора с высокой зернистостью. Для измерения общего выхода частиц (т.е.

интегрированного по p_T) требуется нахождение треков частиц и вершин столкновения вплоть до очень низкого поперечного импульса, которому соответствует часть большая часть производимых частиц. Идентификация частиц (PID) имеет большое значение для изучения различных параметров, в том числе композиции произведенных частиц. В дополнении, пробы с высоким p_T требуют хорошего разрешения трека из-за своего высокого импульса.

Размеры экспериментальной установки ALICE равняются 26 м в длину и 16 м в высоту. Установка может быть разделена на центральную часть детектора, так же называемой “центральной бочкой”, и на мюонный спектрометр, вместе с меньшим детектором, служащим для **trigger and event characterization**. Оба этих элемента состоят из нескольких субдетекторов, каждый из которых служит собственной цели.

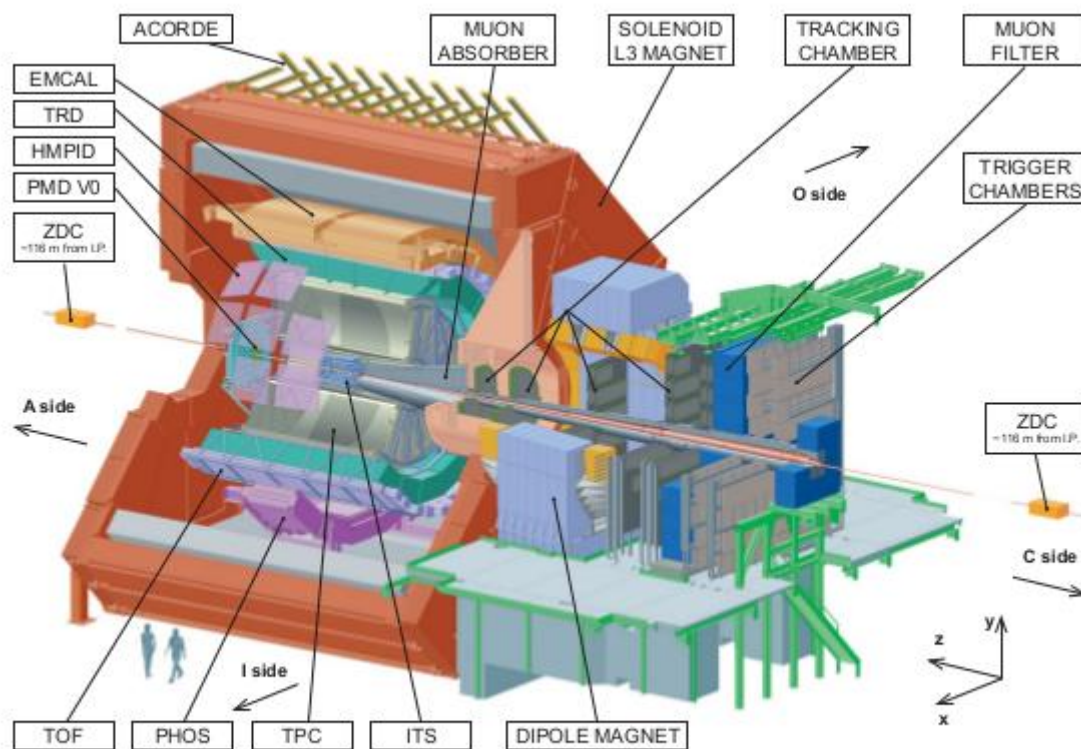


Figure 1.2.: Current layout of the ALICE experiment with its main subdetectors [1].

Рисунок 1 – схема установки ALICE

Центральная бочка расположена внутри L3 (?) магнита с соленоидальным полем с силой в 0,5 Т. Детекторы в центральной бочке в

основном предназначены для восстановления вершины столкновения, а так же детекции частиц. В порядке увеличения радиуса от пучка основные компоненты аппарата следующие:

1) **Внутренняя трекинг-система (ITS).** В настоящее время ITS ALICE состоит из шести цилиндрических слоев чувствительных к позиции кремниевых детекторов, покрывающих радиальное расстояние между 39 – 436 мм. Она была построена с использованием трех различных технологий: гибридный Кремниевый Пиксельный Детектор (SPD) для двух ближних к пучку слоев, Кремниевый Дрифт-детектор (SDD) для двух слоев в середине, а так же Кремниевый Стриповый Детектор (SSD) для двух внешних слоев. Основная цель ITS это точное определение первичной и вторичной вершин столкновения, при высоких показателях зернистости и возможностью построению треков частиц при низких значениях p_T . Аналоговое считывание четырех наиболее внешних слоев в дальнейшем позволит идентификацию частиц посредством спецификации энергетических потерь в нерелятивистской $1/\beta^2$ области.

2) **Камера проекции времени (TPC)** TPC является главным детектором ALICE для трекинга и идентификации частиц посредством измерений специфических потерь энергии. Он представляет собою газовый детектор формы полого цилиндра длиной в 5м в направлении пучка, внутренний радиус приблизительно 57см, внешний 278 см, содержит активный газ объемом в 88 м³.

3) **Детектор времени полета (TOF)** – состоит из multi-gap resistive plate chambers на радиальном расстоянии 370 см от линии пучка. Данный детектор предназначен для идентификации частиц путем измерения времени пролета от точки взаимодействия.

ITS, а в особенности TPC, представляет собою газовый (?) детектор, очень легкий в смысле radiation length. Среди четырех наиболее крупных экспериментов на LHC, ALICE имеет наиболее низкий объем вещества и магнитное поле в центральной области быстроты. Это комбинация позволяет

ALICE производить трекинг вплоть до поперечного момента равного 150 МэВ/с и переводить в высокое разрешение импульса при низком p_T . Применение субдетекторов, отраженных выше, в установке ALICE позволяет достичь прекрасных показателей для детекции частиц от очень низких p_T , до величин порядка 20 ГэВ/с. Эти два свойства имеют большую важность для измерений выходов тяжелых адронов с различными p_T , поскольку они помогают значительно ослабить комбинационный фон частиц (combinatorial background) и сократить число их дочерних частиц, которые находятся при низких p_T .

1.3 Планы по модификации ALICE

После первых лет работы ALICE уже доказала свои высокие качества в работе со столкновениями тяжёлых ионов. Было подтверждена базовая картина КГП, описанная более ранними экспериментами на SPS и RHIC, при превосходстве их точности и величин кинематических энергий по всем значащим пробам. Несмотря на этот успех, существовало несколько ограничений, в том числе высокая точность измерений редкий проб при низком значении поперечном момента, которые были за пределами операционных возможностей нынешней экспериментальной установки.

Во время *ALICE Upgrade Letter of Intent (2008?)* были обсуждены долгосрочные физические цели эксперимента ALICE. Было решено путем модификации ключевых элементов детекторов и увеличении статистики, увеличить возможности исследовательской установки, таким образом, была инициирована разработка крупного обновления аппаратной части ALICE, запланированное для установки во время второй технической остановки (LS2) в 2019/2020.

1.4. Физические Цели обновления ITS ALICE

Измерения взаимодействий heavy flavour в медиуме КГП является важнейшей целью новой ITS со значительно улучшенными свойствами трекинга и считывания. С учетом этого, остается два главных открытых вопроса:

1) Изучение термализации и адронизации тяжелых кварков в медиуме КГП. Это станет возможным при измерении скорости heavy flavour baryon/meson для очарованного (A_c/D) и красивого (A_b/D), а так же азимутальной анизотропии для очарованного и красивого мейсона.

2) Изучение в медиуме энергетических потер тяжелых кварков и их массовую зависимость. Это может быть выполнено при измерении ядерной модификации фактора R_{AA} как функцию от p_T для D и B мейзонов в широком диапазоне импульсов.

В дополнение, новая IT будет предоставлять начальный вклад для детальных измерений электромагнитной радиации от КГП, включая тепловые фотоны, детектируемые как низкокачественные диэлектроны.

1.5. Стратегия обновления ITS ALICE

Стратегия обновления основана на комбинации обновлений детекторов, а так же крупном увеличении светимости для $Pb-Pb$ столкновения, достигающей до $L=6 \cdot 10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ при частоте событий около 50 кГц. В предполагаемом плане, ALICE детектор будет улучшен для возможности считывания всех взаимодействий, поглощая более чем 10nb^{-1} от $Pb-Pb$ столкновения после LS2. Поскольку большинство редких проб при столкновениях $Pb-Pb$ не может быть отобрано с использованием триггеров, из-за высокого комбинационного фона, то необходимо производить сбора данных с минимальным смещением. Для таких измерений обновленная ITS будет предоставлять увеличение статистики в 100 раз относительно прошлой программы. Для измерений, которые в данный момент основаны на редких

триггерах, произойдет увеличение статистики в 10 раз. В дальнейшем, подтвержденные измерения требуют значительного улучшения в поиске вершины столкновения и построения трека частиц при низких p_T . В общем, обновление детектора состоит из:

- 1) Уменьшение радиуса beam pipe от 29,8 до 19,2 мм
- 2) Увеличение разрешения для p_T ,
- 3) Кремниевые детекторы с меньшим объемом материалов
 - ITS – покрытие середины псевдобыстроты ($-1,2 < \eta < 1,2$)
 - Мюонный детектор – покрытие передней части псевдобыстроты ($-3,6 < \eta < 2,45$) для добавления возможностей к определению вершины столкновения для нынешнего детектора

1.6. Концепт обновления ITS ALICE

Основными целями обновления ITS ставится описание столкновений $Pb-Pb$ с частотой до 100к Гц, для столкновений $p-p$ до 400кГц, при улучшении точечного разрешения относительно нынешней ITS в три раза для направления $r-\phi$, и в пять раз для направления z при поперечном моменте равном 500 МэВ/с.

Точечное разрешение σ_p в основном определяется двумя факторами:

1) Ошибкой σ_p^x в геометрической экстраполяции от измеренной точки вдоль направления трека части до точки столкновения (взаимодействия). В основном определяется собственным разрешением $\sigma_{x,i}$ и позицией r_i элемента детектора.

2) Из-за нецентральности σ_p^{ms} , вводимой множественными кулоновскими рассеиваниями, происходящими в beam pipe и в внутренних слоях детектора, в особенности в ближайших к точке столкновения. Распределение углового отклонения с учетом рассеивания может быть грубо описано Гауссианом с дисперсией θ_{RMS}

$$\theta_{RMS} = \frac{13.6 [\text{MeV}]}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)],$$

где p , βc , z – момент, скорость и заряд собственной частицы, x/X_0 – толщина материала в смысле радиационной длины.

Для достижения влияние этих параметров на точечное разрешение трекинговой системы, достаточно использовать простой пример детектора с двумя слоями. Принимая за конфигурацию с внутренним слоем с радиусом r_1 и внешним слоем с r_2 , вводя пространственное разрешение σ_1 и σ_2 относительно σ_p^x получаем:

$$\sigma_p^x = \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_2 - r_1} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{r_1}{r_2 - r_1} \sigma_2\right)^2}.$$

Приведенные выше формулы иллюстрируют, что наилучшее точечное разрешение в основном достигается малым значениям внутреннего радиуса, а так же низким объемом вещества (x/X_0), что особенно характерно для ближайших слоев и для beam pipe.

Для ITS модификации была проведена детальная симуляция для определения оптимальных значений параметров. В итоге, были опеределены следующие конструкторские цели:

- Уменьшить расстояние между первым слоем и точкой взаимодействия от 39 до 22 мм.
- Уменьшить объем вещества для детекторов от 1.14% до 0.3% x/X_0 для самых ближайших слоев и до 1% для внешних слоев.
- Уменьшить размер пикселя от 50×425 мкм до 30×30 мкм.
- Увеличить число слоев от нынешних шести до семи. Это так же улучшит автономную эффективность трекинга и разрешения поперечного импульса на низких p_T .
- Увеличить скорость считывания столкновений $Pb-Pb$ с частотой до 100 кГц, для столкновений $p-p$ до 400 кГц.

- Применение возможности эффективного внимания частей детектора во время годового периода остановки.

1.7. Макет обновления ITS

Для достижения разработанных целей, нынешняя ITS будет полностью заменена новым детектором, состоящим из семи слоев, оснащенных монолитным кремниевым пиксельным детектором. Слои группируются на две отдельные бочки. *Внутренняя бочка* состоит из трех ближайших к пучку слоев, в то время как дальняя бочка содержит два средних и два дальних слоя.

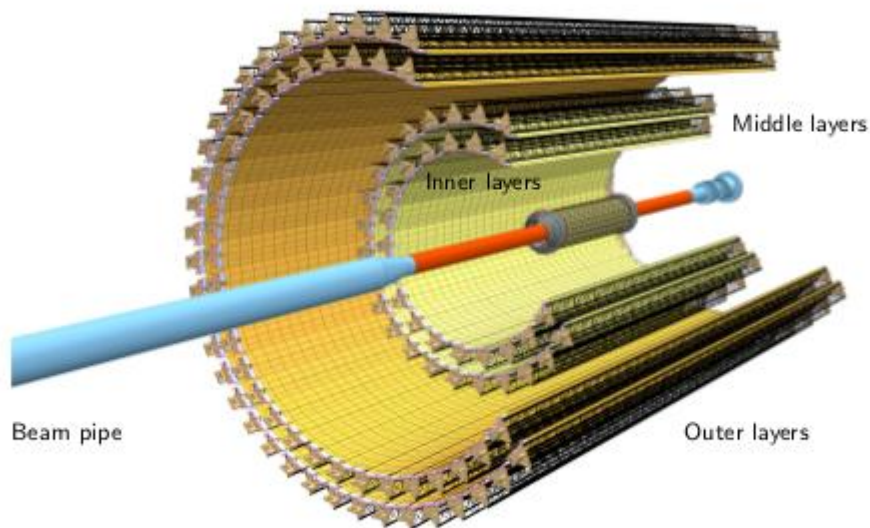


Figure 2.2.: Layout of the new ITS [16].

Рисунок 2 – схема модифицированной ITS ALICE

Радиальное расположение слоев было исправлено для достижения комбинированного качества в смысле точечного разрешения, разрешения p_T и эффективности трекинга при максимальной плотности столкновений порядка $19 \text{ ударов/см}^2/\text{события}$ для минимально смещенных событий в ближних слоях детектора. Продольное расширение слоев было выбрано для обеспечения охвата псевдобыстроты $|p| < 1.22$ для эффективности детектирования, большей,

чем 90%, для пучков с наибольшей святимостью. Детальные параметры макета обновления представлены в Таблице (??).

Таблица 1 - Параметры новой ITS ALICE

Table 2.1.: Layout parameters of the new ITS [16].

	Inner Barrel			Outer Barrel			
	Inner Layers			Middle Layers		Outer Layers	
	Layer 0	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6
Length [mm]		271		843		1475	
Radial position [mm]	22.4	30.1	37.8	194.4	243.9	342.3	391.8
Nr. pixel chips	108	144	180	2688	3360	8232	9408
Nr. modules	12	16	20	384	480	1176	1344
Nr. staves	12	16	20	24	30	42	48
Chip size [mm ²]				15 × 30			

В общем, новая ITS будет покрывать поверхность 10 м^2 , с общим числом пикселей около 12.5×10^9 с цифровым выходом. Размер одного пикселя составляет 15×30 мкм, для уменьшения объема используемого вещества, его толщина была сокращена до 50 мкм. Ожидаемый радиационный уровень представлен в таблице (вставить из презентации)

Таблица 2 - Параметры радиационного облучения для ITS ALICE

	Внутренний слой	Средний и внешний слой
TID радиация за 4 года	2700 кРад	100 кРад
NIEL радиация за 4 года	$1.7 \times 10^{13} \text{ 1MeV n eq/cm}^2$	$1 \times 10^{12} \text{ 1MeV n eq/cm}^2$

1.8.1 Пиксельный чип MAPS

В ходе анализов требований, предъявляемых к новой ITS, на (название конференции!) было решено выбрать в качестве технологии детектора для всех

уровней новой ITS CMOS Монолитный Активный Пиксельный Сенсор (Monolithic Active Pixel Sensors MAPS).

MAPS показал значительное развитие в недавние годы. Его первое широкое применение было произведено в детекторе STAR PXL на RHIC, который был укомплектован чипами типа ULIMATE. Эти чипы, произведённые, по AMS 0.45 мкм технологии, не удовлетворяют требованиям обновления ITS ALICE по причине низкой скорости считывания, высоких величин поглощения энергии, а так же низкой устойчивости к радиации.

Для преодоления этих ограничений был выбран чип с меньшим размером и дополнительной опцией – 180 nm CMOS TowerJazz технологией.

Таблица 3 - Параметры MAPS

Parameter	Inner Barrel	Outer Barrel
Chip dimension	15 × 30 mm ² (<i>rφ × z</i>)	
Max. silicon thickness	50 μm	
Max. power density	300 mW/cm ²	100 mW/cm ²
TID radiation hardness ^a	2.7 Mrad	10 krad
NIEL radiation hardness ^a	1.7 × 10 ¹³ 1 MeV n _{eq} /cm ²	3 × 10 ¹⁰ 1 MeV n _{eq} /cm ²
Operation temperature	20 °C to 30 °C	
Max. integration time	30 μs	
Max. relative dead time	10 % at 50 kHz Pb-Pb	
Min. detection efficiency	99 %	
Max. fake hit rate	10 ⁻⁵ /event/pixel	
Spatial resolution	5 μm	30 μm

^aThis includes a safety factor of ten and has been updated with respect to the reference.

В настоящее время в экспериментальной физике высоких энергии гибридные кремниевые чипы применяются для нахождения вершин столкновения и трекинга частиц в ближайших к пучку областях детектора. Термин “гибридный” означает физическое разделение чувствительных слоев от электронной схемы, т.е. сенсор состоит из основанных CMOS считывающих устройств, которые присоединяются друг к другу посредством pitch bump-bonding.

Преимущество данной технологии в том, что чувствительный слой и чип, содержащий цепь по *переднему фронту*, а так же средства для считывания

может быть оптимизированы отдельно. Возможно использование и других материалов, кроме кремния, такие как *Ga*, *As* или алмазы. Кроме того, к чувствительному слою могут быть приложено большее напряжения смещения, приводя к его полному обеднению большими электрическими полями, что ведет к более эффективному и быстрому собиранию зарядов и высокой терпимости к радиации.

Однако, гибридные сенсоры так же имеют свои минусы, так как они более сложны и затратны в изготовлении из-за bump-bonding способа изготовления. В дальнейшем их использование приводит к относительно большому объему используемого вещества.

Монолитные кремниевые пиксельные сенсоры применимы для очень тонких детекторов, поскольку сенсор и считывающая электроника интегрированы внутри одной кремниевой матрицы, полностью избегая bump-bonding.

CMOS MAPS, схематический поперечный разрез которого показан на рисунке, является частной разработкой в области монолитных пиксельных кремниевых детекторов.

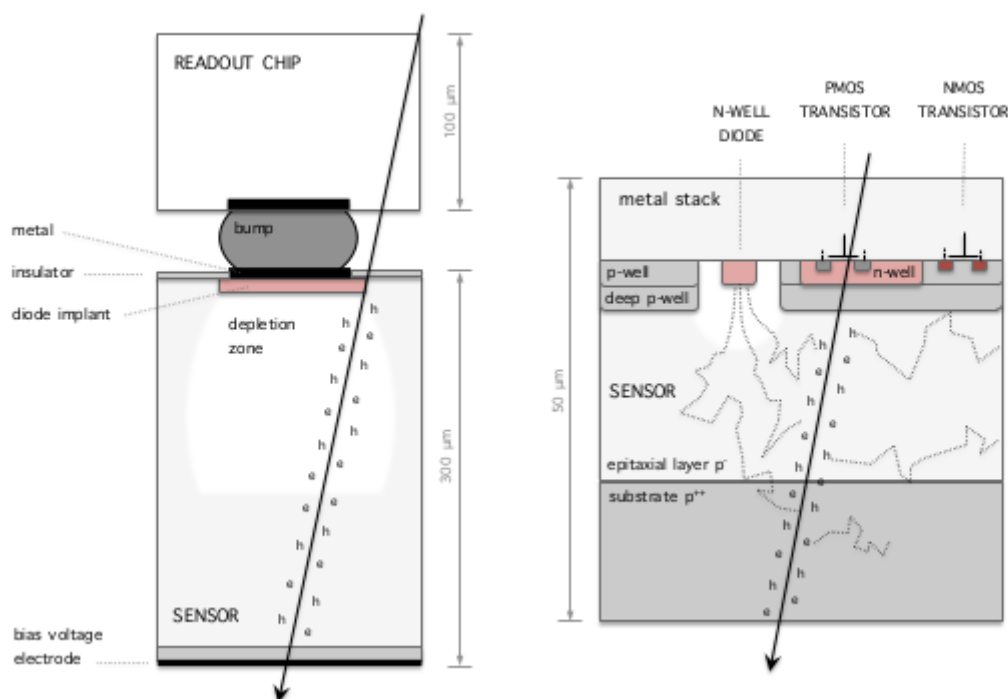


Рисунок 3 – схема MAPS

Основные компоненты MAPS показаны на рисунке. Основной слой, т.е. подложка, является высоколегированной высоко проводящей (10 Ом/см) кремниевой пластиной p-типа.

Вверху расположено низкопроводящий (1 кОм/см до 10 кОм/см) эпатаксиальный слой p-типа с толщиной в 20 мкм, который образован методом химического осаждения. Эпатаксиальный слой, в основном лишь частично обеднённый, выступает в качестве чувствительного слоя пиксельного чипа. Здесь сгенерированные заряды ограничиваются потенциальными барьерами на границах до тех пор, пока они не достигают собирающих диодов, которые сформированы между n-well и эпатаксиальным слоем p-типа.

Кроме того n-well и p-well добавления на поверхность эпатаксиального уровня служат как масса, объем для PMOS и NMOS транзисторов для CMOS цепи. Сток и исток транзисторов сформированы путем диффузии материалов с большим содержанием проводящих элементов. Металлические линии, изолированные слоем оксида кремния, соединяют различные кремниевые структуры между цепью по переднему фронту и элементами считывания.

В общем, 180нм CMOS технология, разработанная компанией TowerJazz, предлагает следующие преимущества, которые нашли применение для модификации ITS:

- **Deep p-well** в стандартных процессах, протекающих в CMOS структуре, n-wells является инжектирующим материалом для PMOS транзисторов. Однако в области пикселя, происходит конфликт между ним и n-wells, предназначенным для сбора заряда. Как показано на рисунке, глубокие p-well позволяют разрешить эту проблему путем создания отдельной области для n-wells, свойственных для PMOS транзистора. Применимость глубокого p-well является ключевой особенностью процесса, позволяя полное применение CMOS логики для пиксельной матрицы.
- **Свойственный размер** – размер транзистора в 180 нм и толщина оксидного слоя в 3 нм делает данный чувствительный элемент

значительно более сопротивляемым к эффектам общей ионизационной дозы (TID)

- **Вплоть до шести металлических слоев** – процесс позволяет использование до шести металлических слоев, что в добавление к малому размеру позволяет применение низковольтных высокоплотных электрических цепей в объеме пиксельной матрицы. В дальнейшем это позволит уменьшить интенсивную площадь цифровой электрической цепи, расположенную на периферии чипа.

1.8.2 Собирающий диод

Как и во всех кремниевых детекторах основная часть пикселя ALPIDE представляют собою диод в обратном смещении, иными словами **p-n** соединение, в котором сформирован обеденный слой. В данном слое возникает большое электрическое поле, что позволяет сбор сигнального заряда. В случае ALPIDE, собирающий диод реализован как соединение между эпитаксиальным слоем p-типа (p^- , $N_A \sim 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) а так же n-well (n^+ , $N_D \sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) на его вершине (см. Рисунок 3.3.)

В общем случае, поведение p-n соединения при термальном равновесии определяется так называемым **built-in** напряжением V_{bi} которое равняется:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

Где N_D N_A - эффективные концентрации доноров и акцепторов соответственно, n_i - концентрация базы, k_B постоянная Больцмагна, q - заряд, T - температура. Ширина d обеденной зоны оперделяется концентрациями носителей по обои стороны, и может быть увеличена приложением внешнего **reverse bias** напряжение V_{RB} .

$$d \propto \sqrt{\rho (V_{bi} - V_{RB})}$$

Согласно рисунку 3.3., в случае для ALPIDE и прототипов общее reverse bias напряжение V_{RB} на собирающем диоде складывается из напряжения сброса диода V_{RST} , а так же напряжения обратного смещения V_{BB} :

$$V_{RB} \sim V_{RST} + V_{BB}$$

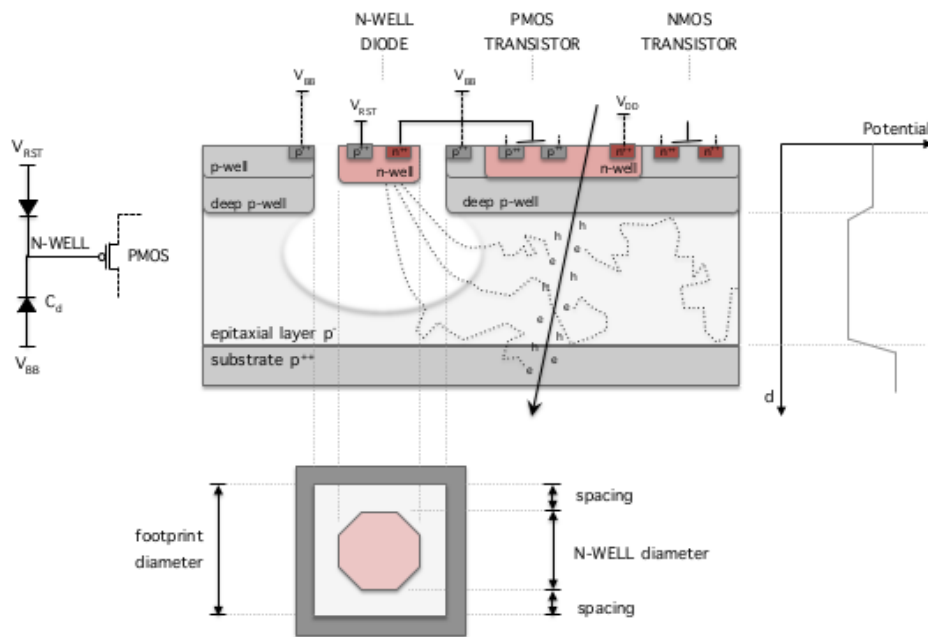


Figure 3.3.: Center top: Schematic cross section of a pixel in the ALPIDE design. Left: equivalent circuit of the input net with a resetting diode, including the charge collection diode and the input transistor. Right: Schematic representation of the potential barriers seen by electrons at the borders of the epitaxial layers formed by three differently p-doped layers p^{++} substrate — p^- epitaxial layer — p^+ p-well. Center bottom: definition of n-well and footprint diameter and spacing to the surrounding p-well.

Рисунок 4 – схема собирающего диода MAPS

1.8.3. Генерация и сбор заряда в MAPS

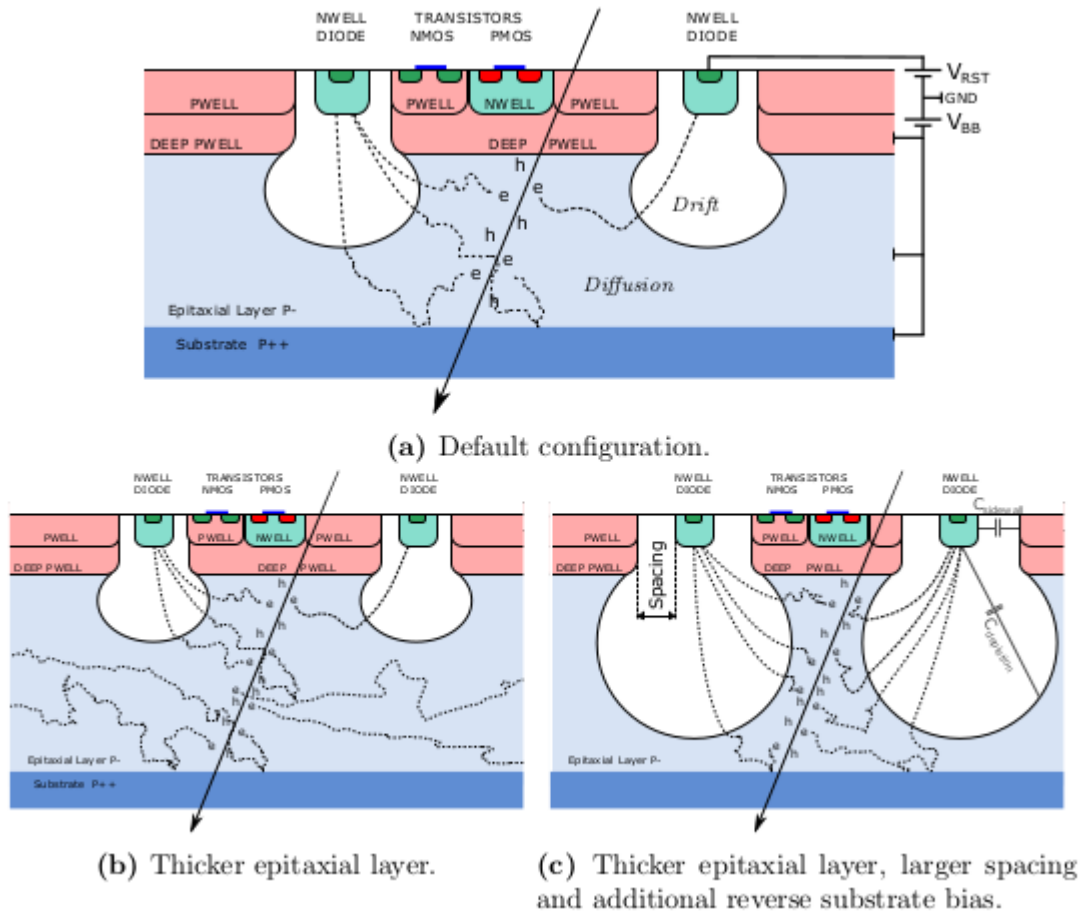


Рисунок 5 – схема сбора заряда в MAPS

Среднее значение энергии, выделяемой частицами при движении в веществе, описывается формулой Bethe-Bloch. Энергетические потери зависят от длины пути частицы в веществе и минимальны для частиц с $\beta\gamma \sim 3-4$, так называемыми МІР – минимально ионизирующими частицами. Формула Bethe-Bloch только описывает среднее значение потерь энергии, а не их флуктуацию. Для поглотителя, состоящего из 300мкм слоя кремния, флуктуации могут быть хорошо описаны распределением Ландау. Эти флуктуации увеличиваются для более тонких слоев поглотителей и для слоя поглотителя величиной от 20 до 30 мкм потери энергии более точно описываются моделью Vichsel. Часть энергии, осаждаемой в кремнии, используется для генерации свободных пар электро-

дыра. Остальная энергия идет на высвобождения фотонов, которых затем рассеиваются.

В противоположность гибридного пиксельному сенсору, для которого характерен активный слой толщиной от 200 до 300 мкм, эпитаксиальный слой, который используется в MAPS имеет толщину в 18-30 мкм. Это приводит к сравнительно малому среднему заряду, генерируемому при передаче эпитаксиальному слою MIP в $1000e^-$. Из-за флуктуаций одиночная частица может выделять меньшую энергию. Меньшей собранный заряд Q приводит к уменьшению напряжения сигнала $\Delta V_{IN} = Q/C$ для заданного пикселя емкостью C . Для получения более высокого напряжения сигнала сумма зарядов собранных центральным пикселем в кластере, называемым как seed, а так же емкость пикселя C должны быть оптимизированы для увеличения соотношения Q/C . Высокое значение Q/C приводит к улучшенной характеристики сигнал/шум, а так же уменьшает энергоемкость электрической цепи.

Сигнал, индуцированный электродом, может быть описан с использованием теоремы Ramo-Shockley. Малый диаметр собирающего электрода от 2 до 3 мкм в сравнении с толщиной эпитаксиального слоя приводит к тому, что weighting field будет незначительным только в непосредственной близости к собирающему диоду. Следовательно, сигнал будет индуцирован, только для заряда, проходящего близко к собирающему диоду. После того, как заряд поступил на электрод, сумма индуцированных сигналов будет соответствовать собранному заряду. Время сбора заряда составляет менее 100 нс, что меньше в сравнении со временем формирования O (1 мкс), и в первом приближении можно рассматривать только полный собранный пикселем заряд.

Малый размер собирающего n-well (2 на 3 мкм) в сравнении с пиксельным шагом в 30 мкм приводит к малой емкости электрода до нескольких fF, что в сравнении с обычным решением, к примеру HV-MAPS² с входной емкостью порядка 100 fF

Как показано на рисунке 5.3а в MAPS возможно два механизма сбора заряда. В корестности собирающего n-well заряд собирается путем дрейфа в электрическом поле обеденной зоны pn-соединения, сформированного собирающим n-well и эпитаксиальным слоем. В необеденной зоне эпитаксиального слоя заряд собирается путем диффузии. В прототипах MAPS для обновления ITS полное обеднение эпитаксиального слоя не достигнуто. Потенциальные барьеры на границах между глубоким p-well ($N_A \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и эпитаксиальным слоем ($N_A \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), ровно как и для границы между подложкой ($N_A \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) и эпитаксиальным слоем сдерживают заряд в объеме эпитаксиального слоя. Потенциал на границах V_{bi} может быть вычислен как:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_{A,p^+}}{N_{A,p^-}} \right)$$

Где N_{A,p^+} N_{A,p^-} эффективные концентрации доноров и акцепторов соответственно, n_i – концентрация базы, k_B постоянная Больцмана, q – заряд, T – температура. Параметр $k_B T / q$ представляет собою температурный потенциал величиной в 25мВ при 300К. Результирующий потенциальный барьер на границах подложки и p-wells выше температурного в 7 и 12 раз соответственно. Эффективность сбора зарядов зависит от времени жизни носителя заряда, а так же от продолжительности сбора заряда. Время жизни носителя заряда в основном определяется примесями, формирующими энергетический уровни в ширине запрещенной зоны. Кроме того, заряд так же возникает и в подложке, но он зависим от времени жизни и длины пути в подложке и в основном оказывается не собранным (?!).

Возможность увеличения числа собранных зарядов, увеличивая толщину эпитаксиального слоя, приводит к более ранней генерации зарядов (5.3.б). Для более тонкого эпитаксиального слоя и постоянной обеденной области это приводит к увеличению объема диффузии. Увеличенная диффузия приводит к тому, что больше число пикселей “делятся” сгенерированным зарядом, следовательно, возникает меньший относительный сигнал в seed. Так

преимущества более тонкого эпитаксиального слоя зависят на абсолютной величине собранного заряда в seed пикселя, который в свою очередь зависит от формы и размера обеденной области. Для конфигураций, в которой обеденная зона достигает границы эпитаксиального слоя и подложки, увеличение тонкости эпитаксиального слоя может приводит к увеличению обеденной зоны.

В качестве подхода для увеличения напряжение сигнала на seed пикселя предлагается уменьшение заряда, распределяющегося и концентрирующегося между несколькими пикселями. Это может быть достигнуто расширением области обеднения. Как отмечено выше, область обеднения может быть увеличена путем увеличения V_{RB} между собирающим диодом и подложкой, поскольку область обеднения монотонно увеличивается как функция от V_{RB} . Как отмечено на рисунке (5.3.a) $V_{RB} \approx V_{RST} - V_{BB}$ при измерении обоих тогатов относительно земли. В MAPS напряжение сброса V_{RST} не может превосходить питающего напряжения в 1.8 В. Напряжение обратного смещения V_{BB} прикладывается через p-guard коннектор, окружающий пиксельную матрицу, к эпитаксиальному слою и подложке. Без присутствия обеденной зоны, изолирующей (глубокие) p-wells и матрицу от эпитаксиального слоя, p-wells не могут быть установлены на потенциал, отличный от потенциала подложки. Максимальное напряжение в данном случае определяется точкой (breakdown) соединения NMOS транзисторов, которые расположены в p-well.

Входная емкость C является суммой емкости цепи и емкости соединения. Емкость цепи состоит из повторяющейся (routing) линейной емкости соединений от электрода до входного транзистора, из входной емкости входного транзистора и механизма сброса. Емкость соединения возникает между n-well и необедненным эпитаксиальным слоем ($C_{depletion}$) ровно как и для окружающих p-well ($C_{sidewall}$) (рисунок 5.3.c). Поскольку ёмкость обратно пропорциональна расстоянию между ими, то емкость соединения может быть уменьшена увеличением обеденной области и увеличением пространством между n-well диодом и окружающим p-well, как показано на рисунке 5.3.c.

Максимум интервал ограничен в основном поверхностью, необходимой для электрической цепи внутри самого пикселя и схемы считывания.

Комбинированное решение по оптимизации показано на рисунке 5.3.с, на котором увеличена толщина эпитаксиального слоя, интервалов и напряжения смещения относительно подложки.

1.9 Архитектура Чипа

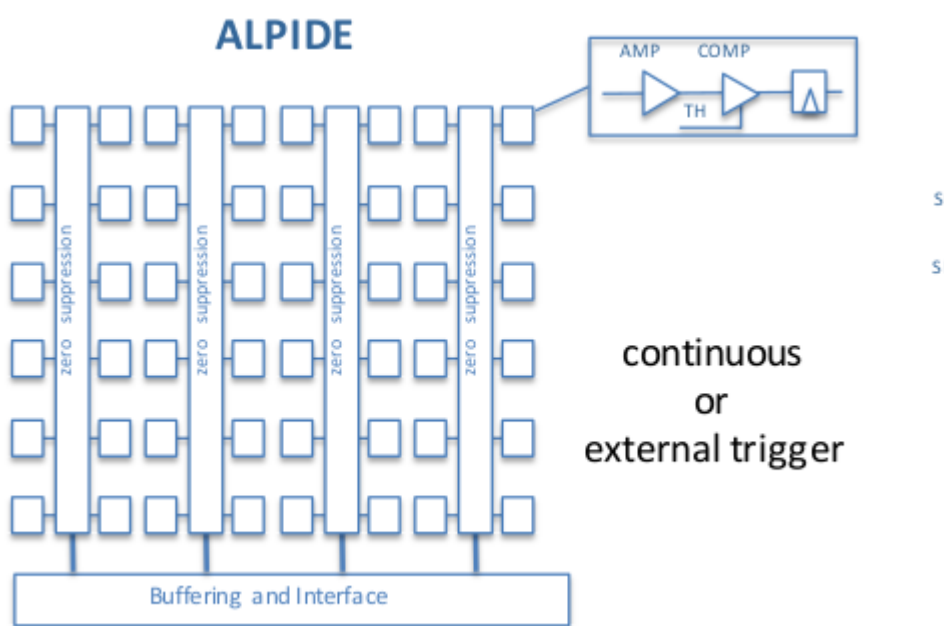


Рисунок 6 – Архитектура R&D ALPDIE

Архитектура R&D ALPDIE описана на рисунке 6. Она основана на подходе к столь удобному усложнению внутри пикселя или матрицы по необходимости. Так в каждый ALPDIE пиксель содержит собственный усилитель и формирователь, последующий компаратор и буфер множественных столкновений. The zero-suppression is performed within the matrix. Поэтому адрес-ресет энкодер так же включен в состав схемы. Данная схема учитывает распределение адресов активных пикселей вплоть до конца колонки и сбрасывает соответствующие активные буфера внутри пикселей. Как следствие такого подхода логика “конца колонки” уменьшает необходимое

взаимодействие и буферизацию. Данная архитектура позволяет считывать все пиксели в режиме ГЛОБАЛЬНОГО ЗАТВОРА (global-shutter). Данный затвор может быть управляться посредством внешнего сигнального триггера в сочетании с коротким затворным окном, или же работать в режиме непрерывного получения информации, будучи закрытым в промежутки между кадрами для того чтобы передвинуться к следующему буферу.

Таким образом можно сказать, что дизайн ALPIDE, ориентированный на активные пиксели, делает данный чип менее энергетически затратным, поскольку происходит передача только цифровых сигналов внутри самой платы, кроме того в схему “конец-колонки” поступают только значения адресов активных пикселей. В итоге данный тип архитектуры предоставляет для более меньших pixel pitches, меньшую энергоёмкость, меньшее время интеграции в сравнении с другими архитектурами (MISTRAL). По указанным выше причинам в качестве архитектуры чипа для модификации ITS был выбран именно ALPIDE.

1.10 Цепь по переднему фронту

1.10.1.1 Сброс при помощи диода

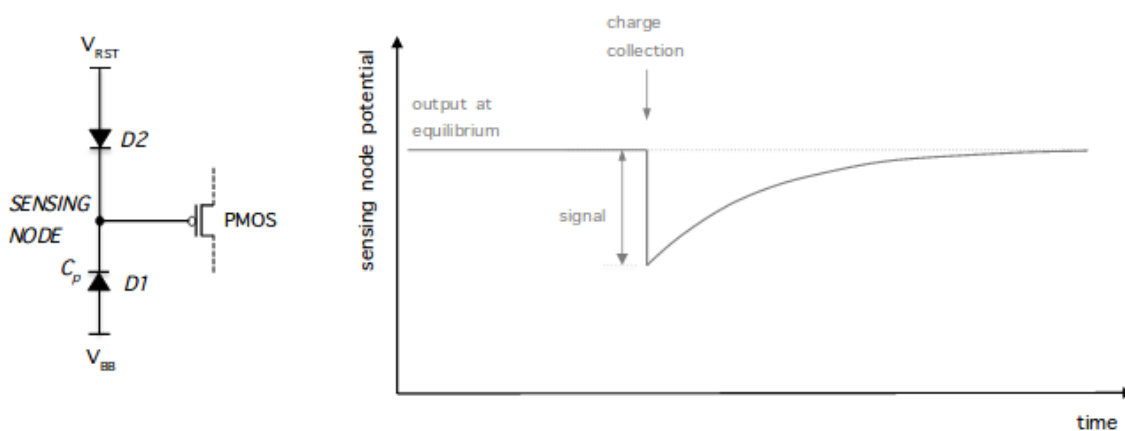


Рисунок 6 – Сброс при помощи диода

В случае отсутствия проходящих частиц, малый прямой ток, протекающий через диод, компенсирует утечки тока, непрерывно перезаряжая входную емкость C_p пикселя. Когда чувствительный диод собирает заряд, осажденный падающей частицей, потенциал на чувствительном элементе падает. Это становится причиной возрастания прямого тока, что приводит к восстановлению потенциала чувствительного элемента.

Согласно формуле. 5.1, проводимость диода может быть выражена как

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right),$$

Таким образом, проводимость диода экспоненциально возрастает с увеличением напряжения на диоде V_D и увеличении I_s , к примеру, в результате облучения. Во входной сети по переднему фронту увеличение V_D может возникнуть из-за утечки тока или же при сборе сигнального заряда

Действительно, увеличение проводимости связано с более быстрой перезарядкой чувствительного элемента. Таким образом, при использовании диода сброса, должны быть приняты во внимание следующие соображения:

- В то время как ток перезарядки позволяет привести пиксель обратно в состояние равновесия, это также компенсирует сигнальный заряд. Обнаружение столкновения таким образом, возможно, только если процесс перезарядки достаточно медленный, то есть быть гораздо медленнее, чем время отклика цепи по переднему фронту.
- Схема реагирует на большее напряжение V_D , падающее на чувствительном элементе, с экспоненциальным увеличением мгновенного тока перезарядки. Большее падение напряжения может быть вызвано, с одной стороны, одиночным столкновением с большим зарядом, осаждающимся на чувствительном слое, к примеру, дельта-луч, или серия ударов с периодом, меньшим, чем

цифровой части, состоящей из регистра столкновений и дополнительной логики для тестирования и отключение пикселей. Детали представлены в следующем:

Упрощенная схематехника аналоговой части пАЛПАЙД-1 по переднему фронту приставлена на рисунке. Можно увидеть, что входная цепь состоит из похожих компонентов и малой дополнительной емкостью C_{inj} (160 аФ). Это позволяет тестировать ответ цепи по переднему фронту, прикладывая отрицательный потенциал к узлу V_{pulse} , который может быть проведен (?) от цифровой части цепи по переднему фронту.

Последующие части аналоговой цепи по переднему фронту могут быть грубо разделены на две стадии (?): первая стадия, так же упоминаемая, как *этап усиления (получения?)*, относится к двум ветвям, содержащих источники тока I_{BIAS} и I_{THR} . Вторая стадия, так же упоминаемая как *стадия обрезания (дискриминации)*, относится к источнику тока I_{DB} . В частности, принцип работы аналоговой части цепи по переднему фронту следующий:

- *Статическое поведение (?)* — в случае отсутствия возмущений, потенциал на узле SOURCE и так же вследствие этого заряд на C_s определяется равенством потенциала на чувствительном узле и тока I_{BIAS} . Ток I_{BIAS} , протекающий через транзисторы M2, M3 и далее через M4, определяет напряжение на истоке транзистора M3 (вместе с V_{CASP}) и на затворе транзистора M4. Вместе с входным транзистором M2, транзистор M3 формирует ПМОС каскад, обеспечивая (?) емкостную развязку узлов IN и OUT. Потенциал на узле OUT определяется током I_{THR} и напряжением V_{CASN} , прикладываемым к затвору НМОС каскада транзистора M7. Ток I_{THR} протекает через транзисторы M7 и M4.

- *Динамическое поведение* — когда потенциал на чувствительном узле падает в течение промежутка времени, меньшем, чем постоянная времени узла SOURCE, к примеру, из-за собора заряда, генерируемого в сенсоре проходящей частицей, то V_{sg} входного PMOS транзистора увеличится. Это приведет к дополнительному току I_s через M2 и затем M3. Для этого дополнительного тока должно быть разрешено проходить через M4,

напряжение на его затворе которое равняется узлу CURFEED, должно быть настроено. (?) Однако, поскольку это происходит только для малой степени и для определенной задержки (из-за точности определения C_s), то ток I_s будет заряжать узел OUT, создавая положительный импульс напряжения.

После возникновения импульса, напряжение на узле OUT возвращается к стабильному значению по следующему механизму: как только узел OUT заряжается до значительно крупного потенциала $V_{gs}=V_{CASN} - V_{out}$ для транзистора M7 достигает нуля, значительно уменьшая проводимость. Ток I_{THR} в дальнейшем будет переправлен и начнет заряжать узел CURFEED, приводя к увеличению потенциала на затворе M4. Это позволяет току через M4 быть усиленным, а узлу OUT разрядиться, так что M7 становится снова проводимым, а узлы OUT и в дальнейшем CURFEED восстанавливают потенциал к стабильному значению. Таким образом, стабильный потенциал на узле OUT может быть регулирован варьированием V_{CASN} , длительность процесса восстановления и (относительная) высота импульса и его широта для представленной цепи гораздо больше для больших (?) объемов собранного (?) заряда. Одного для обеспечения ограничения на длительность импульса в случае очень больших собранных зарядов введен клиппирующий транзистор M5, that in DC operation functions as a reversely biased diode. Как только напряжение на узле OUT превосходит один из узлов CURFEED на величину порогового напряжения M5, однако M5 (forced into conduction) вовлечен в проводимость, что приводит к протеканию тока от OUT к CURFEED, и последующему быстрому восстановлению стабильного значения.

Симулированный отзыв аналоговой цепи по переднему фронту представлен на рисунке 5.4. Где напряжение на узле OUT показано как функция от времени после инъекции заряда на чувствительный узел. Просимулированное время восстановления для низких инжесктивированных зарядов около 1мкс, в то время как это значительно уменьшается для $Q_{inj} \leq 300e^-$. Влияние клиппирующего транзистора M5 можно явно наблюдать

для больших инжектированных зарядов, когда длительность импульса меньше для более высоких амплитуд импульсов.

- *Обрезание амплитуды импульса* — как можно увидеть на рисунке 5.4 узел OUT далее соединен с затвором транзистора M9. Когда амплитуда импульса на узле OUT превосходит определенное критическое напряжение V_c , то M9, который является NMOS транзистором, оказывается вовлечен в проводимость. Далее, если ток через M9 превосходит I_{DB} , то узел PIX_OUT_V будет установлен на низкий уровень. Когда пультс на узле OUT возвращается на стабильный уровень и опускается ниже V_c , то транзистор M9 перестает проводить и узел PIX_OUT_V опять устанавливается в высокий уровень.

1.10.3 Порог заряда

В заключение, аналоговая часть цепи по переднему фронту -АС (???) чувствительна к напряжению, падающему на чувствительном узле, поскольку которой импульс формируется, что относится к стадии обрезания. Меньшая входная емкость увеличивает протекание напряжения (???) в чувствительном узле на данную величину собранного заряда, то есть прирост преобразования заряд-напряжение в цепи, и последующему увеличению высоты импульса в масштабах переднего-фронта. Поскольку стадия обрезания основано на сравнении напряжений, меньшая входная емкость пикселя уменьшает порог для заряда. В дальнейшем порогов значение определяется комбинацией I_{THR} и V_{CASN} , где в первом приближении I_{THR} контролирует форму импульса (т. е. Относительной высотой и шириной), а V_{CASN} определяет стабильное положение импульса. Увеличение I_{THR} приводит к уменьшению высоты и ширины импульса, в то время как увеличение V_{CASN} приводит к увеличению напряжения стабильного положения импульса, приближая его к критическому напряжению V_c . Вследствие этого пороговое значение для заряда увеличивается при повышении I_{THR} и уменьшении V_{CASN} . Для больших

амплитуд импульса, длительность ограничена механизмом клиппирования, где эффект клиппирования тем выше, чем больше высота импульса. Ременное разрешение в цепи определяется временем возрастания, которой меньше 1мкс согласно данным симуляции. Время формирования относительно велико и следовательно цепь по переднему фронту может быть использована в аналоговой памяти.

1.10.3 Напряжения и токи смещение цепи по переднему фронту

Смещение для пикселей осуществляется одиннадцатью 8-бит ЦАП, размещённых на периферии чипа (Шесть напряжение смещения и пять токов смещения). Их опорное напряжение питается извне с помощью удаленного разъема 1,8 В, размещенного на краю сенсора. Номинальные настройки ЦАП указаны в таблице. Значения получены во время симуляции и представляют собою первую рабочую точку для данной цепи, одного они не является оптимальными. Они могут отличаться между прототипами и финальной версией схемы.

DAC	nominal setting	nominal value
I_{BIAS}	64	20 nA
I_{THR}	51	0.5 nA
I_{DB}	64	10 nA
I_{RESET}	50	5 pA
V_{CASN}	57	400 mV
V_{CASP}	86	600 mV
V_{RESET}	117	1.2 V
V_{AUX}	117	1.2 V

Для работы данных ЦАП необходимо наличие внешнего опорного напряжения с низким уровнем шума V_{REF} , наиболее часто равному потенциалу аналогового питания. Входа ($DACMONV$, $DACMONI$), ответственно за

мониторинг внутренних ЦАП. Кроме того они могут использоваться для переопределения напряжения или тока соответствующего ЦАП или преодоления внутреннего источника тока, используемого для всех токовых ЦАП.

ЦАП по напряжению основаны на 256 уровневом резистивным делителем, присоединённым между AVDD и AVSS (один делитель общий для всех 6 ЦАП). Каждый резистор имеет номинальное сопротивление в 40 Ом с общим сопротивлением матрицы в 10.2 кОм. Это позволяет создавать напряжением с уровнями между AVSS и AVDD с 8 бит разрядностью. Значения в регистрах настроек напряжения для ЦАП декодируются и используются для управления массивом аналоговых переключателей, подключенных между 256 узлами делителя и входами ЦАП.

ЦАП по силе тока реализованы в виде повторяющихся 255 раз одинаковых элементов, которые представляют собою источники тока, генерирующие ток в соответствии с LSB. LSB составляет $1/256$ часть от IREF – внутренне генерируемого опорного тока. IREF в нормальном состоянии равен 10.24 мкА, то в таком случае $LSB \sim 40$ нА. Значения в регистрах настроек напряжения для ЦАП декодируются и используются для управления массивом аналоговых переключателей, подключенных между LSB источниками тока и входами ЦАП. Затем выхода ЦАП по току масштабируются для подходящего уровня перед подачей на пиксельную матрицу.

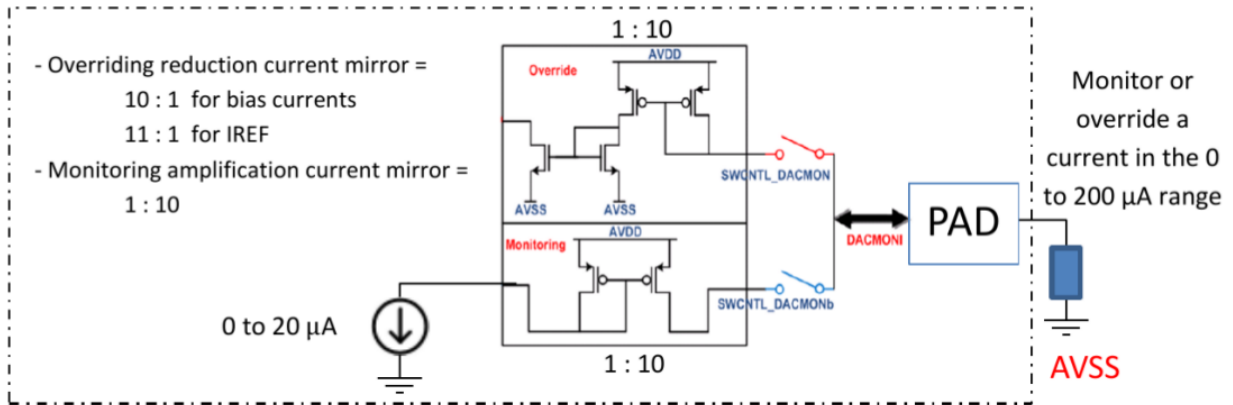


Figure 4.7: Current DACs monitoring and overriding scheme

Рисунок 10 – Схема ЦАП по току для питания схемы по переднему фронту

1.11. Адрес – Ресет Энкодер (AERD)

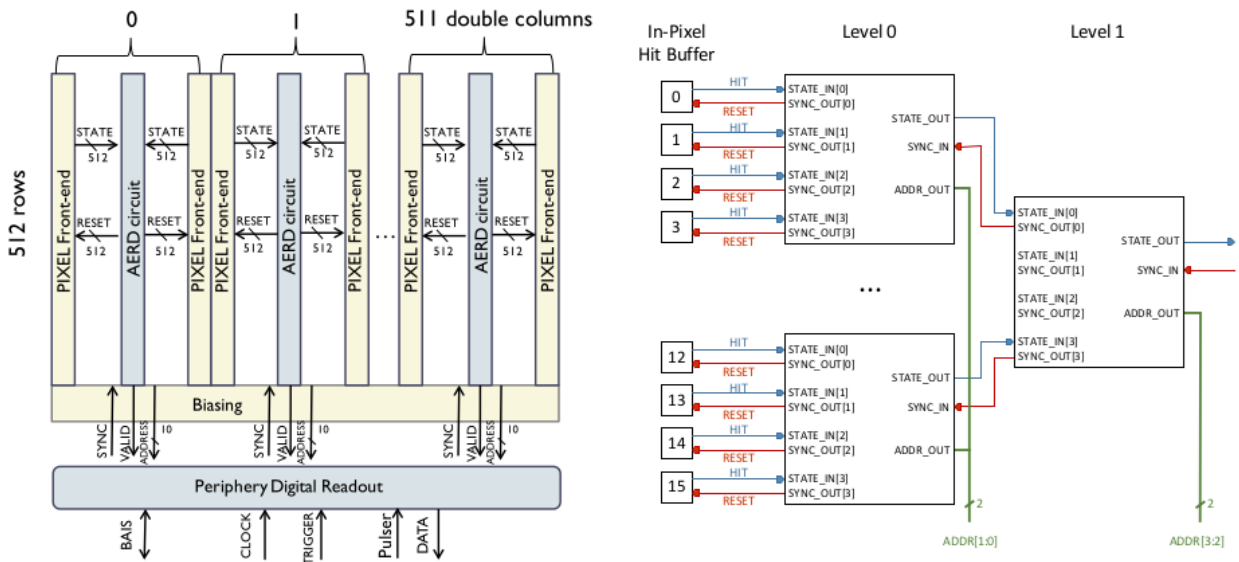


Figure 5.7.: Left: readout structure of the ALPIDE chip, taken from [141]. Right: hierarchical AERD scheme, adapted from [141].

Рисунок 11 – схема Адрес – Ресет Энкодера

AERD является одной из важных составляющих считывающей схемы, основанной на детекции активных пикселей. Две соседние колонки делят общую считывающую цепь, как показано на рисунке 5.7 слева. Структура двойных колонок AERD вместе с иерархической схемой (5.7 справа) приведет к лучшему использованию доступного пространства для распределения сигналов (routing) и непосредственной схемотехники.

Каждый уровень иерархии состоит из блоков, сочетающих четыре входа. Четыре входа является лучшим выбором между числом транзисторов и routing lines (дорожки), необходимых для реализации. Сигнал STATE_OUT определяется как логическое OR или входа STATE_In. Сигнал SYNC_IN включает SYNC_OUT выход соответствующего блока. SYNC_IN сигнал предупреждает STATE OUT при активном STATE_IN в высоком приоритете. Во встроенном в пиксель буфере восходящий фронт сигнала RESET производит его сброс. Данная полностью асинхронная схема работает на частоте 40 МГц в рALPIDE-3, 10 МГц в рALPIDE-1/2. Более детальное описание AERD представлено в 141.

1.12 Тестовые платы

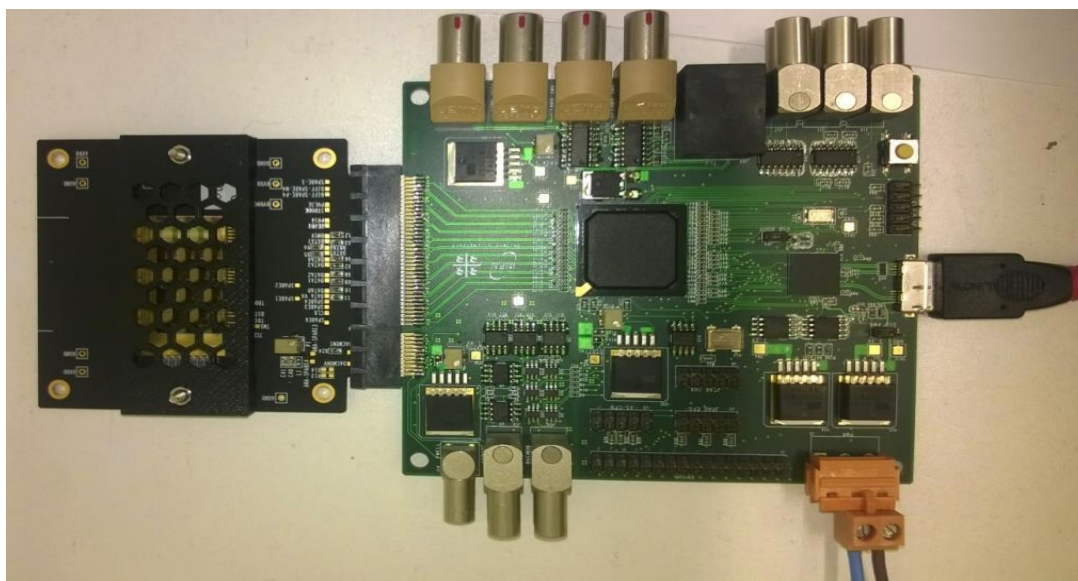


Рисунок 12 –Внешний вид тестовой платы

Для проведения тестов качества чипа rALPIDE было разработано DAQ и несущая плата. На рисунке 12 вы можете видеть, как эти платы подключены вместе. Несущая плата содержит в себе rALPIDE-v), осуществляет питание и обеспечение соединения с DAQ.

Схема DAQ приведена на рисунке. Для работы самой платы необходимо 5V, кроме того DAQ подключена к PC посредством USB. Данный DAQ может осуществлять подключения с rALPIDE (указать версии). На плате содержатся потенциометры для варьирования аналогового и цифрового питания (VDDA, VDDD), которые по умолчанию установлены в 1.8 В, разъемы для платы — носителя, разъем LEMO для применения напряжения смещения к подложке чипа (?!), а так же FPGA чип.

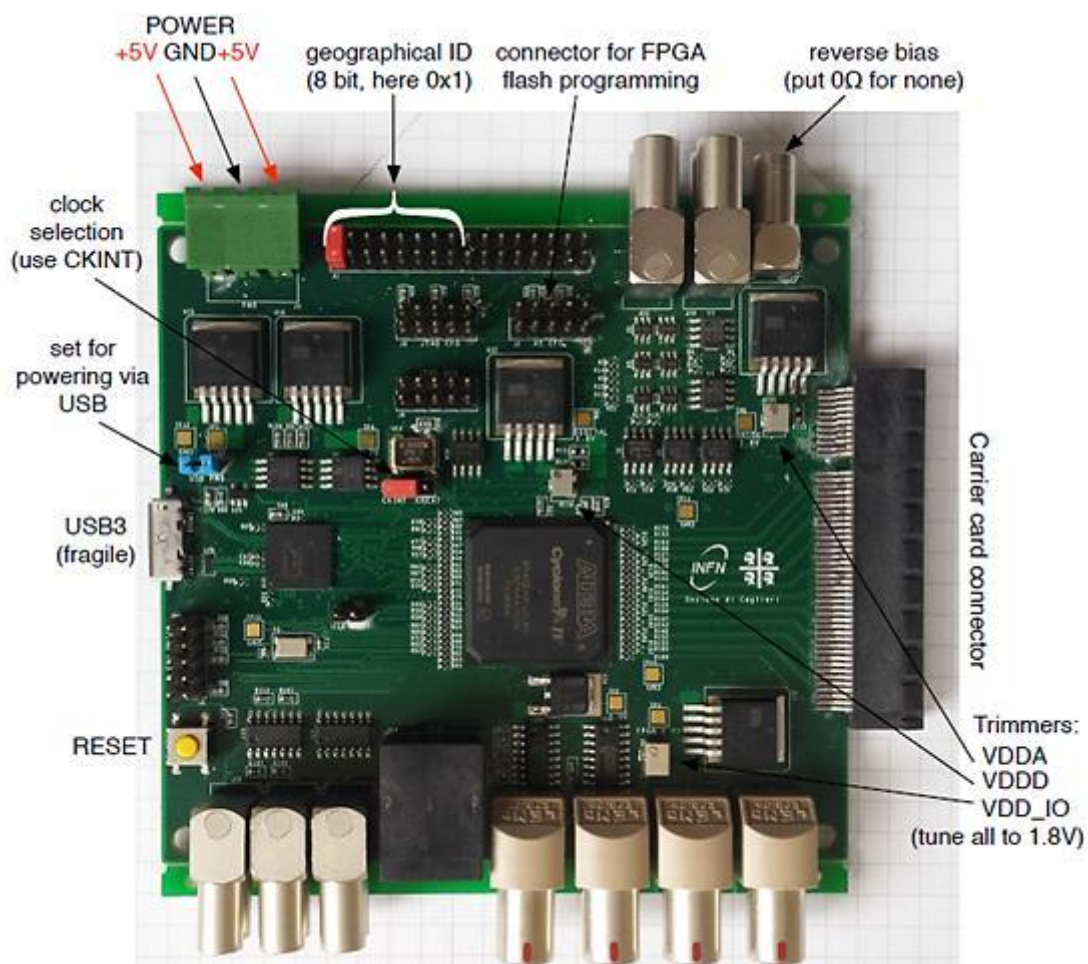


Рисунок 13 –DAQ

2. Практическая часть

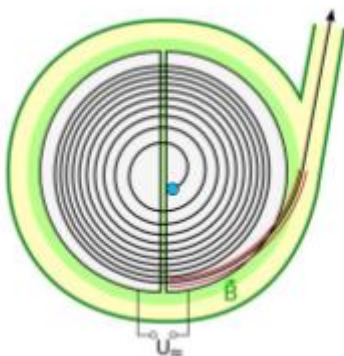
2.1 ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТЕКТОРА

В течение кампании по изучению качества прототипов ALPIDE были проведены тесты качества сенсоров. В данной главе будут рассмотрены основные механики и инструменты для тестирования. В частности, рассмотрено два типа исследования. Первое из них — лабораторные исследования, проводимые в Институте Ядерной Физики, Ржеж, другие — исследования на телескопе, которые осуществляются в PS CERN.

2.1.1 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе будут рассмотрены лабораторные исследования, проводимые в Институте Ядерной Физики, Ржеж на циклотроне U-120M. Главной характеристикой, которая была исследована в ходе данных экспериментов, является радиационная стойкость прототипов pALPIDE и их способность к регенерации.

Как было сказано ранее, в ходе эксплуатации ближний слой внутренней трековой системы ALICE будет подвергаться радиации уровня до 2700 krad за 4 года, для проверки работоспособности чипа в данных и более критичных условиях было проведено облучение прототипа на циклотроне протонами с энергией в 50 МэВ и последующее проведение лабораторных тестов чипа во время регенерации.



2.1.1.1 Ассинхронный циклотрон U-120М

Циклотрон представляет собою циркулярный ускоритель частиц. Данный ускоритель был изобретен и сконструирован Э. Лоуренсом в 1932. Схема типичного циклотрона показана на рисунке. Центральная вакуумная камера с двумя электродами (дуанты) имеет форму половины полого цилиндра и помещается между двумя полюсами сильного электромагнита. Дуанты изолированы друг от друга и размещены таким образом, что существует узкая щель между ними. Полярность дуантов изменяется периодически с частотой порядка 20МГц.

Заряженные частицы подаются на вакуумную камеру, расположенную в центре ускорителя. По причине силы Лоуренса частицы имеют траекторию в виде окружности внутри дуанта до тех, пора пока они не достигнут его границы. В щели между двумя дуантами частицы ускоряются магнитным полем. Частицы с увеличенной скоростью двигаются с той же самой угловой скоростью по траектории с большим радиусом. Циклотрон ускоряет частицы только когда частоту и фаза электрического поля в щели совпадает с частотой и фазой частицы. Радиус орбиты частицы следует из равенства силы Лоуренса и центростремительной силы:

$$Bqv = \frac{mv^2}{r},$$

Где q — заряд частицы

B — индукция магнитного поля.

v — скорость частицы

m — масса

r — радиус траектории

Поскольку выражение для скорости частицы имеет вид:

$$v = 2\pi r f$$

То частота циклотора равна

$$f = \frac{Bq}{2\pi m}.$$

Следует отметить, что циклотрон U-120M имеет различие относительно классической конструкции, описанной выше. Так, данный циклотрон имеет всего один дуант. (Dee electrode), в качестве второго дуанта выступает стенка вакуумной камеры, которая заземлена.

Особенности данного циклотрона позволяет ему ускорять положительно заряженные легкие ионы H^+ , D^+ , He^{+2} и отрицательно заряженные ионы H^- , D^- . Каждый из режимов работы ускорителя требует различные механизмы инжекции. В положительном режиме для ускорения ионов используется магнитный (kicker), а так же трехуровневая система электростатического отклонения (изображена на левой части рисунка). В отрицательном режиме заряженные частицы ускоряются в том же направлении, что и в положительном режиме. Отрицательные ионы теряют один валентный электрон, проходя через 1мкм слой углеродной фольги. Сила Лоуренса автоматически отклоняет пучок ныне положительных ионов из пространства вакуумной камеры, направляя его к выходному пучку (short beam line). Выходной пучок оборудован набором четырехполюсных фокусирующих магнитов и завершается 55 мкм алюминиевым выходным окном, которое разделяет внутренний вакуум циклотрона от окружающего воздуха. Отрицательный режим имеет более высокую эффективность извлечения пучка, поскольку положительный режим в значительной мере страдает от потерь электростатических электронов. Для отрицательного режима неточность в определении энергии частицы составляет порядком ~ 0.25 MeV.

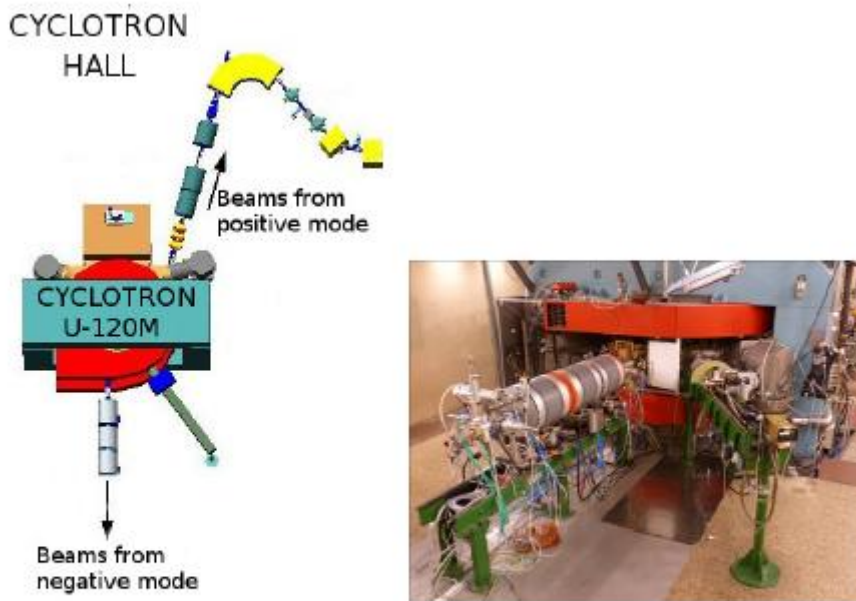


Figure 2.2: Left: Scheme of the isochronous cyclotron U-120M together with the beam lines for the positive and the negative mode. Right: The negative mode beam line from the isochronous cyclotron U-120M. Taken from [4].

Рисунок 13 –Циклотрон U120-М

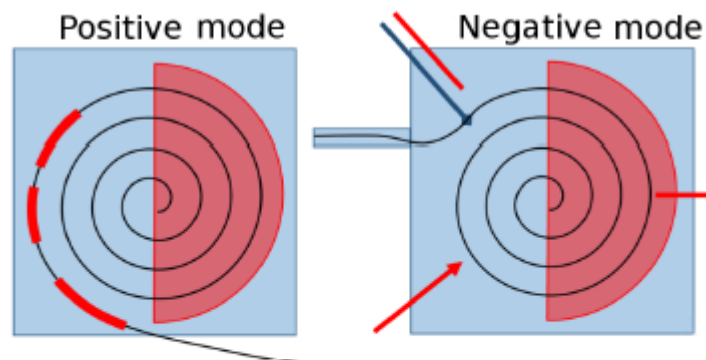


Figure 2.3: The positive and the negative mode of the U-120M isochronous cyclotron. The Dee electrode is marked by the red semi-circle. In the positive mode the beam is extracted by means of three electrostatic deflectors marked in red. In the negative mode the beam is extracted using a stripping foil placed in the upper left corner of the figure and marked with dark blue color.

Рисунок 13 –Позитивный и негативный режим работы циклотрона U120-

Ion	E [MeV]	I_{max} [μ A]
H ⁺	6 - 25	5
H ⁻	6 - 37	50 - 35
D ⁺	12 - 20	5
D ⁻	11 - 20	35 - 20
³ He ⁺²	18 - 52	2
α	24 - 38	5

Table 2.1: Range of kinetic energies and the maximal current for given ion beam. Data correspond to the external beams from the isochronous cyclotron U-120M. Taken from [4].

В ходе данного теста использовалось пучок положительных протонов с энергией в 50 МэВ.

2.1.1.2 Описание установки для проведения тестов.

Для проведения тестов по радиационной устойчивости особенно важно обеспечение равномерности распределения потока протонов по пространству чувствительного элемента rALPIDE, поскольку параметры, исследуемые в ходе данного эксперимента, характеризуют поведение чипа в целом, и наличие эффектов, связанных с неоднозначностью или неравномерностью облучения, может заметно исказить результаты. Кроме того, в ходе экспериментов необходимо динамически изменять положение облучаемого прибора, что невозможно делать вручную вследствие высокой радиации. Поэтому проведение тестов на циклотроне сопряжено с то необходимо наличия специализированного оборудования, в частности системы двухмерного позиционирования. Схема данной установки изображена на рисунке.

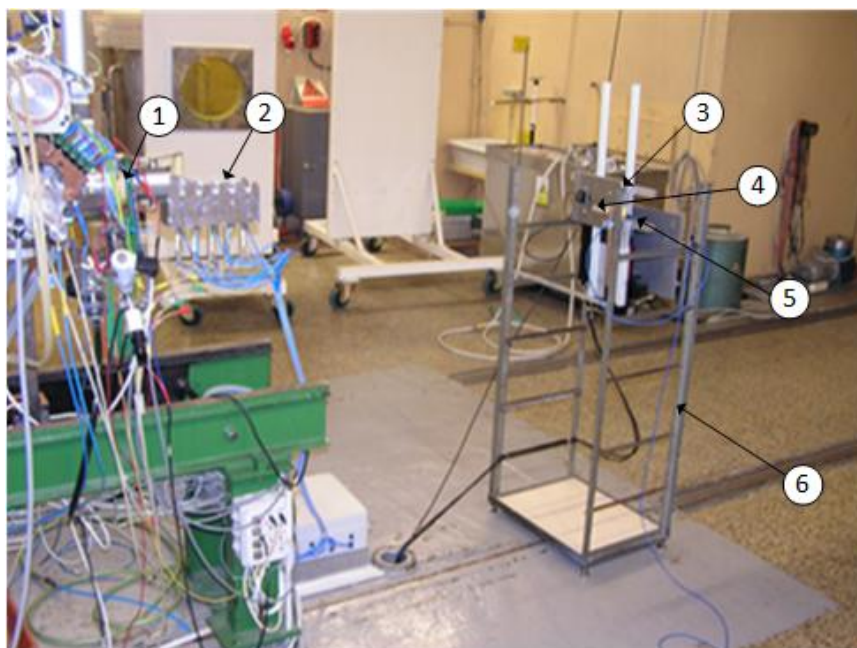


Рисунок 14. Основные элементы экспериментальной установки: 1 - Выходное отверстие для пучка частиц, 2 - Система ослабления энергии пучка, 3 - Защитная шторка, 4 - Чувствительный элемент ионизационной камеры, 5 - Исследуемое устройство (pALPIDE), 6 - Стол двухмерного позиционирования.

Он состоит из двух шаговых двигателей, каждый из которых ответственен за перемещение по одной из координатных осей. Данные двигатели управляются посредством специализированного контроллера, который считывает команды по RS-232 с терминала оператора. Кроме того для данной установки предусмотрена шторка, которая полностью поглощает нейтронный поток, прекращая облучение микросхемы. Данная шторка имеет пневматический механизм управления по причине чрезвычайно высокой радиации в области близкой к пучку. Для управления шторкой используется пневматический механизм, специализированный нагнетатель, который связан с консолью оператора посредством RS-232.

Так же стоит отметить наличие системы затворов из (название материала), которыми управляется поток протонов, падающих на облучаемое устройство. Данная система затвором так же управляется посредством пневматических механизмов, сигнал на которые подается с терминала оператора

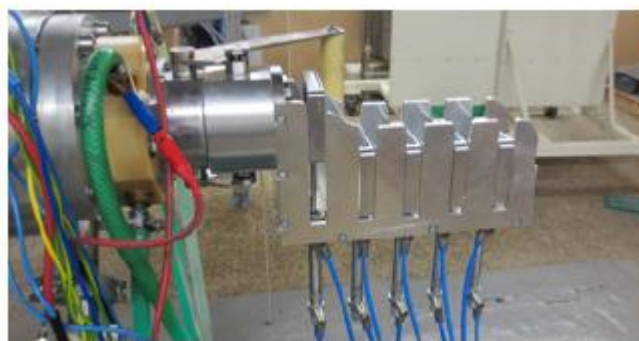


Рисунок 15 – Система управления мощностью пучка

2.1.1.3 Описание эксперимента

Эксперимент по исследованию радиационной устойчивости можно разделить на две части. В ходе первой части эксперимента на циклотроне U-120M проводилось облучение различных спецификаций рALPIDE чипов с заданной дозой и исследовались параметры чипа во время его деградации под воздействием протонного облучения. В частности исследовались функции отклика ЦАП чипа, используемы для питания цепи по переднему фронту, измерялся потребляемый устройством ток, а так же активационные функции пикселей.

По окончании облучения исследуемые устройства были возвращены в лабораторию, где над ними раз в несколько дней проводились похожие тесты, целью которых было изучение способностей чипов к восстановлению после получения радиационной дозы.

Подобные циклы облучения-восстановления чипов были проведены пять раз с сентября 2016 года по Апрель 2017 года для вейферов A4W7G7R38 и A4W7G7R41 , была составлена база данных, на основе которой производился дальнейший анализ.



2.1.1.4 Эксперимент на циклотроне

Эксперименты на циклотроне состояли из нескольких этапов:

1) В ходе первого подготовительного этапа производится калибровка системы позиционирования, поиск крайних точек, установка нулевой координаты. В ходе данного этапа все защитные шторки на излучателе закрыты, излучение равно нулю.

2) В ходе второго подготовительного этапа происходит открытие защитной шторки и идет сканирование профиля пучка по обоим координатам. Для этого одна координат фиксируется и происходит движение системы позиционирования вдоль другой оси. При этом происходит измерение силы тока на ионизационной камере. Проводится интерполяция измеренных данных и находится точка максимума по обеим осям. Координаты максимума будут соответствовать центру пучка, в это место будет помещено изучаемое устройство.

3) Этап проведения тестов устройства. Макрос, написанный на языке C++, запускается на консоли оператора и осуществляет измерение следующих параметров устройства:

- Активационная функция
- Внутренний шум
- Потребление аналогового тока устройством
- Функция отклика внутренних ЦАП устройства

Более подробное описание этих тестов приведено в последующих главах. Во время всех тестов облучение устройства не производится.

4) Этап облучения устройства. Происходит мониторинг параметров ионизационной камеры: аналоговый ток, флюенс, поглощенная доза и флюкс. Кроме того измеряется аналоговый ток, потребляемый устройством для детектирования критического состояния системы.

Последние два этапа циклически повторяются друг за другом при получении исследуемым устройством некоторой фиксированной дозы порядком ~20 кРад.

Данный эксперимент был проведен пять раз для вейферов A4W7G7R38 и A4W7G7R41 в период с сентябрь 2016 по март 2017. Условия проведения тестов представлены в таблицах ниже.

Таблица 4. Параметры облучения для A4W7G7R38

Period	Dose, [krad]	Total accumulated Dose, [krad]	Fluence [$\text{cm}^{-2} \cdot 10^{10}$]	Total accumulated Fluence [$\text{cm}^{-2} \cdot 10^{10}$]	Dose rate [rad/sec]	Mean of Flux [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^8$]
September 2016	340	340.7	144.7	144.7	35.1	2.561
October 2016	122	463	51.9	196.7	45.1	2.765
December 2016	122	585	51.8	248.7	15.7	1.654
January 2017	89.3	674	37.9	286.6	22.4	2.098
March 2017	77.9	752	33.1	319.7	18	1.625

Таблица 5. Параметры облучения для A4W7G7R41

Period	Dose, [krad]	Total accumulated Dose, [krad]	Fluence [$\text{cm}^{-2} \cdot 10^{10}$]	Total accumulated Fluence [$\text{cm}^{-2} \cdot 10^{10}$]	Dose rate [rad/sec]	Mean of Flux [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^8$]
September 2016	338	338	143.7	143.7	9.4	0.761
October 2016	171	509	72.6	216.4	46.5	2.785
December 2016	139	649	59.3	275.8	32.2	2.958
January 2017	124	773	52.9	328.8	12.6	0.764
March 2017	111	885	47.3	376.2	15.2	1.604

На рисунке изображена экспериментальная зависимость между временем эксперимента и дозой, поглощенной детектором, для различных экспериментов для чипов R41 и R38.

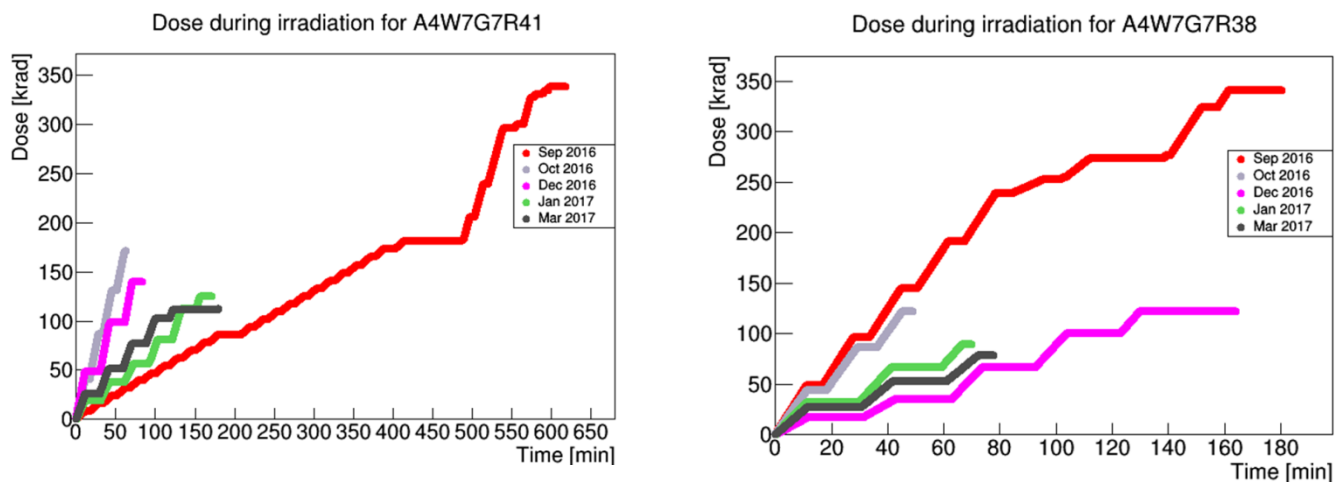


Рисунок 16 – Аккумулятивная доза в ходе одного эксперимента для чипов A4W7G7R41 и A4W7G7R38

На данных графиках видны стадии облучения – проведения тестов над детектором в виде ступенчатой функции. Кроме того, данный график позволяет судить об особо важном параметре темпа получения дозы, который наряду с общей аккумулятивной дозой влияет на характеристики детектора.

2.1.1.4 Лабораторный эксперимент

По окончании облучения исследуемые устройства были возвращены в лабораторию, где происходило изучение способностей чипов к восстановлению после полученной радиационной дозы.

Схема эксперимента представлена на фото

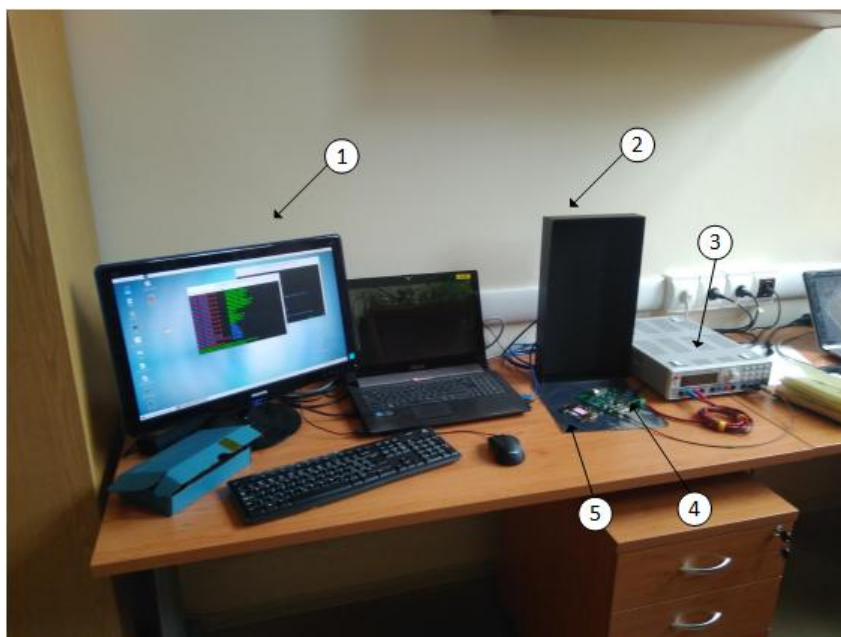


Рисунок 17 –Схема лабораторного эксперимента

1) Консоль оператора — на ней производится загрузка прошивки (найти нормальное слово) в DAQ устройство, а так же запуск скриптов для тестирования pALPIDE

2) Защитный экран — защита от электростатического электричества, а так же воздействия солнечного излучения.

2) Источник напряжения. Предоставляет $V_{DD}=5V$ для работы DAQ.

4) Схема-носитель детектора pALPIDE — обеспечивает питание и возможность подключения pALPIDE к DAQ.

4) DAQ устройство — осуществляет питание, управление, а так же связь детектора с компьютером.

5) Электростатическая подложка — защита схемы от электростатического электричества, возникающего на поверхности стола.

2.1.1.5 Исследование активационной функции и внутреннего шума

Величина сигнала, необходимого для активации пикселя имеет значительное влияние на качество работы сенсора: более низкое значение сигнала активации увеличит эффективность детектирования, но так же и повлечет за собою увлечение частоты ложного срабатывания. В дальнейшем, увеличение порога активации приводит к уменьшению множественности кластеров с дальнейшим влиянием на разрешение определяемой позиции.

Как было обсуждено в описании аналоговой цепи по переднему фронту, значение заряда для срабатывания пикселя в основном определяется входной ёмкостью пикселя C_p а так же параметрами цепи по переднему фронту, которыми в основном являются I_{THR} V_{CASN} . Данный заряд может быть измерен для заданных настроек напряжения смещения используя аналоговую пульсацию (?). Для этого диапазон тестируемых зарядов Q_{inj} инжектируется N раз на каждый выбранный пиксель. Затем, для каждого тестового заряда измеряется зависимость между количеством пикселей, которые зарегистрировали столкновение, и числом зарядов N , которые были осаждены на собирающий диод пикселя.

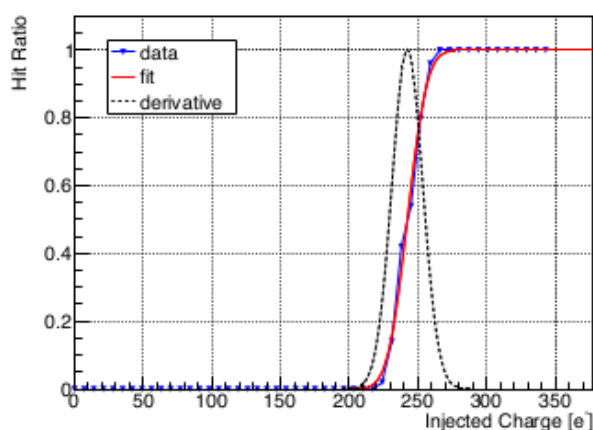


Figure 5.12.: S-curve measurement: hit ratio $r(Q_{inj})$ as a function of Q_{inj} for a pALPIDE-1 pixel at nominal bias settings and $V_{BB} = 0$ V.

Рисунок 18 –Пример активационной функции пикселя

Результатом является активационная функция $r(Q_{inj})$ цепи по переднему фронту:

$$Q_{inj} \rightarrow r(Q_{inj}) = \frac{N_{hit}(Q_{inj})}{N}.$$

Для функционального пикселя, подверженного воздействию только Гауссианового шума, $r(Q_{inj})$ описывается сдвинутой и масштабированной функцией ошибок вида

$$f(Q_{inj}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Q_{inj} - Q_{thr}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right],$$

где Q_{thr} есть пороговое значение, т.е. величина заряда, необходимая для активации пикселя с вероятностью в 50%. Параметр σ описывает временный шум. Подтверждается, что стандартное отклонение производной от $r(Q_{inj})$ является Гауссовой функцией.

Важность этого изучения состоит в большом влиянии вида активационной функции пикселя на его характеристики эффективности, шумовые и прочие.

Были созданы программы для анализа характеристик активационной функции. Результаты представлены в данной главе.

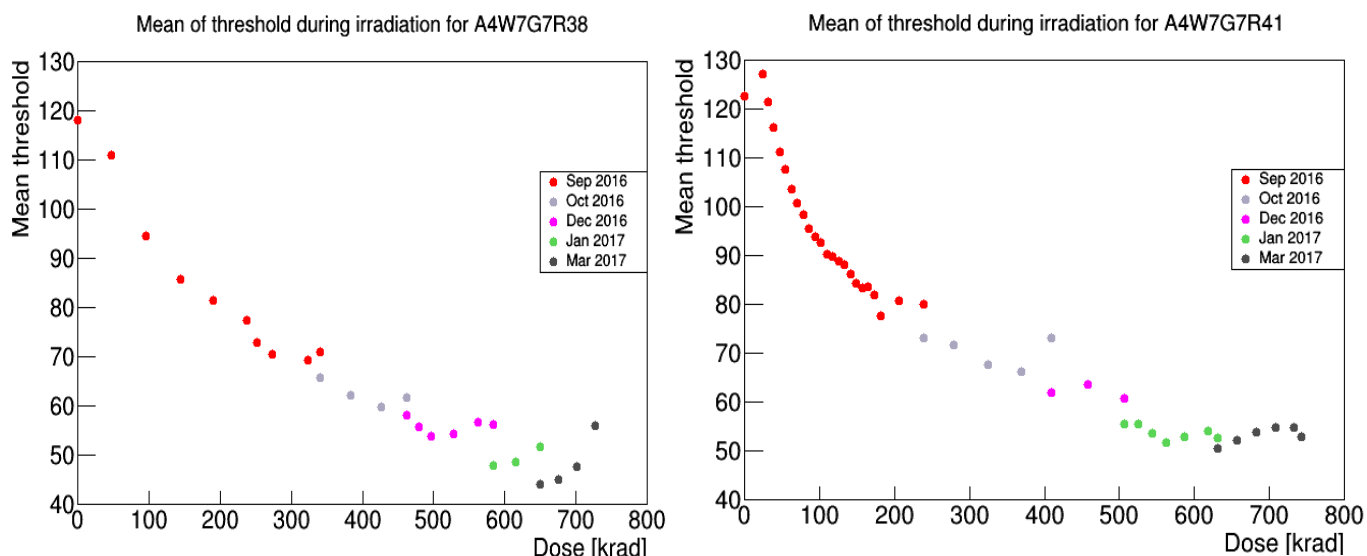


Рисунок 16 – Среднее значение

заряда для активации пикселя в зависимости от общей аккумулярованной дозы для чипов A4W7G7R41 и A4W7G7R38

На рисунке изображена экспериментальная зависимость между дозой, поглощенной детектором и средним значением функции активации пикселя, для различных экспериментов для чипов R41 и R38. Согласно данным графикам можно сделать следующие выводы:

- Для обоих детекторов наблюдается схожая обратная зависимость между полученной дозой и величиной заряда, необходимого для активации пикселя. Согласно [ссылку] понижение порога активации приведет к усилению влияния шумов и снизит эффективность детекции частиц. В подтверждение этого вывода можно привести графики результатов эксперимента на рисунке

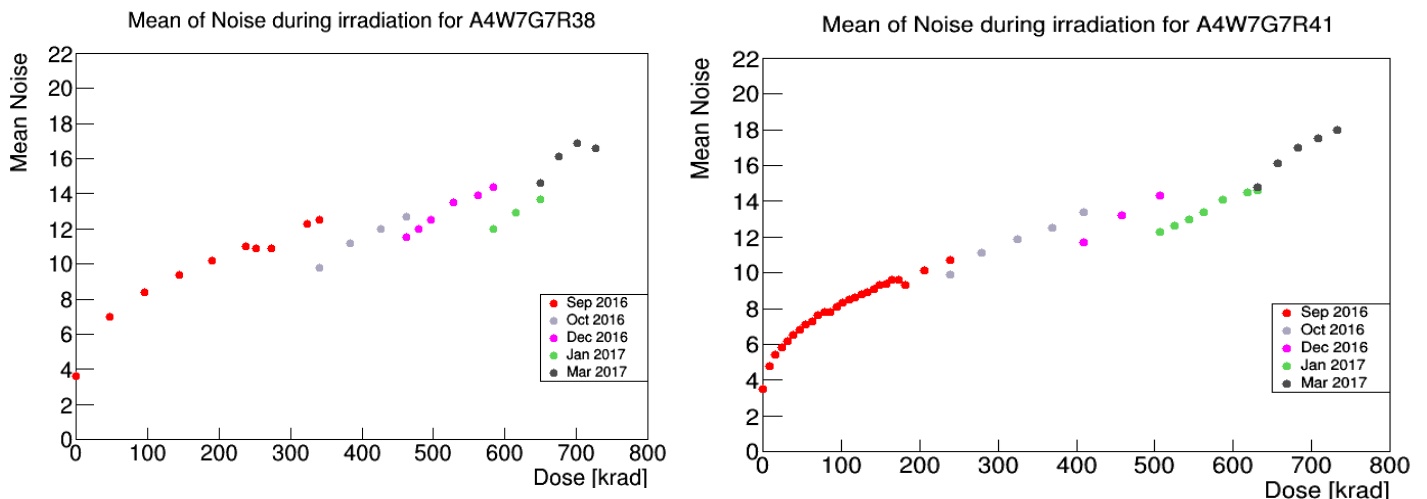


Рисунок 17 – Среднее значение внутренних шумов зависимости от общей аккумулярованной дозы для чипов A4W7G7R41 и A4W7G7R38

На данных графиках отчетливо видно, что с увеличением аккумулярованной дозы увеличиваются внутренние шумы в схеме детекции.

- (Сравнить полученную дозу на циклотроне и дозу вследствие запусков ALICE. Сказать, что после сентября – октября проводятся уже критические тесты. Добавить, что, не смотря на критическое положение зависимость стабилизировалась.)

- В ходе этапа восстановления между запусками циклотрона изменение порога активации были в пределах флуктуации, что говорит об отсутствии восстановительных процессов касательно параметров активационной функции.

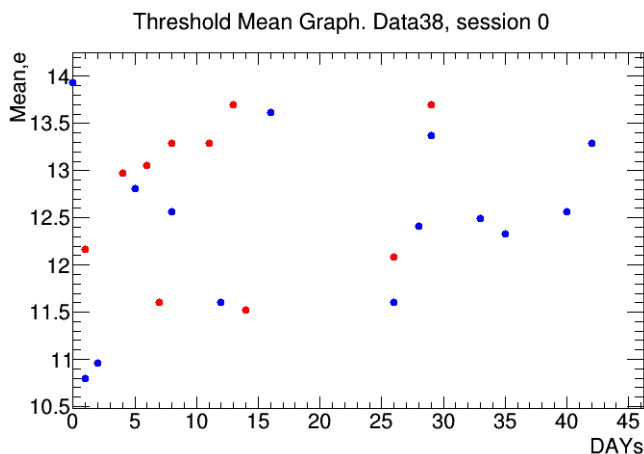


Рисунок 18 – Среднее значение заряда для активации пикселя в период восстановления в зависимости от пройденных дней для A4W7G7R38

Последний вывод отлично подтверждается так же измерениями пороговой функции, проведенными во время этапа восстановления. На рисунке показан график изменения пороговой функции от числа дней, прошедших после облучения для периода с декабря 2016 по январь 2017 (красные точки) и январь 2017 – март 2017 (синие точки) для чипа 38.

2.1.1.6 Статическая функция компонентов цепи по переднему фронту

Как уже было упомянуто в пункте (??) для питания элементов цепи по переднему фронту предусмотрено напряжение смещения, которого генерируется набором из 11 ЦАП. Предусмотрена возможность мониторинга выхода соответствующего ЦАП, используя выход DACMONV для измерения напряжения или DACMONI с 5 КОм шунтирующим резистором для измерения тока. Напряжения с данных входов поступают на АЦП, которые расположены

на плате-носителе (рисунок). Затем данные поступают по USB на персональный компьютер.

В ходе данного эксперимента происходит измерение статической функции ЦАП. Для каждого из 11 ЦАП происходит запись в регистр настроек выходного напряжения значений от 0 до 255 и измерение выходных показаний. Измеренные значения записываются в файл в виде двух колонок: первая содержит числа от 0 до 255, вторая – соответствующие значения тока или напряжения.

В качестве первого результата рассмотрим эксперименты, проведенные в ходе облучения детектора A4W7G7R38 в ходе облучения на циклотроне в ходе опыта в сентябре 2016 года.

В качестве примера результатов эксперимента показаны ЦАП, ответственные за работу I_{THR} и V_{CASN} , поскольку данные параметры играют важную роль в детектировании частицы, задавая форму и амплитуду порогового заряда, тем самым влияя на эффективность и внутренние шумы. Результаты эксперимента показано на рисунке.

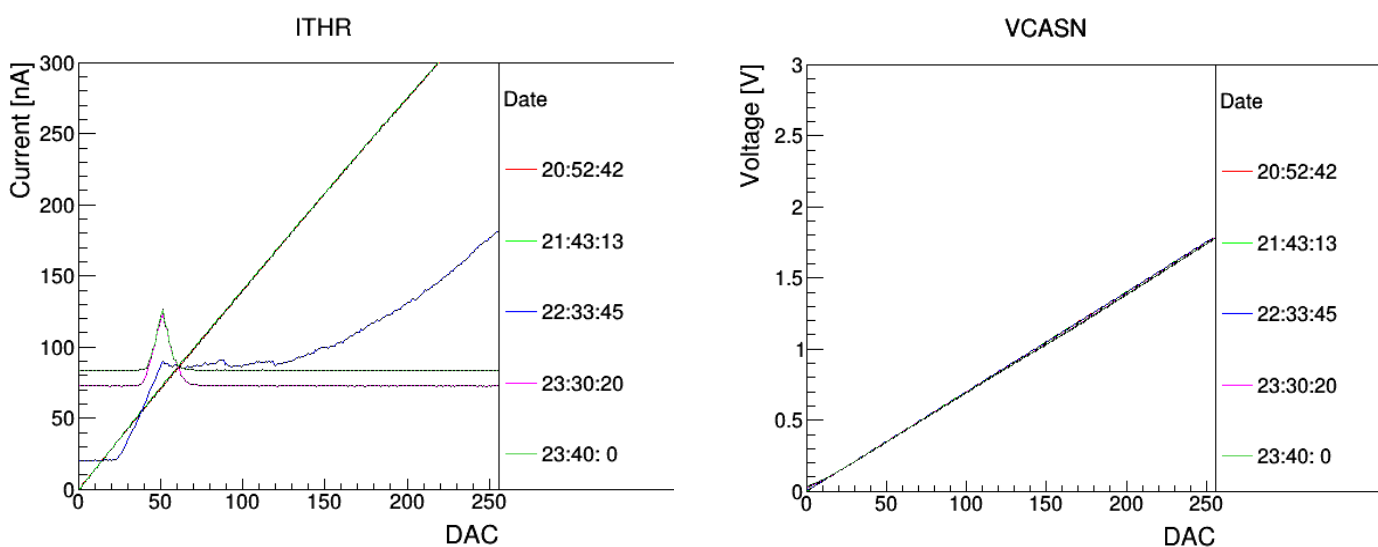


Рисунок 19 – Функция отклика для I_{THR} и V_{CASN} ЦАП во время облучения в сентябре 2016 года для A4W7G7R38

Для ЦАП, ответственного за V_{CASN} нет значительных изменений в виде функции отклика во время облучения, и на протяжении всего эксперимента она имеет вид прямой зависимости.

Для ЦАП, ответственного за I_{THR} можно заметить другую тенденцию: изначально прямая зависимость искажается, постепенно вырождаясь в полную независимость между показателем DAC и величиной силы тока.

Различие между результатами теста для двух ЦАП объясняется различием в их внутренней структуре. Так для создания ЦАП по напряжению используется резистивная матрица, составные элементы которой не сильно подвержены влиянию радиации. В то время как ЦАП по току представляет собою токовое зеркало, основа которого – полупроводниковые элементы заметно ухудшают свои характеристики под воздействием облучения.

Стоит заметить пик на DAC=51 на характеристике I_{THR} . По значению DAC оно равно номинальной точке для данного ЦАП, но по величине выходного тока она значительно превосходит значение тока при нормальном режиме работы. Данный эффект проявляется на всех ЦАП по напряжению и его природа требует дальнейших исследований.

Другим интересующим экспериментом является изменение характеристик внутренних ЦАП во время периода восстановления. На рисунке показаны результаты эксперимента для функции отклика внутренних ЦАП на примере чипа A4W7G7R38 в конце различных периодов восстановления.

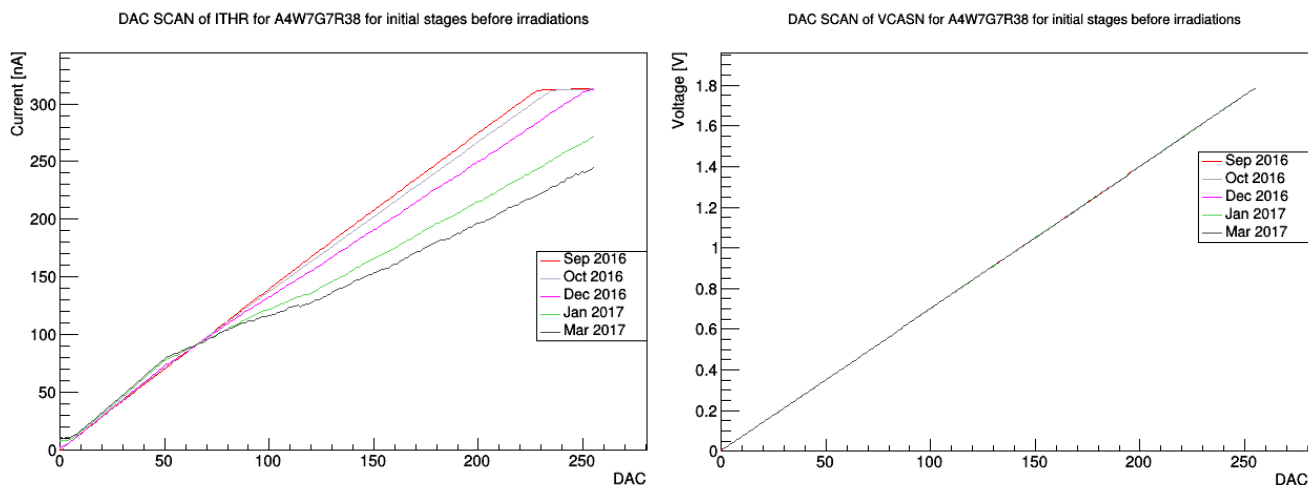


Рисунок 20– Функция отклика для ITHR и VCASN ЦАП во время восстановления для A4W7G7R38

Для V_{CASN} значительных изменений не происходит, в то время как для графика функции отклика ITHR можно сделать несколько значительных выводов:

- В ходе периода лабораторных тестов, происходит восстановление полупроводниковых элементов, входящие в состав внутренних ЦАП по току.
- Возможности к восстановлению зависят от величины полной накопленной дозы и уменьшаются с ее ростом.

2.1.1.6. Исследование потребляемого аналогового тока

В ходе следующего эксперимента проводится измерение аналоговой силы тока, необходимой для питания детектора в статическом режиме. В качестве примере результатов эксперимента рассмотрим измерения аналоговой силы тока чипа A4W7G7R41 в ходе нескольких периодов облучения на циклотроне. Результаты представлены на рисунке

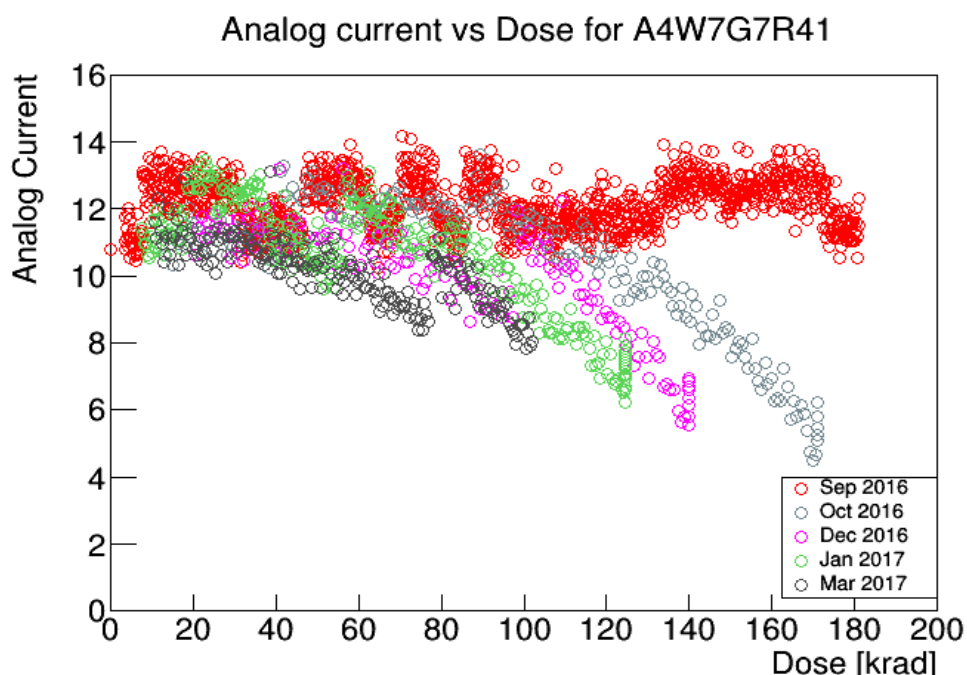


Рисунок 21– Зависимость аналогового тока питания схемы от поглощенной дозы для разных периодов облучения для A4W7G7R41

Согласно данному графику можно предложить следующие выводы:

- В ходе облучения происходит уменьшение величины тока, необходимой для питания детектора. Данный эффект можно использовать для детектирования критического состояния облученного детектора.
- В ходе периода лабораторных тестов происходит полное восстановление значений тока, необходимого для питания схемы. Кроме того с увеличением общей аккумулярованной дозы не происходит ухудшение способности к восстановлению.
- Форма графика аналогового тока в ходе эксперимента в сентябре 2016 года значительно отличается от остальных и остается примерно на одном уровне вне зависимости от величины поглощенной дозы. Данный эффект можно объяснить тем, что в ходе данного эксперимента наблюдается самый низкий темп получения дозы среди всех проведенных экспериментов. В ходе данного эксперимента скорость дегенерации полупроводниковых элементов под воздействием радиации примерно равна скорости их восстановления, поэтому характеристика имеет вид, близкий к прямой линии.

2.1.2 ТЕСТЫ НА ПУЧКЕ

Следующая группа экспериментов связана с экспериментом, проводимым на базе CERN. В ходе данных экспериментов производится оценка эффективности детектирования прототипов ALPIDE. Эффективность зависит в основном от двух эффектов: первое, от величины заряда, собранного

чувствительным элементом, величинам VBB, ITHR, VCASN, типами и энергией частиц, а так же геометрией сенсора.

Эффективность детектирования измеряется, используя MIPs, расположенный на базе тестовых объектов CERN и представляет собою так называемый *пучковый телескоп*.

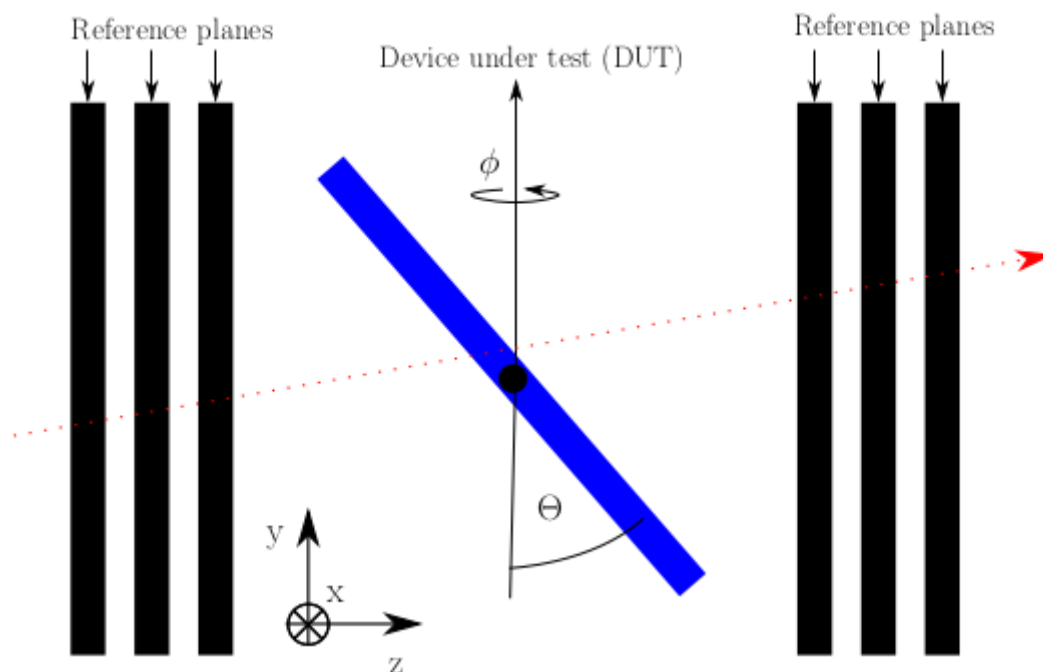


Рисунок 22– Схема установки – телескоп для экспериментов на PS CERN

Схема данной установки изображена на рисунке 22. Телескоп представляет из себя устройство для отслеживания треков частиц, и состоит из нескольких чувствительных детекторов высокого разрешения (*опорные плоскости*). DUT (*тестируемое устройство*) располагается в центре установки и представляет собою чип, над которым проводятся исследования. Три плоскости слева и справа представляют собою чипы с уже известными характеристиками. Частица с высокой энергией пересекает детекторы установки и в идеальном случае должна активировать пиксели в каждой из плоскостей для отображения сигнала. Опорные плоскости используются для восстановления трека частицы, проходящей сквозь них. Этот восстановленный трек распространяется на DUT и сравнивается с теми данными, что

показывается само устройство. В ходе данного сравнение различные качества, такие как эффективность детектирования или **position resolution** исследуемого устройства могут быть изучены.

Особенностями данной установки является возможность вращения DUT в двух направлениях. Каждый отдельный эксперимент характеризуется следующими параметрами (Тип частиц, Энергия, VBB, ITNR, VCASN, phi, theta).

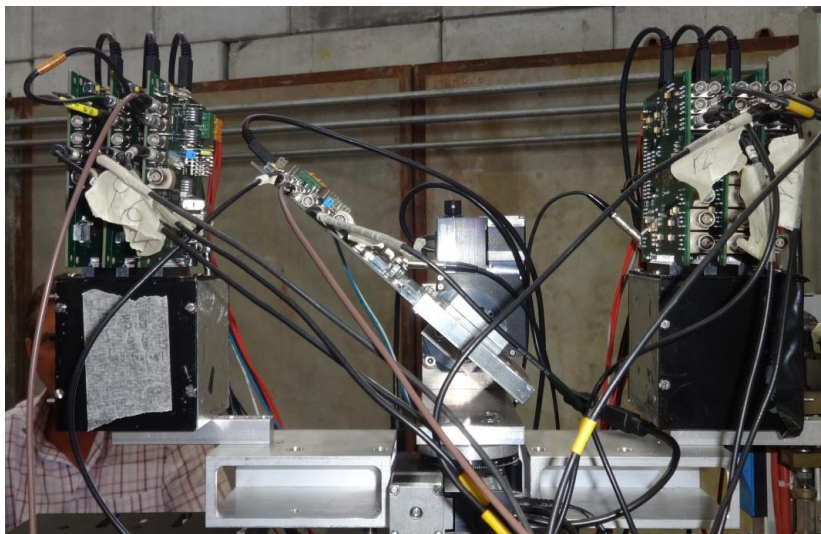


Рисунок 23– Внешний вид установки – телескоп для экспериментов на PS
CERN

Для обработки .RAW данных, представляющих собою информацию об активированных пикселях, и построении на ее основе треков частиц используется фреймворк под названием EUTELESCOPE.

2.1.2.1 EUTELESCOPE.

EUTELESCOPE является программным фреймворком для обработки данных установок типа телескоп. Он предоставляет библиотеки и функции для обработки данных из телескопов и позволяет совмещать различные шаги для

проведения процедуры анализа. В наиболее распространённом случае алгоритм по обработке данных EUTELESCOPE представляет собою следующее.

1. Преобразования – измеренные данные переводятся в специальный формат `Isio`, который будет в дальнейшем использоваться функциями EUTELESCOPE.
2. `DeadColumn` – для прототипов `pALPIDE` возможна ситуация деактивирования двойной колонки пикселей во время считывания данных из-за ложных пикселей. На данном шаге исследуются колонны из двух пикселей, которые не работают, и выставляется флаг для них. Столкновения и треки, которые были обнаружены в определённом радиусе от такой “мёртвой колонны” пренебрегаются на этапе характеристики столкновения для сохранения неизменной эффективности вычисления или смещения значение размеров и форм кластеров.
3. `Hotpixel` – некоторые из пикселей посылают сигнал о том, что они были активированы гораздо чаще, чем это есть на самом деле. В ходе этого шага просматривается, как часто приходит сигнал от пикселей в течение первых 10.000 событий. Если это превосходит некоторый порог, то говорится, что данный пиксель активен $x\%$ из 10К событий, и затем кластеры и треки, близкие к этому пикселю пренебрегаются на этапе анализа.
4. `Clustering` – в ходе данного этапа пиксели, которые были активированы после прохождения частицы группируются в зависимости от их взаимного расположения. Получившиеся группы пикселей называются кластерами.
5. `Hitmaker` – вычисляется центр масс кластеров, сформированных в прошлом этапе и происходит преобразование их локальных координат относительно всего чипа к координатам относительно всего телескопа. Для вычисления геометрии установки используются данные `gear-file`.

6. **Prealign** – производит грубое выравнивание каждой плоскости путем вычисления разности между глобальными x и y координатами частицы для первой и n -ой плоскостью. В ходе данных вычисление передается в учет только средние значения результирующих распределений и относительные сдвиги плоскостей, но не производится учет наклона плоскостей.

7. **Align** - для событий с треками частиц в виде прямых линий производится более точный пересчет выравнивания плоскостей друг относительно друга, в том числе сдвиг или поворот.

8. **Fitter** - производится вычисления треков для каждого события на основе данных из двух предыдущих шагов. В обычном случае данные с DUT не принимаются во внимание для получения данных независимо от исследуемого устройства. Кроме того данный шаг производит экстраполированное положение места столкновения частицы в плоскости исследуемого устройства.

9. **Analysis** - в ходе данного шага вычисляются многие характеристики, такие как **position resolutions**, эффективность детектирования, строятся гистограммы размеров и форм кластеров.

Алгоритм анализа данных в фреймворке EUTELESCOPE представлен на рисунке.

2.1.3 Экспериментальная часть

Было проведено исследование зависимости размеров и форм кластеров для частиц с энергиями 250 МэВ / 6 ГэВ. В результате представлены для пятого сектора детектора, поскольку светимость в данном секторе и соответственно эффективность детектирования частиц была наилучшей.

2.1.3.1 Исследование размеров и форм кластеров для частиц с энергией 250 МэВ

Частицы, обладающие энергией в 250 МэВ более подвержены эффекту увеличению размеров кластеров при увеличении угла наклона, поэтому исследовать зависимости размеров кластеров от различных углов наклона для частиц с энергией в 250 МэВ является одной из интересующих исследователей задач. Результат построения нормированной гистограммы размеров кластеров для частиц с различными углами наклона для пятого сектора указано на рисунке

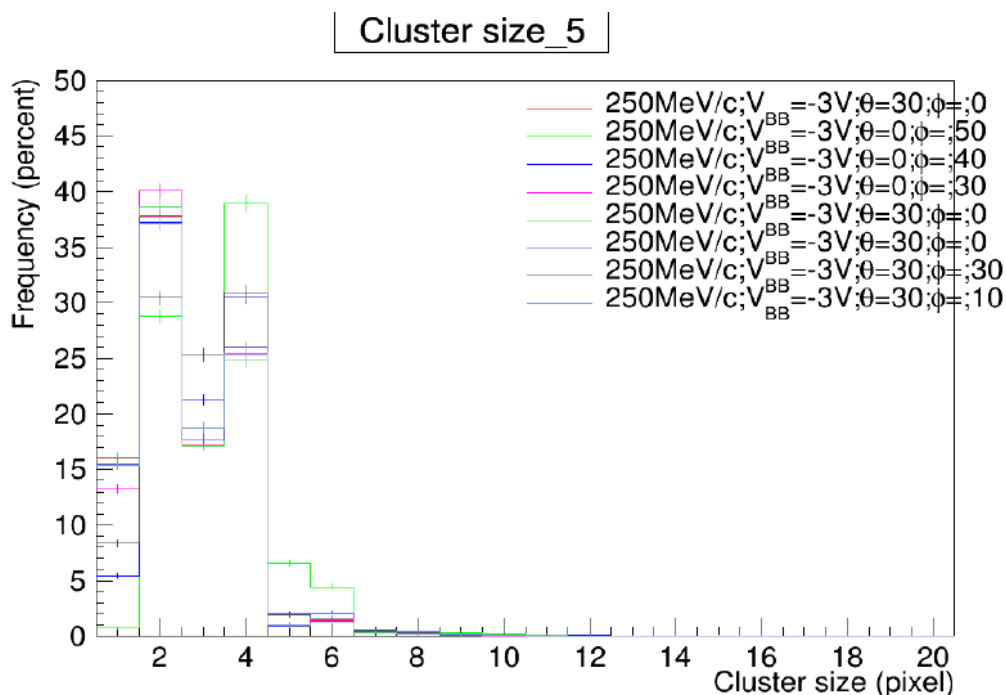


Рисунок 24— Гистограмма размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и различных углов

На рисунке мы можем видеть, что с увеличением угла наклона происходит уменьшение частоты появления кластеров с малым размером и увеличение частоты больших кластеров. Особенно явно это видно на примере кластеров с размером 4 и 5, где для угла $\phi=50^\circ$ частота появления превосходит соседние результаты на 8 (5) процентов соответственно.

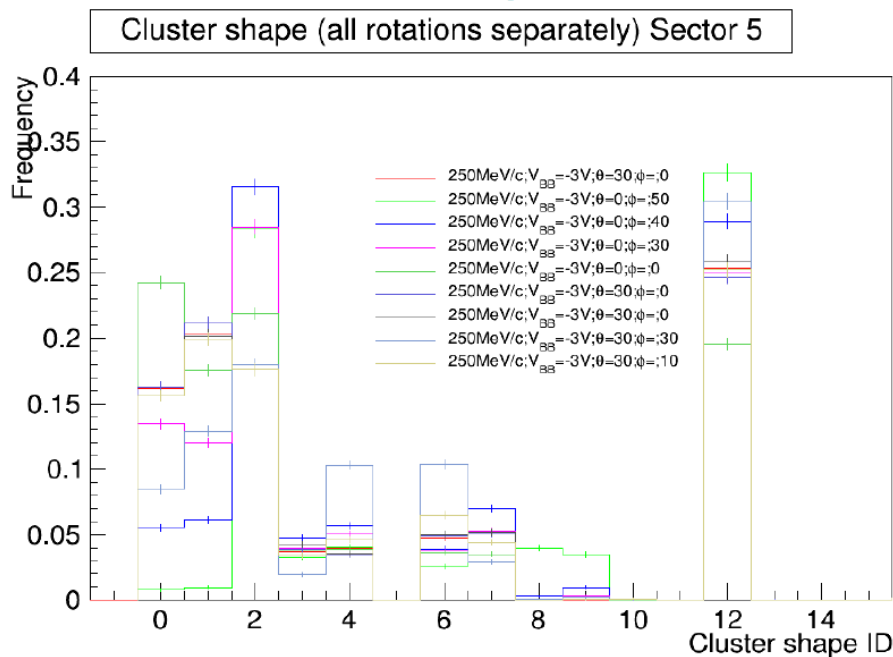


Рисунок 25– Гистограмма форм кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и различных углов

Для форм кластеров влияние угла наклона проявляется в возникновении более сложных форм кластеров.

2.1.3.2 Сравнение размеров кластеров для частиц с различными энергиями.

В ходе данного эксперимента произведен сравнительный анализ размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и 6 ГэВ. Результат представлен на рисунке

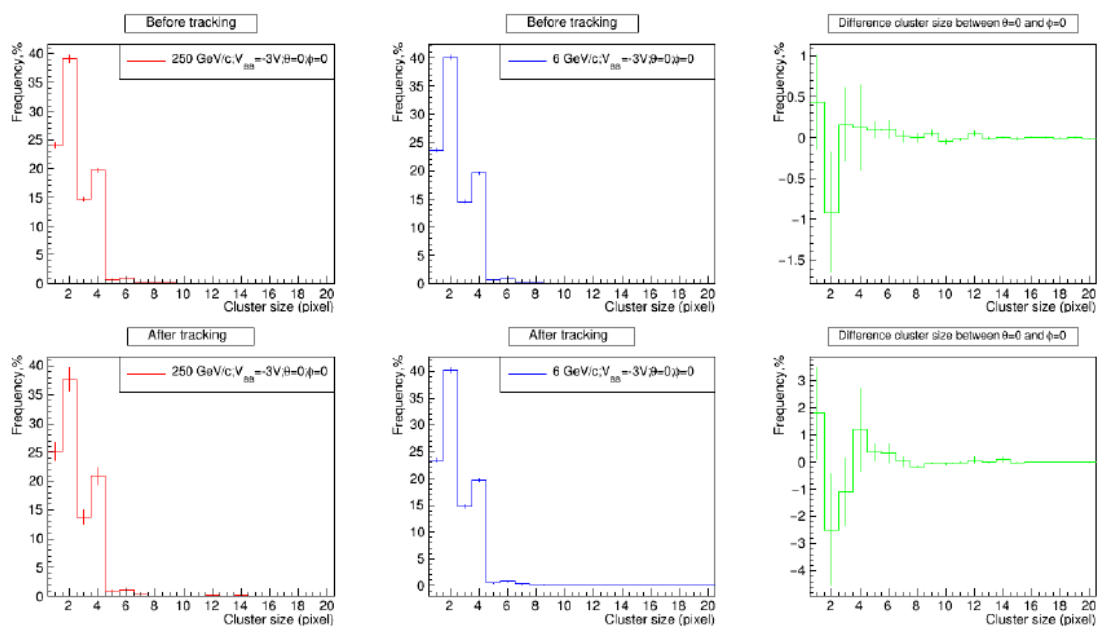


Рисунок 22– Сравнение размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и 6 ГэВ, $\varphi=\theta=0^\circ$

Первая строка показывает результаты для случая до трекинга, т.е. результатов, взятых на основе только исследуемого устройства. Во второй строке показаны исправленные результаты с учетом опорных плоскостей (pALPIDE v2). Первый столбец показывает гистограмму размеров кластеров для частиц с энергией в 250 МэВ, второй – для частиц 6ГэВ, третий – разницу между ними.

Согласно данным гистограммам можно увидеть, что для частиц с энергией в 250 МэВ число кластеров большего размера (больше 3 пикселей) выше на 2- 3%.

Если повторить этот эксперимент для частиц с большими углами наклона и теми же энергиями можно увидеть следующее:

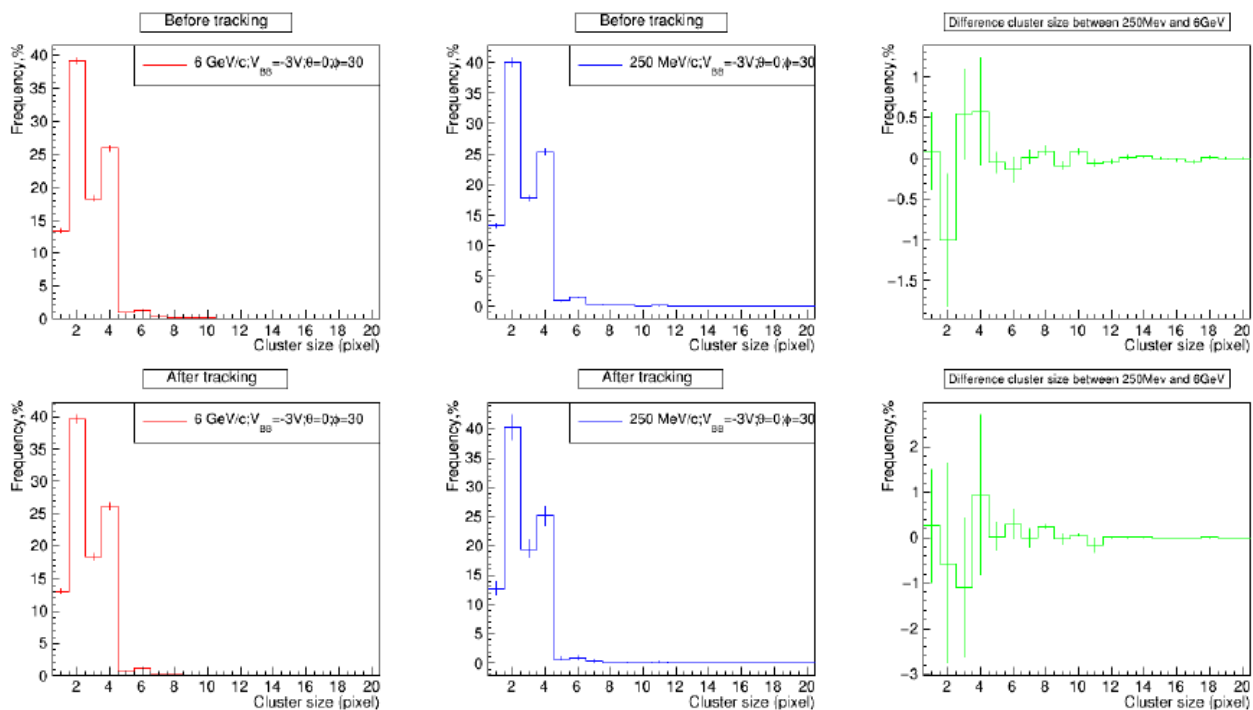


Рисунок 23– Сравнение размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и 6 ГэВ, $\phi=30^\circ$, $\theta=0^\circ$

Как видно из рисунков, ситуация изменилась и при угле наклона $\phi=30^\circ$, чаще возникают большие кластеры для частиц с энергией в 6 ГэВ.

С увеличением угла зависимость становится сложнее и выявить конкретных закономерностей на данном этапе исследования не представляется возможным.

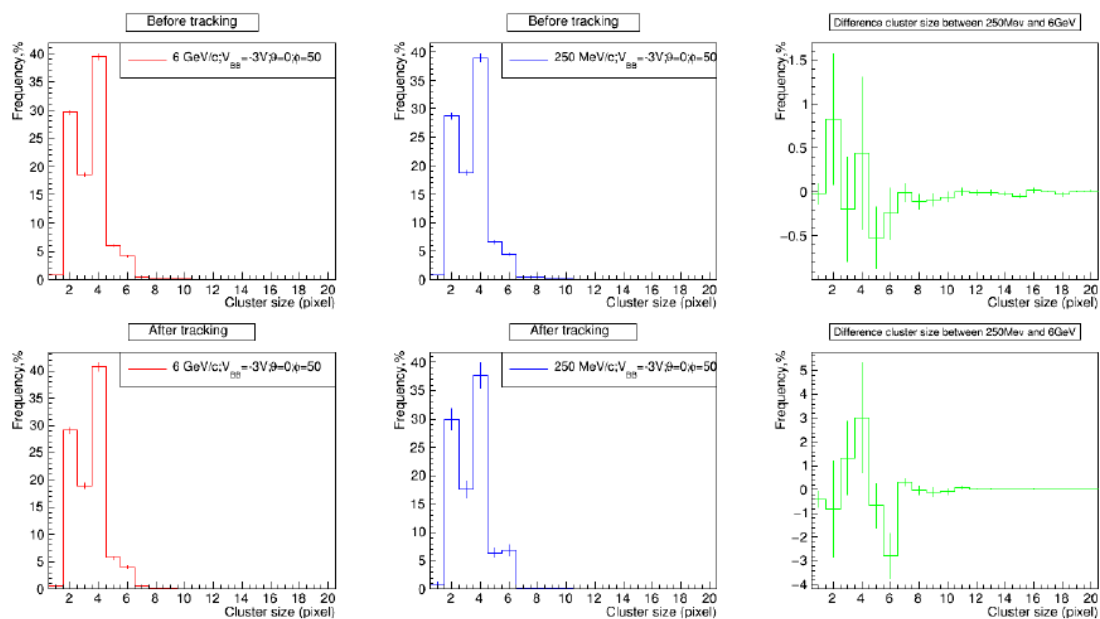


Рисунок 24– Сравнение размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и 6 ГэВ, $\varphi=50^\circ$, $\theta=0^\circ$

2.1.3.3 Сравнение размеров кластеров для частиц с различными углами.

Результаты сравнения размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ и углами наклона в $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=30^\circ$ представлено на рисунке ниже.

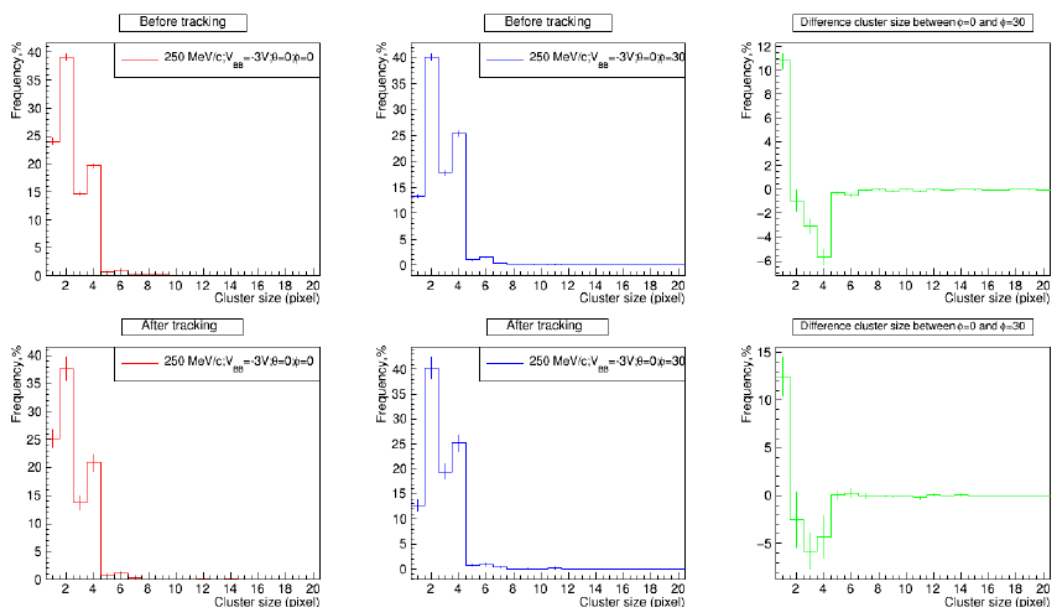


Рисунок 25– Сравнение размеров кластеров для частиц с энергией 250 МэВ, $\varphi=30^\circ$ и $\varphi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$

С увеличением угла наклона заметно увеличение числа кластеров размером больше 2, что подтверждается ожиданиями.

Если построить подобную гистограмму для частиц с энергией 6 ГэВ и сравнить их результаты на примере гистограммы после трекинга, то можно получить следующий график:

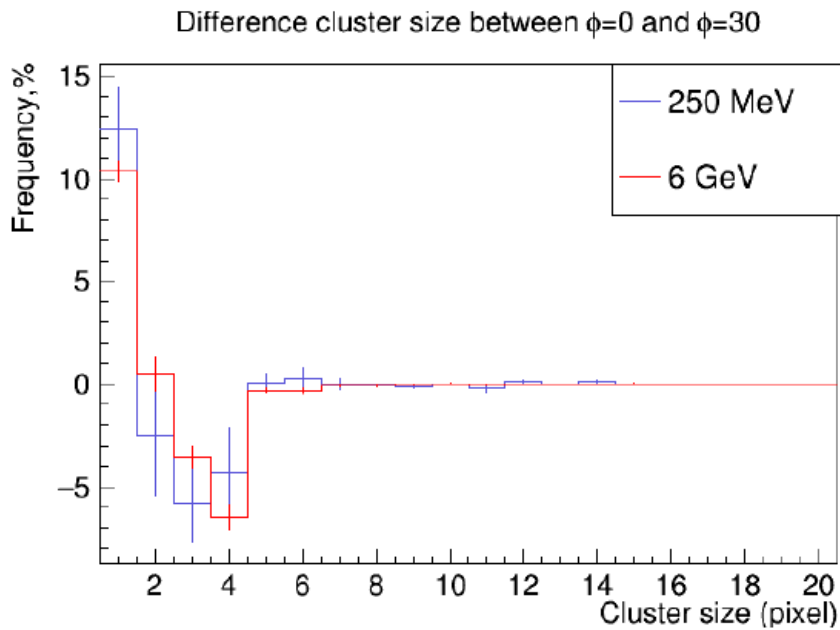


Рисунок 25– Результаты сравнения размеров кластеров для частиц с $\phi=30^\circ$ и $\phi=0^\circ$, $\theta=0^\circ$ с энергиями 250 МэВ vs 6 ГэВ

Согласно данному графику можно сделать вывод, что зависимости между углами размером кластеров и энергиями частиц не наблюдается.

Заключение

В ходе прохождения преддипломной практики было выполнено:

- Произведено сравнение размеров и форм кластеров для различных углов отклонения и энергий для необлученного чипа. Результаты представлены на внутренней конференции симуляционной группы ITS ALICE.
- На основе .RAW данных получены первые гистограммы зависимости размера кластера от точки столкновения
- Произведен перекрестный анализ результатов тестов облученного чипа. Результат представлен в CERN.
- Написана первая версия драйвера для управления экспериментальной установки по облучению исследуемых объектов на циклотроне U-120M

В качестве будущих задач рассматривается:

- Дальнейшее изучение фреймворка EU Telescope
- Модификация драйвера для экспериментальной установки
- Исследование размеров и форм кластеров для облученных чипов

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Алгоритм обработки данных в EUTElescope

