МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Київський національний університет імені Тараса Шевченка Фізичний факультет Кафедра ядерної фізики та високих енергій

На правах рукопису

Дослідження прототипів детекторних модулів Кремнієвої Трекерної Системи Експерименту СВМ

Галузь знань: 10 Природничі науки Спеціальність: 104 Фізика та астрономія Освітня програма: Фізика високих енергій

Кваліфікаційна робота магістра

студента 2 року навчання Олександра КШИВАНСЬКОГО

Науковий керівник: кандидат фіз.-мат. наук, Максим ТЕКЛІШИН

Робота заслухана на засіданні кафедри <u>ядерної фізики та високих енергій</u> та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № 15 від 19.05..... 2022 р.

Завідувач кафедри

*Ки*їв – 2022

Ігор КАДЕНКО

ВИТЯГ

з протоколу №_____

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент Олександр Кшиванський виконав та захистив кваліфікаційну роботу магістра з оцінкою _____.

Голова ЕК ______ 2022 р.

АНОТАЦІЯ

Олександр КШИВАНСЬКИЙ. Дослідження прототипів детекторних модулів Кремнієвої Трекерної Системи експерименту СВМ.

Кваліфікаційна робота магістра, спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Фізика високих енергій». — Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики та високих енергій. — Київ - 2022.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук Максим ТЕКЛІШИН, науковий співробітник ВФВЕ ІЯД НАН України, координатор робіт колаборації СВМ з конструювання та оцінці якості детекторних модулів КТС, GSI Гельмгольц-центр дослідження важких іонів (Німеччина).

Використовуючи процедуру амплітудно-зарядового скану та тестовий детекторний модуль у лабораторії робочої групи Кремнієвої Трекерної Системи (КТС) експерименту СВМ, було розроблено алгоритм для визначення ширини базової лінії та інших характеристик модулів КТС, оптимізовано процедуру набору тестових даних, досліджено функціонування детекторних модулів КТС залежно від схеми контуру зворотного зв'язку, визначено можливі шляхи покращення модулів.

Ключові слова: експеримент СВМ, кремнієві мікростріпові детектори, кремнієва трекерна система, зчитувальна електроніка.

SUMMARY

Oleksandr Kshyvanskyi. Evaluation of the prototypes of the detector modules for the CBM Silicon Tracking System.

Master's qualification in specialty 104 Physics and astronomy, program «High energy physics». — Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear and High Energy Physics. — Kyiv - 2022.

Research supervisor: Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Dr. Maksym TEKLISHYN, research assistance at the HEP department at KINR of NAS of Ukraine, research assistance responsible for the Silicon Tracking System integration at the CBM group at, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (Germany).

Using charge-amplitude pulse scan procedure and test module at the laboratory of the Silicon Tracker System (STS) working group of the CBM experiment, an algorithm to determine the baseline width and other characteristics of STS modules was developed, optimized return path circuit configuration, ways to improve the modules were suggested.

Key words: CBM experiment, silicon microstrip detectors, silicon tracking system, front-end electronics.

Зміст

ВСТУП	6
1 ЯДЕРНА МЕТЕРІЯ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ	9
1.1 Стандартна Модель	9
1.2 FAIR	11
1.3 Експеримент СВМ	12
2 КРЕМНІЄВА ТРЕКЕРНА СИСТЕМА	15
2.1 Дизайн детекторної установки	15
2.2 Детекторні модулі STS	17
2.3 Система зчитування	20
2.3.1 Зчитувальна електроніка	20
2.4 Амплітудно-зарядовий скан та Test Box	22
3 ОЦІНКА РІВНЯ ШУМУ	24
3.1 Порогові криві модулів STS	24
3.1.1 Процедура апроксимації	24
3.1.2 Винятки для порогових кривих	
3.2 Загальний шум каналів FEB	
3.2.1 Розрахунок середнього значення о	
3.2.2 Шум у парних та непарних каналах	
3.2.3 Фінальне значення σ	
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ Р-СКАНУ	36
5 КОНФІГУРАЦІЯ КОНТУРУ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ	38
5.1 Дослідження впливу опору резисторів	40
5.2 Дослідження впливу ємності конденсаторів	41
РЕЗУЛЬТАТИ	44
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	45
ПОДЯКИ	46
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	47

ВСТУП

Актуальність теми. Впродовж останніх років світовою ядерно-фізичною спільнотою було докладено значних зусиль для дослідження фазової діаграми взаємодіючої речовини [1]. Область високих температур було сильно експериментально досліджено в експериментах на прискорювачах RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) [2] Ta LHC (Large Hadron Collider) [3] 3 використанням релятивіських зіткнень важких іонів [4, 5]. В таких експериментальних умовах енергія зіткнення розподіляється майже порівну поміж баріонами та антибаріонами. Подібні умови існували у ранньому Всесвіті через кілька мікросекунд після Великого вибуху. Дослідження властивостей, рівняння стану та ступенів свободи щільної баріонної матерії високої густини становить фундаментальний інтерес для нашого розуміння астрофізичних об'єктів, таких як нейтронні зірки, та подій злиття нейтронних зірок [6, 7]. Згідно з модельними розрахунками, зіткнення важких іонів при помірних енергіях пучка створюють необхідні умови для утворення та дослідження в лабораторних умовах сильно взаємодіючої речовини при високих баріонних густинах.

Експеримет CBM (Compressed Baryonic Matter) у FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) [8] розроблений для роботи при високих частотах взаємодії йонів пучка з мішенню (до 10 МГц) і здатний реєструвати рідкісні процеси з високою точністю [9]. Експеримент CBM буде використовувати пучки різноманітних важких та легких йонів, зокрема пучки йонів золота з енергією 2 -11 ГеВ на нуклон. Всебічне вивчення фазової діаграми при високих баріонних густинах є основою фізичної програми експерименту CBM.

Кремнієва Трекерна Система - Silicon Tracking System (STS) головний трекерний детектор експерименту СВМ. Його основним завданням є реконструкція треків заряджених частинок (з ефективністю 95 % при $p \ge 1 \ \Gamma eB/c$) та визначення їхніх імпульсів з високою точністю (похибка значення імпульсу 1.5% при $p \ge 1 \ \Gamma eB/c$). Такі технічні вимоги необхідні для успішної реконструкції

продуктів реакції, що нас цікавлять. Щоб відповідати цим вимогам, STS має забезпечити високу ефективність реконструкції точок взаємодії (близьку до 100%) і високу просторову роздільну здатність (≤ 20 мкм), що призводить до необхідності побудови детектора з великою просторовою концентрацією каналів. Для вимірювання імпульсу зарядженої частинки необхідна наявність сильного магнітного поля, оскільки кривизна траєкторії частинки обернено пропорційна імпульсу. Необхідність високої роздільної здатності за імпульсом вимагає малої кількості матеріалу в чутливому об'ємі детектора для уникнення багатократного розсіяння частинок. Щоб відповідати вимогам експерименту, STS має працювати при високій густині заряджених частинок в об'ємі детектору (до 700 заряджених частинок на одне центральне Au+Au зіткнення).

Детекторний модуль STS - головна функціональна складова STS. Основні елементи модуля: кремнієвий двосторонній сенсор (1024 стріпи на кожній стороні), зчитувальна електроніка переднього краю - FEB (front-end board) на кожній стороні, вміщує вісім ASIC (applicationspecific integrated circuit), що підключені до стріпів кремнієвого сенсору через надтонкі алюмінієво-поліімідні мікрокабелі. Ефективність роботи цих модулів визначає загальну ефективність STS, а отже – усього експерименту.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження прототипів детекторних модулів STS експерименту CBM, зокрема ширини базової лінії, за різних умов, включаючи різні схеми ліній низької та високої напруги та топології контуру зворотного зв'язку.

Для досягнення поставленої мети, було необхідно виконати ряд завдань: ознайомитись з публікаціями за темою; набути навичок роботи з системою отримання даних STS; розробити алгоритм для визначення ширини базової лінії тестових модулів з урахуванням усіх можливих паразитних ефектів у електроніці та феноменів, що спотворюють форму порогової кривої; набути навичок роботи з електронікою для варіації компонентів контуру зворотного зв'язку; дослідити

залежність ширини базової лінії тестових модулів від значення параметрів компонентів контуру зворотного зв'язку.

Джерела дослідження. З-поміж наукової літератури, пов'язаної з кремнієвими мікростріповими сенсорами, автором було досліджено відповідні статті та дисертації. Експериментальні дані були отримані безпосередньо автором з використанням тестових модулів у лабораторії групи STS.

Наукова новизна одержаних результатів. Представлено найбільш точні та нові результати оцінки рівня шуму тестових модулів STS за допомогою покращеного алгоритму оцінки характеристик тестових модулів, досліджено залежність рівня шуму від конфігурації контуру зворотного зв'язку, виявлено раніше невідомі недоліки тестових модулів та запропоновано шляхи їх виправлення. Також запропоновано порядок подальших тестувань модулів STS.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати є важливим внеском для подальшого покращення характеристик модулів STS. Розроблені алгоритми надалі використовуються членами групи STS для визначення характеристик тестових модулів та будуть модернізовані та реалізовані як частина програмного забезпечення STS.

Апробація результатів магістерської. Результати магістерської роботи доповідались на наступних наукових зібраннях:

- 1. Наукові семінари групи STS експерименту CBM 8 жовтня, 8 листопада 2021р.
- Щорічна конференція Німецького Фізичного Товариства, секрція адронної та ядерної фізики, "The powering scheme of the CBM Silicon Tracking System" Майнц, Німеччина, 31 березня 2022р.
- 3. XXIX Міжнародна конференція з ультрарелятивістських ядро-ядерних peakцій, постер «The powering scheme of the CBM Silicon Tracking System: concept and first implementations», Краків, Польща, 4-10 квітня 2022р.

1 ЯДЕРНА МЕТЕРІЯ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ



1.1 Стандартна Модель

Рис. 1.1: Елементарні частинки Стандартної Моделі.

Стандартна модель, розроблена на початку 1970-х років, на даний момент є найбільш успішною теорією елементарних частинок та їхніх взаємодій. Вона описує майже всі експериментальні результати і точно передбачила широкий спектр явищ. Вона підтверджується численним експериментам та утверджена як добре перевірена теорія.

Стандартна Модель включає сімнадцять частинок (Рис. 1.1). Ферміони вважаються елементарними складовими матерії, а бозони - посередниками взаємодії. Ферміони підпорядковані статистиці Фермі-Дірака і слідують принципу невизначенності Паулі. Ці частинки мають два різні підтипи - кварки та лептони. Кожний підтип складається з шести частинок, які поділяються на пари, або «покоління». Найлегші та найстабільніші частинки складають перше покоління, а більш важкі та менш стабільні частинки належать до другого та третього поколінь. Вся стабільна матерія у Всесвіті складається з частинок, що належать до першого покоління; будь-яка більш важка частинка швидко розпадається на більш стабільну.

Три фундаментальні сили, що діють у Всесвіті, є результатом обміну частинками-носіями відповідної сили. Кожна фундаментальна сила має свій відповідний бозон: електромагнітна сила - фотон, слабка взаємодія - W i Z бозони, сильна взаємодія - глюон. Квантово-механічний заряд, що відповідає за сильну взаємодію, є колір, що має три можливі значення: червоний, синій та зелений. Кварки утворюють кольоровий триплет, набуваючи визначеного значення кольору (кварки) чи антикольору (антикварки), тоді як глюони формують октет і синглет, тобто являють собою суміш кольору та антикольору відповідно до комбінації представлених матрицями Гелл-Манна. Сильна взаємодія між кварками переноситься глюонами, що несуть дискретний кольоровий заряд, тому сильна взаємодія може змінити колір взаємодіючих кварків лише на дискретну Вищезгадані взаємолії Квантової величину. пояснюються В рамках Хромодинаміки (КХД).

Існує два фундаментально важливих явища, пов'язаних із КХД. Перше конфайнмент, що відповідає експериментальному спостереженню, що кварки та антикварки не спостерігаються у вільному стані. Друге - асимптотична свобода, тобто взаємодія слабшає із зростанням відносного імпульсу взаємодії. Зі збільшенням відстані між кварками збільшується їхня енергія, що не дозволяє відокремлювати кварки від адронів. Розрахунки ґраткової КХД передбачили, що, за певних умов, утримання кварків в адронах зникає і виникає новий стан речовини - кварк-глюона плазма (КГП). Кварки і глюони можуть вільно переміщуватися в області існування КГП на масштабах, більших за розміри адронів (~10⁻¹⁵ м). За подібних екстремальних умов, у наш час, ядерна речовина може існувати усередині компактних зоряних об'єктів, таких як нейтронні зорі.

В лабораторних умовах КГП може існувати лише упродовж короткого періоду часу (~10⁻²³ с), як проміжний стан при зіткненні важких іонів і тому не

може бути дослідженою безпосередньо. Існування КГП має наслідки для динаміки середовища та для кінцевих спектрів частинок. Можливими ознаками КГП є аномалії потоку [10, 11], придушення виходу J/ψ [12], гасіння джетів [13] та варіації утворення дивних частинок [14]. Все це непрямі ознаки, на які впливають взаємодії в адронному середовищі. Важливими сигналами є електромагнітні зонди на кшталт фотонного та дилептонного випромінювання, оскільки вони не підвладні сильній взаємодії в адронному середовищі і залишають область зіткнення з мінімальним розсіянням [15, 16]. Експерименти з дослідження зіткнень важких іонів при релятивістських енергіях створюють екстремальні стани сильно взаємодіючої матерії і дозволяють досліджувати їх у лабораторних умовах.

1.2 FAIR

Міжнародний центр з досліджень іонів та антипротонів - international Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) у Дармштадті створить унікальні можливості для досліджень у галузі ядерної, адронної, атомної та фізики плазми [8, 17]. Синхротрон для важких іонів SIS100 є головною компонентою прискорювача FAIR. Прискорювальний тунель має загальну довжину 1084 метри і будується з розрахунком на майбутнє розміщення в ньому додаткового синхротрона SIS300. Різниця між двома синхротронами полягає в їх магнітній жорсткості (100 Тл-м та 300 Тл-м відповідно), що дозволятиме збільшити кінетичну енергію пучків приблизно втричі із SIS300.

FAIR стане одним із найбільших і найскладніших прискорювальних дослідницьких об'єктів у світі. Він матиме унікальну здатність створювати пучки з усіх хімічних елементів (або їхніх іонів), а також антипротонів. Ці пучки будуть використані у широкій області досліджень у чотирьох колабораціях: APPA (Atomic, Plasma and Applications), CBM, NuSTAR (Nuclear STructure, Astrophysics and Reactions) і PANDA (anti-Proton ANihilation at DArmstadt). Рисунок 1.2 ілюструє існуючі (сині) та майбутні (червоні) об'єкти FAIR. Існуючі

прискорювачі GSI будуть використані для першого етапу прискорення перед синхротронам SIS100/300. Фізична програма присвячена дослідженню стисненої баріонної речовини, розпочнеться з отримання первинних пучків від SIS100 [18]. Максимальна енергія SIS100 становитиме до 29 ГеВ для протонів і до 11 ГеВ на нуклон для іонів Au. Очікується, що інтенсивність пучка становитиме до 109 іонів в секунду, що призведе до 107 взаємодій в секунду.



Рис. 1.2: FAIR. Синіми лініями зображено вже існуючі GSI об'єкти, новий прискорювальний комплекс зображено червоними лініями. Синхротрон SIS100 (або SIS300) забезпечить іонні пучки для експерименту CBM [8].

1.3 Експеримент СВМ

Експеримент CBM (Compressed Baryonic Matter) - це експеримент нового покоління, що буде оперувати на базі дослідницького центру FAIR, що буде побудовано в Дармштадті, Німеччина [8]. Наразі експеримент розробляється в рамках міжнародної співпраці між інститутами Німеччини, Індії, Румунії, Польщі, України та інших країн [18]. Експеримент CBM має одну з найрізноманітніших і провідних дослідницьких програм у галузі фізики важких

іонів. Його мета - дослідити фазову діаграму сильно взаємодіючої речовини в області високої густини баріонної матерії та помірних температур із застосуванням високоенергетичних ядро-ядерних зіткнень. Ключовою особливістю СВМ є його дуже висока частота взаємодій пучка з мішенню (до 10МГц), що на кілька порядків перевищує показники сучасних колайдерних експериментів [19]. Детектор СВМ складатиметься з переднього спектрометра з фіксованою мішенню без апаратної системи відбору даних (hardware-triggered readout); замість цього буде реалізована нова концепція вільно потокової передачі (free-streaming) та онлайн-реконструкції [19].

Потік даних для експерименту при Au+Au зіткненнях становитиме приблизно 2 ТБ/с. Через значну кількість даних, що генеруватимуться детекторною установкою, алгоритми реконструкції та відбори подій будуть виконуватися в режимі реального часу, щоб зменшити кількість збережених даних на два порядки.



Рис. 1.3: Експериментальні установки СВМ (ліворуч) та HADES (праворуч).

Детектор СВМ був розроблений як багатоцільова дослідницька установка, що здатна реєструвати адрони, електрони та мюони в протон-протонних, протонядерних та ядро-ядерних зіткненнях у повному діапазоні енергій пучка FAIR. Експеримент має апертуру чутливого об'єму від 2.5° до 25°, щоб охопити середні та передні значення швидкісности для симетричних зіткнень. Детектор СВМ складається з наступних підсистем:

- Дипольний магніт для визначення імпульсу [20];
- Micro Vertex Detector (MVD) для детектування первинних вершин, топологій розпаду короткоживучих частинок та частинок з низьким імпульсом;
- Silicon Tracking System (STS) для відтворення треків заряджених частинок та визначення їхніх імпульсів;
- Ring Imaging Cherenkov detector (RICH) для розділення електронів та піонів;
- Muon Chamber (MUCH) для ідентифікації мюонів та реконструкції треків;
- Transition Radiation Detector (TRD) для відсіювання піонів та реконструкції треків;
- Time-of-Flight (TOF) для ідентифікації адронів;
- Projectile Spectator Detector (PSD) для визначення центральності зіткнення та площини подій.

Детекторна установка CBM має два рижими роботи:: перший оптимізований для ідентифікації електронів, другий для ідентифікації мюонів. У першому будуть задіяні всі підсистеми, крім МUCH. При мюонній конфігурації детектор RICH буде замінено на MUCH. Схематичний вигляд концепції установки детектора CBM та HADES зображено на Рисунку 1.3.

2 ΚΡΕΜΗΙЄΒΑ ΤΡΕΚΕΡΗΑ СИСТЕМА

2.1 Дизайн детекторної установки

Кремнієва Трекерна Система - Silicon Tracking System (STS) є головним трекерним детектором експерименту CBM. Його головна задача - реконструкція треків заряджених частинок з високою ефективністю до 95% при р $\geq 1\Gamma$ eB/c та визначення їх імпульсів з роздільною здатністю до 1.5% при р $\geq 1\Gamma$ eB/c. STS складається з 876-ти двосторонніх кремнієвих мікростріпових сенсорів, зібраних у 8 трекерних станцій.

Система, як зображено на Рисунку 2.1, розміщена на відстані від 30 см до 100 см за мішенню, всередині надпровідного магнітного диполя з інтегралом індуктивності 1 Тл-м [21]. Деякі з найважливіших вимог, які слід враховувати при проектуванні системи, перераховані нижче:

- Установка займає об'єм приблизно 1.4 × 2.3 × 1.3 м³ всередині дипольного магніта;
- Детектор має бути спроможним реєструвати до 700 частинок на центральне зіткнення Au+Au із частотою взаємодії пучка з мішенню до 10 МГц;
- Оскільки на роздільну здатність визначення імпульсу сильно впливає багатократне розсіювання, кількість матеріалу в чутливому об'ємі STS має бути якомога меншою;
- Система потребує радіаційно-стійких кремнієвих сенсорів, здатних витримувати загальний потік до 10¹⁴ n_{eq} см⁻² під час роботи прискорювача SIS100;
- Сенсори будуть зчитуватися за допомогою швидкої та зчитувальної електроніки із самозапуском (FEE), яка повинна підтримувати надійну роботу в радіаційно агресивному середовищі (до 100 крад/рік);
- Ефективна система охолодження, здатна відводити до 50 кВт тепла зсередини детекторного блоку.



Рис. 2.1: Концепція дизайну STS: вісім трекерних станцій розташованих всередині дипольного магніта.

Щоб мінімізувати багатократне кулонівське розсіювання продуктів реакції і досягти точного вимірювання імпульсу, STS-трекер повинен мати низьку кількість матеріалу, приблизно $[0.3 \div 1.5]$ % X₀ на трекерну станцію. Передня зчитувальна електроніка розміщена на периферії детектора, поза межами чутливого об'єму. Детекторні модулі розміщуються на легких опорних конструкціях виготовлених з вуглецевого волокна [22]. Непідсилені аналогові сигнали від сенсорів передаються до передньої електроніки за допомогою надлегких мікрокабелів.

STS Детекторна система буде герметичному, встановлена В світлонепроникному, термоізольованому корпусі, забраного із профілей та багатошарових панелей із вуглецевого волокна. Корпус буде встановлено всередину дипольного магніту. Він є опорною конструкцією для STS і MVD детекторів, а також для мішені та іонопровода. Під час роботи детекторною системою буде розсіюватись теплова потужність близько 50 кВт. Найбільший внесок (приблизно 40 кВт) мають передня та зчитувальна електроніка, тоді як решта В основному утворюється низьковольтними кабелями живлення, теплопередачею через стіни корпусу STS та, малою мірою, сенсорами (приблизно

6 мВт/см²) [21]. Підвищення робочої температури призводить до збільшення струму витоку детектора. Це впливає на дробовий шум, що пропорційний струму витоку детектора. Крім того, струм витоку детектора зростає із опроміненням. Таким чином, надлишок тепла може викликати неконтрольоване лавиноподібне розігрівання нагрівання всього детектора [23].

Система охолодження забезпечує роботу сенсорів при температурі не вище за -10°С. Оскільки теплообмін усередині чутливого об'єму має здійснюватися з мінімальною кількістю матеріалу, це спонукає до використання конвекції газу в об'ємі STS для охолодження сенсорів. У той же час вологість повітря повинна бути низькою, щоб уникнути утворення конденсату та льоду на охолоджуваних поверхнях. Для охолодження електроніки обрано рідинну систему на основі охолоджуючої рідини NOVEC [21].

2.2 Детекторні модулі STS

Детекторний модуль - головна функціональна складова STS. Він складається з двостороннього кремнієвого сенсора із подвійною металізацією; товщина сенсору 320 мкм, він підключений до двох плат зчитувальної електроніки (Front-end board, FEB) надтонкими алюмінієво-поліімідними мікрокабелями (Рис. 2.2). Кожна сторона сенсора має 1024 стріпи та підключена до FEB, що містить 8 спеціально розроблених аналогових мікросхем специфічного застосування (Application-specific integrated circuit, ASIC). Групи зі 128 стріпів приєднані до пари мікрокабелів, що передають аналогові сигнали до електроніки переднього краю [21].

Детекторні модулі будуть виготовлятися з різними форм-факторами (розмірами сенсорів і довжиною мікрокабелів) відповідно до їхнього розташування у кінцевій детекторній збірці (Рис. 2.3). Всього 876 модулів, встановлених на 106 вуглецевого-волоконних драбин, заповнюватимуть 8 трекерних станцій. Кремнієві мікростріпові сенсори успішно використовувалися в багатьох великих експериментах з дослідження фізики елементарних частинок [24, 25]. Сенсорна технологія, що використовується в STS, була обрана для оптимізації роботи детектора з точки зору ефективності реконструкції треків, вимог до швидкодії детектора та кількості матеріалу в чутливому об'ємі детектора. Також необхідно враховувати вимоги щодо хорошої роздільної здатності за імпульсом та вимоги узгодження треків із MVD, RICH та MUCH. Двосторонні мікростріпові сенсори мають перевагу (проекційного) визначення положення точок взаємодії вдвічі меншою кількістю кремнію порівняно із односторонніми сенсорами [21]. Стріпи на п-стороні сенсора розташовані під прямим кутом відносно країв сенсора, тоді як на р-стороні стріпи повернуті на 7.5°. Це дозволяє знизити кількість «примарних» точок взаємодії та водночас забезпечує достатню роздільну здатність у напрямку вздовж стріпу. Кут 7.5° призводить до появи коротших стріпів на краях сенсора. Стріпи короткої довжини з'єднуються між собою за допомогою другого шару металізації на сенсорі [26].

Сенсори виготовляються на пластинах n-типу товщиною 320 мкм компанією Hamamatsu Photonics К.К. Кожна сторона сенсора має 1024 стріпи розташовані з кроком 58 мкм. Сенсори були розроблені на загальній базі для чотирьох різних довжинах стріпів, відповідно до потоку частинок в області детектора STS, де вони розташовані. Мікрокабелі малої маси використовуються для передачі сигналів від сенсорів до зчитувальної електроніки, яка монтується на периферії детектора. Мікрокабелі з двох боків захищені екрануючим шаром, щоб зменшити вплив електромагнітних наводок на сигнали в чутливій зчитувальній електроніці. Для передачі сигналу використовуються два шари мікрокабелів з алюмінієвими стріпами, розташованих з кроком 116 мкм. Вони розділені сітчастою прокладкою, щоб зменшити паразитну міжшарову ємність.



Рис. 2.2: Детекторний модуль STS. Він складається з двостороннього кремнієвого сенсора, підключеного за допомогою двох груп з 8 мікрокабелів до двох FEB.



Рис. 2.3: СВМ06 кремнієві сенсори для трекерної системи. Сенсори були виготовлені з однаковою шириною 6.2 см і чотирма різними довжинами стріпів (2.2 см, 4.2 см, 6.2 см та 12.4 см), що відповідають щільності треків у відповідній області детектора STS.



Рис. 2.4: Прототип конструкції FEB-8 для зчитування 1024 каналів кремнієвих сенсорів.

2.3 Система зчитування

Система зчитування STS має забезпечувати функціонування систем контролю та зчитування, що необхідні системі, а також достатню пропускну здатність для збереження всієї відповідної інформації. Високі частоти взаємодії, необхідні для виконання програми експерименту CBM, ставлять високі вимоги до продуктивність детектора та можливості системи збору даних (DAQ). Основними компонентами системи зчитування є:

- Плата зчитувальної електроніки front-end board (FEB) з 8 зчитувальними ASIC, що підключені до стріпових сенсорів. ASIC має у своєму складі аналоговий інтерфейс, цифровий перетворювач сигналу та генератор індивідуальних точок взаємодії з амплітудною інформацією про АЦП та часовими мітками. Вони забезпечують електричний інтерфейс до зчитування [27];
- Зчитувальна плата readout board (ROB) для отримання даних з кількох FEB та оптичного інтерфейсу зчитування для передачі даних із детектора [28];
- Загальний інтерфейс зчитування common readout interface (CRI) для попередньої обробки даних, розподілу часу та інтерфейсу для повільного та швидкого керування. CRI також слугує інтерфейсом для обчислювальної ферми, відповідальної за збір даних експерименту CBM та відбір подій;
- Селектор подій першого рівня first level event selector (FLES), відповідальний за побудову часових фрагментів, повну реконструкцію подій та онлайн відбір подій.

2.3.1 Зчитувальна електроніка

Зчитування сигналу з кремнієвих сенсорів здійснюватиметься спеціально розробленими ASIC STS-XYTERv.2.2 (Рис. 2.5). Чіпи змонтовані на спеціально надрукованих платах, що забезпечують їх живленням та цифровим комунікаційним інтерфейсом. Надтонкі мікрокабелі з'єднують зчитувальні стріпи до підсилювачів першого каскаду. STS-XYTER розрізняють і оцифровують

сигнали на кожному сенсорному стріпі та серіалізують оцифровані дані. Передбачається, що FEB (Рис. 2.4) будуть розташовані на периферії чутливого об'єму поза межами чутливого об'єму детектора; таке розміщення обмежить радіаційну дозу, отриману електронікою, до 100 крад/рік [21]; але, зокрема, у зв'язку з порушеннями в одиничних подіях, чіп також повинен мати радіаційно стійку архітектуру. Для різних областей детектора очікується різна частота взаємодії частинок з сенсорами. Щоб забезпечити достатню пропускну здатність, кожен ASIC може забезпечувати 1, 2 або 5 каналів зчитування зі швидкістю 320 Мбіт/с залежно від очікуваного локального навантаження. Це означає реалізацію до 5 інтерфейсів LVDS (Low Voltage Differential Signal) на друкованій платі для кожної ASIC. Усі Е-лінки будуть підключені до змінного струму, щоб дозволити підключення одного ROB до кількох FEB, які працюють на потенціалі зміщення відповідної сторони сенсора. Чіп містить 128 аналогових каналів з електричними схемами для вимірювання часу та амплітуди сигналу. На Рисунку 5.1 зображено еквівалент детекторної схеми для двох стріпів STS-XYTERv2. Два додаткових тестових канали на периферії ASIC забезпечені буферизованими виходами для внутрішніх сигналів. ASIC мають регістрові конфігурації, що визначаються користувачем, загальні блоки зміщення та схеми калібрування [29, 30].



Рис. 2.5: Спрощена схема ASIC STS-XYTERv2 (ліворуч) та схема під мікроскопом після з'єднання каналів (праворуч).

2.4 Амплітудно-зарядовий скан та Test Box

Амплітудно-зарядовий скан (р-скан) є ключовою процедурою для характеризації амплітудного відгуку детекторних модулів STS. Зокрема, вона надає інформацію про крутизну характеристики АЦП, ширину базової лінії та кількість відключених або несправних каналів. Під час р-сканування зарядові імпульси моделюються внутрішнім генератором імпульсів у STS-XYTER (замість отримання сигналів від кремнієвих сенсорів). Вхідний тестовий сигнал обробляється аналоговим входом ASIC і порівнюється з певним порогом компаратора швидкого каналу або набором компараторів флеш-АЦП у повільному каналі. Процедура повторюється ітераційно з поступовим збільшенням амплітуди тестового сигналу. Результатом є кількість імпульсів, зареєстрованих у певних буферах компаратора, відповідно до амплітуди сигналу для конкретного каналу. Під час повністю зібраного модуля, результатом процедури р-сканування є 16 «.txt» файлів (по одному для кожного STS-XYTER, 8 STS-XYTER на кожній стороні - N та P). Вихідні файли містять сигнали для групи вибраних (активованих) компараторів (для зручності та оптимізації ми обмежуємо вимірювання 4 компараторами АЦП + 1 FAST дискримінатором) для всіх 128 каналів у вибраному діапазоні імпульсів напруги (VP) (зазвичай 0÷149 одиниць імпульсного інжектора) з вибраним VP кроком (зазвичай 1 або 2).

Для поточного етапу дослідження та розробки детекторних модулів у лабораторії STS було зібрано Test Box (Рис. 2.6). Test Box - це заземлений алюмінієвий корпус, основними компонентами якого є:

- Один тестовий модуль детектора STS з алюмінієвим поліімідним екрануванням над мікрокабелем;
- Система водяного охолодження;
- Інтерфейси високої та низької напруги та два кабелі для передачі даних від FEB до CROB.



Рис. 2.6: Test Box (згори - робоче положення) містить один детекторний модуль STS (знизу) для тестування.

З ОЦІНКА РІВНЯ ШУМУ

Низький рівень шуму у детекторних модулях STS є важливою характеристикою для забезпечення оптимального відношення сигналу до шуму, враховуючи відносно низькі амплітуди сигналів в індивідуальних каналах детекторних модулів ($\simeq 23 \times 10^3$ е для мінімальної іонізуючої частинки, що перпендикулярно перетинає сенсор, де е - електричний заряд електрону). Оптимальна експлуатація детекторних модулів КTC очікується при рівнях шуму порядку 10^3 е.

Для оцінки рівня термального шуму в сигнальному контурі окремих каналів детекторних модулів КТС була розроблена спеціальна процедура, що буде детально описана в цьому розділі. Вихідні дані р-сканування (від puls calibration threshold scan) використовуються як відправна точка. Кожен канал модуля обробляється окремо, щоб визначити ширину його базової лінії.

Усі подальші дослідження було виконано з використанням кремнієвого сенсора розміром 6.2×6.2 см².

3.1 Порогові криві модулів STS

Використовуючи вихідні файли р-сканування, можна побудувати функцію відгуку компаратора (також відому як s-крива через типову форму залежності амплітуди сигнал-заряд) для кожного каналу (всього 128 для кожного ASIC) для кожного компаратора. Метод s-кривої використовується для визначення порогу для вхідного сигналу.

3.1.1 Процедура апроксимації

Передбачається, що сума компонентів шуму модуля (зокрема, теплового шуму детектора та схеми зчитування) має розподіл Гаусса. Таким чином, амплітудна характеристика введеного випробувального заряду демонструє ступінчасту поведінку з розмитим краєм в області, де амплітуда випробування досягає порогу дискримінатора. Це можна описати формулою:

$$F(x) = \frac{A}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{(x-\mu)}{\sigma \cdot \sqrt{2}} + 1\right)$$
(3.1)

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$
 (3.2)

де x - значення VP (1 VP = 350 e), A - максимальна кількість імпульсів (100), μ точка перегину s-кривої для кожного каналу в розмірності VP, σ - ширина базової лінії в розмірності VP (рівень шуму в цьому каналі). Отримані s-криві апроксимуються з використання (3.1) для визначення σ для кожного каналу.

На Рисунку 3.1 (ліворуч) зображено s-криві для 128 каналів, де немає випадкових стрибків, шумних або неповних каналів. Більше того, всі канали мають подібну поведінку, що можна спостерігати для всіх s-кривих, що мають близькі кути нахилу. Найкращі результати апроксимації наведено на Рисунку 3.1 (праворуч). Кожна апроксимаційна крива чітко відтворює згенеровані дані та не спостерігається неадекватних параметрів апроксимації (криві з $\sigma < 0$). У цьому конкретному випадку всі канали мають подібні значення σ (~ [3.5±0.3] VP).



Рис. 3.1: Приклад s-кривих (ліворуч) та результату апроксимації (праворуч).

3.1.2 Винятки для порогових кривих

Форма порогової кривої, зображена на Рисунку 3.1, є найкращим випадком. Проте ми також маємо справу з винятковою поведінкою сканованого каналу. Існує

широкий спектр різних спотворень з унікальними причинами, на Рисунку 3.2 представлені деякі з них. Найбільш поширені спотворення:

- Нетипово шумні або некалібровані канали (Рис. 3.2а). Це один із найскладніших випадків: загальна поведінка - типова для s-кривої, але результуюче значення σ різко відрізняється від інших каналів. Немає простого способу їх ідентифікувати, якщо не накладати обмеження на значення σ, що може вплинути на загальну точність. Найкращим способом ідентифікувати та відкинути такі значення є використання медіани для визначення середнього значення рівня шуму для детектора (детальніше в розділі 3.2.1);
- Несподіваний пік (Рис 3.2б). Зазвичай така s-крива все ще може бути описано за існуючою моделлю апроксимації та не викликає істотних додаткових невизначеностей у фінальному значені рівня шуму детектора;
- Обрізані канали (Рис. 3.2в), що виникають через некоректно обраний діапазон VP під час генерації імпульсів. Є можливими два різні ефекти: σ<0 (Рис 3.2г), можна легко виявити та відкинути, або результуюче значення σ різко відрізняється від інших каналів подібно до некаліброваного каналу (мають те саме рішення, докладніше в Розділі 3.2.1). Таких ситуацій можна уникнути, збільшивши діапазон значень VP;
- Надзвичайно високий рівень шуму у каналах (Рис 3.2д) може бути викликаний різноманітними несправностями в зчитуванні каналу. Такі канали можуть випадковим чином демонструвати значення о близьке до типових величин даного модуля (Рис 3.2е). Поведінка таких каналів є сталою, тобто вона не змінюється від вимірювання до вимірювання. Щоб відкинути такі канали із результуючих даних, перевіряється, скільки разів вони перевищують максимально можливе значення кількості імпульсів.

Через кількість поширених проблем, що виникають при апроксимації s-кривих в ASIC та велику кількість зібраних даних, було визнано практичним запровадити

процедуру автоматичного відбору каналів та їх апроксимації. Процедура відбору використовується для виключення каналів із відомими проблемами. Процедура відбору відбувається за наступними етапами з визначенням критеріїв якості (також, у випадках низької статистичної чи необхідності роботи з проблемними каналами, процедуру можна відкоригувати, щоб використовувати менш суворі критерії якості):

- Площа s-кривої. Для кожного каналу розраховується площа під s-кривою.
 Якщо площа перевищує максимально допустиме значення, такий канал виключається. Виявилося, що це найефективніший спосіб позбутися шумних каналів (Рис. 3.2д);
- Точка перегину (значення μ). Значення μ є результатом процедури апроксимації. Воно не може виходити за межі вибраного діапазону значень VP. Якщо це так, такий канал буде виключено;
- Кількість точок каналу, що перевищують максимальне значення імпульсу (зазвичай від 2 до 4, конкретне значення можливо налаштувати вручну).
 При перевищені встановленої кількості таких точок, канал відхиляється. Це слугує додатковим критерієм відхилення шумних та некаліброваних каналів, випадкових піків та менш поширених явищ;
- Позитивне значення σ. Єдине обмеження, яке ми застосовуємо до значення σ
 це вимога його позитивності, оскільки негативне значення σ є нефізичним результатом (Рис. 3.2г). У більшості випадків цей критерій використовується для відсіювання обрізаних каналів (Рис. 3.2в);
- Статус апроксимації. Для процедури апроксимації використовується пакет програмний пакет MINUIT [31]. Статус результату апроксимації відповідного каналу має бути «CONVERGED», «OK» або «SUCCESSFUL».
 В іншому випадку канал відкидається;
- Усереднення значення о для повільних каналів. У разі роботи з повільними каналами нам потрібно знайти середній рівень шуму для кожного каналу за кількістю використаних повільних компараторів (зазвичай 4, тобто після

попереднього відбору, майже для кожного каналу, ми матимемо 4 різні значення σ). Середнє значення для таких каналів визначається як медіана, якщо принаймні в половині компараторів для даного каналу було отримано адекватне значення σ.



Рис. 3.2: Приклади типових проблем, які спостерігаються під час отримання sкривих в ASIC.

3.2 Загальний шум каналів FEB

Після отримання значення рівня шуму в кожному окремому каналі в кожному ASIC (128 каналів на ASIC, 8 ASIC на одній стороні, N та P сторони), ми можемо побудувати повну гістограму ширин базових ліній всіх 1024 каналів обраної передньої плати модуля (Рис. 3.3).

Для практичних цілей необхідно оцінити середнє значення рівня шуму для кожної сторони - N та P (також для повільних і швидких каналів окремо). Існує кілька способів оцінити середнє значення на основі набору індивідуальних вхідних даних. Ідея полягає в тому, щоб це число було репрезентативним, надійним і найменш чутливим до неочікуваних викидів. Нижче розглянуто кілька підходів для отримання такого значення.



Рис. 3.3: Повний FEB: 1024 каналів, 8 ASIC (128 каналів у кожному). Залежність рівня шуму у [e] від номеру каналу.

3.2.1 Розрахунок середнього значення σ

Розглянемо три наступні методи визначення середнього значення множини окремих значень: середнє арифметичне, середнє квадратичне та медіана.

Середнє арифметичне є широко застосовним прямим підходом; однак таке значення є чутливим до викидів. У випадку кількох викидів воно дає адекватну оцінку, але, як показано нижче, різко погіршується зі збільшенням кількості викидів. У деяких випадках кількість викидів може досягати 30% від загальної кількості каналів. Такими каналами слід знехтувати, керуючись критеріями відмінними від прямих обмежень на величину σ, щоб уникнути ситуації, коли ми вносимо систематичне зміщення в результуюче значення, відкидаючи невраховані ефекти.

Середнє квадратичне є природним вибором для процедури усереднення з урахуванням того, що дисперсія розподілу (σ^2) є адитивною величиною. Однак воно показує ще сильнішу залежність від значних викидів, що трапляються достатньо часто, викликані аномально шумними каналами. На Рисунку 3.4 наведено яскравий приклад такої нестабільності.

Медіана масиву значень обчислюється шляхом сортування його від мінімального до максимального елемента та вибору елемента в середині (або у випадку парної кількості елементів середнє арифметичне двох елементів у середині масиву). Такий спосіб визначення середнього значення гарантує, що всі низькі та високі значення, які пройшли попередній відбір, будь поза зоною чутливості методу. Це властивість, якої не вистачало попередніми критеріям відбору у Розділі 3.1.2.



Рис. 3.4: Повний FEB: Різниця між середнім квадратичним (червона лінія) та медіаною (синя лінія) у разі значної кількості викидів (тут - піки в 7му ASIC, канали 768-895).

Оцінка середнього значення за допомогою медіани добре працює з унімодальним розподілом, але, природно, дає неадекватну оцінку, якщо дані мають великий стрибок між групами елементів у відсортованому масиві вхідних даних. Як показано на Рисунку 3.5а, відсортований розподіл значень σ слідує плавній лінії і, таким чином, є гарним кандидатом для використання медіани. Було вирішено використовувати метод медіани для оцінки ширини базової лінії детекторного модуля КТС.



(б) Повний FEB з парними та непарними каналами, відсортованими окремо. Рисунок 3.5: Повний FEB з відсортованими каналами: усі канали (а), парні та непарні канали окремо (б); (а) низькі та високі значення - єдині, що не слідують лінійній прогресії; (б) непарні, і парні канали поводяться однаково.

3.2.2 Шум у парних та непарних каналах

Через особливості механічної реалізації сигнальних ліній мікрокабелів та нееквівалентні схеми в різних ASIC, детекторний модуль STS демонструє дещо

відмінну роботу непарних та парних каналів. Парні канали зазвичай демонструють вищий рівень шуму (Рис. 3.6). Така поведінка зрозуміла і повинна бути врахована при визначенні середнього рівня шуму.



(а) Повний FEB. (б) Повний FEB як гістограма.

Рис. 3.6: Парно-непарна структура повного FEB (ліворуч) і повного FEB у вигляді гістограми (праворуч). На гістограмі легко помітити, що непарні і парні канали чітко розділені на дві гауссових розподіли з різними середніми значеннями.

Вважається, що основна причина такої закономірності спричинена паразитними ємностями між мікрокабелями парних каналів та екрануванням модуля, який накриває сигнальні лінії; така геометрія призводить до того, що базова лінія парних каналів розмиваються приблизно на однакову величину, збільшуючи значення шуму в кожному каналі приблизно на однакову величину. У деяких випадках таке явище не дуже виражене, і можна отримати адекватне середнє значення рівня шуму, використовуючи медіану по всіх каналах (непарних і парних одночасно), як зображено на Рисунку 3.5. Проте в деяких випадках непарні та парні канали поводяться значення шуму при прямому використанні усереднення за допомогою медіани. Приклад такої поведінки показано на Рисунку 3.76, де можна чітко побачити помітну різницю між парними і непарними каналами порівняно з Рисунком 3.56.

Використовуючи медіану для визначення середнього рівня шуму в такому випадку, як зображено на Рисунку 3.7а, нам необхідно враховувати наявність ступінчастої структури в середині відсортованого масиву. Для бімодального розподілу медіанна оцінка середнього нестабільна: значення медіани істотно різниться при зміщенні у вузькому інтервалі навколо ступінчастої структури. Такий ефект не виникає, якщо ми розглядаємо непарні і парні канали окремо, оскільки вони завжди мають лінійну прогресією (за винятком дуже низьких і дуже високих значень). З цих причин є сенс обчислювати медіану окремо для парних та непарних каналів (M_{odd} , M_{even}), а потім визначити середнє значення рівня шуму повного FEB, як середнє арифметичне двох медіан ($M_{central}$). Після цього розраховується асиметрія між парними та непарними каналами для подальшого аналізу (A_1 , A_2):

$$M_{central} = \frac{M_{odd} + M_{even}}{2}$$
(3.3)

$$A_1 = \frac{M_{odd} - M_{even}}{M_{central}}$$
(3.4)

$$A_{2} = \frac{M_{odd-even}}{M_{central}}, M_{odd-even} = median(M_{i} - M_{i+1})$$
(3.5)

Асиметрія між непарними і парними каналами обчислюється двома методами:

- А₁. Асиметрія між непарними і парними медіанами (не чутлива до викидів) і використовується як загальний показник впливу різниці значень парних і непарних каналів;
- А₂. Розраховується як середня різниця між сусідніми каналами (середнє значення визначається як медіана) і визначає загальну парно-непарну асиметрію; більш чутлива до викидів.

3.2.3 Фінальне значення σ

Короткий підсумок процедури оцінки середнього значення шуму:

- Апроксимація s-кривих за допомогою вихідних файлів p-сканування, залишити лише канали з адекватними значеннями σ;
- Об'єднання отриманих значень σ окремих каналів у повний FEB
 - Для швидких каналів необхідно розставити їх у правильному порядку;
 - Для повільних каналів: виконати усереднення для кожного каналу за доступними компараторами, об'єднати отримані значення для всіх 1024 каналів;
- Визначити медіану для парних і непарних каналів окремо (M_{even}, M_{odd}) для кожної сторони (N та P) для повільних і швидких каналів;
- Обчисліть центральну медіану (M_{central}) і значення асиметрії (A₁, A₂) для кожної сторони (N та P) для повільних і швидких каналів.

Результатом цієї процедури є 4 графіки повних FEB з $M_{central}$, M_{even} , M_{odd} , A_1 та A_2 розрахованим для кожного з FEB (Рис. 3.8).





масив.

(б) Повний FEB з парними та непарними каналами, відсортованими окремо.

Рис. 3.7: Повний FEB: відсортовані усі канали (а), парні та непарні канали відсортовані окремо (б); (а) спостерігається ступінчаста структура (червоний прямокутник) у середній області; (б) непарні та парні канали поводяться порізному, що викликає ступінчасту структуру на (а).



Рис. 3.8: Фінальні графіки процедури оцінки рівня шуму.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ Р-СКАНУ



Рис. 4.1: Порівняння часу та точності р-сканування залежно від значення кроку VP (діапазон VP - 0÷149, кількість повільних компараторів - 4).

Процедура р-сканування може займати дуже багато часу (у більшості випадків ~1,5 години для 16 ASIC при діапазоні VP 0÷255 та кроком 1, 5 дискримінаторів АЦП + 1 FAST дискримінатор). Через обмежений час і велику кількість конфігурацій, які необхідно протестувати, процедура р-сканування була оптимізована, щоб бути швидшою та, одночасно, забезпечуючи результати з достатньою точністю.

Щоб знайти оптимальну конфігурацію для швидких вимірювань, було проведено серію запусків з різними значеннями кроку VP, діапазоном інтервалів сканування та кількістю повільних компараторів, задіяних у процедурі (Рис. 4.1). Для майбутніх тестових вимірювань були обрані наступні значення: діапазон VP 0÷149, крок VP дорівнює 2, кількість повільних компараторів обмежена 4-ма. Це забезпечує середній час вимірювання близько 25 хв при додатковій похибці середньої величини шуму менше за 1%.

Така конфігурація використовується виключно для вивчення загального характеру продуктивності базової лінії детекторного модуля STS залежно від різних параметрів.

5 КОНФІГУРАЦІЯ КОНТУРУ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ



Рис. 5.1: Еквівалентна електрична схема для пари протилежних каналів двостороннього сенсора (синій прямокутник), включаючи лінії передачі сигналу, еквівалентну схему зарядочутливого підсилювача STS-XYTER, та контур зворотного зв'язку (червоний прямокутник).

Після генерації пар носіїв заряду в результаті проходження зарядженої частинки крізь чутливий об'єм кремнієвого сенсора (Рисунок 5.1, синій прямокутник) дві складові сигналу протилежної полярності (з N та P сторін діода) надходять окремо до двох різних FEB (N та P відповідно).

Висока напруга, прикладена до детектора для забезпечення зворотного зміщення в кремнієвому кристалі, призводить до темнового струму через об'єм сенсора. В свою чергу, струм через сигнальний контур створює дробовий шум, що підсилюється та реєструється електронікою переднього краю, теплове збудження носіїв заряду зумовлює інший внесок у загальний шум, виражений у еквівалентному шумовому заряді - Equivalent Noise Charge (ENC). Для неопромінений кремнієвих сенсорів друга складова є домінуючою. Велика кількість шуму призводить до розмиття спектру сигналу, що збільшує ймовірність відкиду корисного сигналу порогом дискримінатора. Крім того, він може частково або повністю перешкоджати набору даних, перевантажуючи систему зчитування даних.

Для коректного зчитування сигналу (імпульсу струму) в детекторній системі, сигнальний контур має бути замкнений. У разі звичайної двосторонньої схеми зчитування із заземленою зчитувальною електронікою, закриття сигнального шляху означає підключення заземлення відповідної схеми плати зчитувальної електроніки з кожного боку. У випадку STS, плаваюча електроніка переднього краю використовується з обох боків сенсора, що працює зі зміщенням $\pm V/2$ опорних потенціалів відповідно. Тому підключення заземлення FEB призведе до короткого замикання. Щоб запобігти цьому, заземлення FEB з'єднані конденсатором, таким чином забезпечуючи шлях змінного струму для сигналу.

Щоб досягти наднизького рівня шуму в системі, необхідно відфільтрувати високовольтного RC-фільтр внесок самого джерела живлення. ШVMV використовується для фільтрації середніх і високих частот у поєднанні з CR фільтром для придушення шуму нижче смуги пропускання зчитувальної електроніки (10 кГц - 10 МГц). Така схема складається з трьох резисторів (один для віртуального заземлення, два для частоти зрізу і зниження фази сигналу), чотирьох конденсаторів (два для середнього діапазону і два для фільтрації високих частот) і елемента заземлення (Рис. 5.1). Контур зворотного шляху (Рис. 5.1, червоний прямокутник) є критичною частиною модуля STS з точки зору зменшення шуму. Щоб отримати найнижчий можливий рівень шуму, спочатку потрібно мінімізувати всі компоненти шуму в електроніці. Використовуючи вищезгадану оцінку рівня шуму з оптимізованими за часом процедурою рсканування, було проведено ряд вимірювань для досліджено залежність рівня шуму від наступних параметрів:

- С₁, С₂ використовуються для фільтрації високих частот. Ємність 1 мкФ була вибрана набагато більшою, ніж ефективна ємність сенсора (~1 нФ), щоб досягти відносно меншого імпедансу в області високих частот;
- С₃, С₄ використовуються для фільтрації середніх частот. Через паразитні ефекти в конденсаторах С₁, С₂ (індуктивність, опір) їх не можна використовувати на середніх частотах через великий імпеданс у порівнянні із сенсором. Щоб компенсувати цей ефект, С₃, С₄ підключені паралельно до С₁ та С₂. Через їх менший фізичний об'єм і меншу ємність (1 нФ) вони мають набагато менший опір на середніх частотах, ніж С₁, С₂ та детектор, що дозволяє фільтрувати середні та високі частоти на С₃, С₄ та С₁, С₂ відповідно;
- R₁, R₂ компоненти RC фільтра. Розміщуючи додаткові компоненти опору, ми можемо знизити частоту зрізу, тому що ми хочемо придушити змінну складову струму. Також вони використовуються для зменшення фази вхідного імпедансу системи з точки зору джерела високої напруги. Значення 10 кОм було вибрано більшим за C₁₋₄, але набагато нижчим за опір детектора (~1 МОм), щоб основне падіння напруги відбувалося на сенсорі;
- R₃ служить опорною точкою високої напруги. Також, введення R₃ перетворює землю у віртуальну землю, тому будь-який паразитний ефект у контурі зворотного зв'язку буде шунтуватись на землю. Для перевірки цієї ідеї були виміряні альтернативні конфігурації з та без R₃ та заземлення;
- R₄, R₅ резистори зворотного зв'язку операційних підсилювачів;
- Час формування сигналу в попередній зарядочутливій електроніці варіювався зміною параметрів контуру зворотного зв'язку в зарядочутливому підсилювачі STS-XYTER.

5.1 Дослідження впливу опору резисторів

Для вивчення поведінки рівня шуму та для оптимізації топології та складових контуру зворотного зв'язку за допомогою процедури р-сканування було досліджено різні значення для наступних компонентів (ємності конденсаторів залишалися незмінними під час цих вимірювань - C₁, C₂ = 1 мкФ; C₃, C₄ = 1 нФ;):

- R₁, R₂: [1, 10] кОм;
- R₃: [0, 1, 10, 100, 1к, 10к, ∞] Ом;
- R₄, R₅: [2, 32] ум.од.;
- Час формування сигналу: [90, 280] нс.

Приклад результату такого вимірювання зображено на Рисунку 5.2. Для повільних каналів, за даних параметрів, залежність рівня шуму від значення $R_3 \epsilon$ слабкою. Для каналів різної парності та полярності спостерігаються локальні мінімуми в області 10 - 10³ Ом. Для швидких каналів залежність значення рівня шуму є сильно вираженою при більших $R_{1,2}$, де спостерігаються його мінімуми в області 10 - 10³ Ом. Для подальших тестувань було обрано $R_3 = 10$ Ом.

Для подальшої оптимізації значення R₃ необхідно провести аналогічні дослідження з кремнієвими сенсорами інших розмірів.

5.2 Дослідження впливу ємності конденсаторів

Аналогічні вимірювання було проведено з конденсаторами (фіксовані номінальні значення опору резисторів R_1 , R_2 = [1, 10] кОм; R_3 = 10 Ом; R_4 , R_5 = 32 ум.од; час формування сигналу = 90 нс):

- C₁, C₂: [10, 33, 100, 330, 1000] μΦ;
- C₃, C₄: [без конденсаторів, 1 нФ];

Результати вимірювання зображено на Рисунку 5.3. З результатів видно, що зі збільшенням ємності різниця між парними і непарними каналами зменшується, як і рівень шуму. Крім того, ми не можемо використовувати ємність менше за 33 н Φ для C_{1,2}, оскільки рівень шуму швидко зростає, внаслідок чого лише близько 100 з 1024 каналів проходять процедури відбору, що призводить до неможливості використання таких даних для подальшого оцінки рівня шуму.



(а) Залежність рівня шуму у повільних каналах від значення опору R_3 ; $R_{1,2} = 1$ кОм (ліворуч), $R_{1,2} = 10$ кОм (праворуч), $R_{4,5} = 2$ ум.од., $C_{1,2} = 1$ нФ, $C_{3,4} = 1$ нФ, час формування сигналу 90 нс.



(б) Залежність рівня шуму у швидких каналах від значення опору R_3 ; $R_{1,2} = 1$ кОм (ліворуч), $R_{1,2} = 10$ кОм (праворуч), $R_{4,5} = 2$ ум.од., $C_{1,2} = 1$ нФ, $C_{3,4} = 1$ нФ, час формування сигналу 90 нс.

Рис. 5.2: Дослідження рівня шуму в швидких та повільних каналах від значення опору резистора R_3 (тут 0.1 Ом = 0 Ом; 10^5 Ом = ∞ Ом).



(а) Залежність рівня шуму у повільних каналах від значення ємностей $C_{1,2}$; $R_{1,2} = 1$ кОм (ліворуч), $R_{1,2} = 10$ кОм (праворуч), $R_3 = 10$ Ом, $R_{4,5} = 32$ ум.од., $C_{3,4} = 1$ нФ (чорне, зелене), без $C_{3,4}$ (блакитне ,червоне), час формування сигналу 90 нс.



(б) Залежність рівня шуму у швидких каналах від значення ємностей $C_{1,2}$; $R_{1,2} = 1$ кОм (ліворуч), $R_{1,2} = 10$ кОм (праворуч), $R_3 = 10$ Ом, $R_{4,5} = 32$ ум.од., $C_{3,4} = 1$ нФ (чорне, зелене), без $C_{3,4}$ (блакитне ,червоне), час формування сигналу 90 нс.

Рис. 5.3: Дослідження рівня шуму в швидких та повільних каналах від значення ємностей конденсаторів C_{1,2}.

РЕЗУЛЬТАТИ

- Удосконалено процедуру визначення рівня шуму детекторних модулів STS: розроблено та застосовано процедуру відбору каналів, досліджено різноманітні артефакти, що виникають під час апроксимації порогових кривих, розроблено методику оцінки середнього рівня шуму детекторного модуля за наявності паразитних ефектів у парних каналах. В ході роботи виявлено раніше непомічену постійну різницю у шумі між N та P сторонами сенсора, заплановано дослідження цього ефекту у інших детекторних збірках. Також, новий алгоритм було оснащено зручним інтерфейсом для подальшого тестування модулів членами групи STS.
- 2 Оптимізовано процедуру амплітудно-зарядного скану (р-сканування) для дослідження характеру залежності рівня шуму у детекторних модулях від конфігурації компонент у електричному ланцюгу сенсора, зовнішніх умов, наявності екрануючих матеріалів, тощо.
- 3 Досліджено характер залежності рівня шуму у тестовому модулі від параметрів контуру зворотного зв'язку: опори резисторів R₁, R₂, R₃; ємності конденсаторів C₁, C₂, C₃, C₄; опори резисторів зворотного зв'язку операційних підсилювачів R₄, R₅; час формування сигналу. Виявлено сильну залежність рівня шуму та різниці цих рівнів між парними та непарними каналами від значень C₁, C₂ - зі збільшенням значень C₁, C₂ зменшується загальний рівень шуму та різниця між парними та непарними каналами. Оптимальним значенням ємностей для C₁, C₂ було обрано 1 мкФ.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У ході цього дослідження було вдосконалено інструменти аналізу детекторних модулів STS для визначення кількісних характеристик ефективності роботи модулів (рівень шуму, асиметрія шуму у парних та непарних каналах для повільних і швидких каналів). Ці інструменти будуть використані для подальшого тестування модулів. Процедура реалізована у зручному для використовування інтерфейсі, а також оптимізована для збереження часу (процедура є повністю автоматичною). Процедура амплітудного сканування з тестовими імпульсами була оптимізована для дослідження працездатності повністю зібраного модуля, перевірки конструкції схеми заземлення, живлення та її впливу на загальний шум системи, а також для покращення топології контуру зворотного зв'язку. Кілька номінальних значень компонентів, що використовуються в схемі, були перевірені та дозволили оптимізувати їх значення.

У планах майбутньої роботи - подібний аналіз для кремнієвих сенсорів інших розмірів, удосконалення розробленого аналізу та порівняння результатів аналізу із чисельними симуляціями еквівалентних електричних ланцюгів.

подяки

Я щиро вдячний керівництву GSI за можливість приєднатися до робочої групи STS для виконання цього дослідження.

Хочу висловити подяку Теклішину Максиму Андрійовичу, що був чудовим науковим керівником та відкрив для мене раніше невідому область фізики. Особлива подяка висловлюється Антону Лиманцю, Адріану Родрігесу, Марселю Байделю та всій команді STS за плідні дискусії та допомогу з проблемами, з якими я зіткнувся під час роботи. Також я вдячний своїм одногрупникам та викладачам, що приймали участь у обговоренні моєї роботи та її результатів. Окрема подяка Безшийку Олегу Анатолійовичу, за допомогу з організацією стажування у GSI.

Я висловлюю глибоку подяку моїй родині та друзям, новим та старим, підтримку яких неможливо переоцінити.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

- J. Schukraft, "QM2017: Status and Key open Questions in Ultra-Relativistic Heavy-Ion Physics," Nuclear Physics A, vol. 967, no. Supplement C, pp.1 – 10, 2017, the 26th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2017.
- 2. M. Harrison, T. Ludlam, and S. Ozaki, "RHIC project overview," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 499, pp. 235–244, Mar. 2003.
- 3. G. Brianti, "Large Hadron Collider in the LEP Tunnel," in 12th IEEE Particle Accelerator Conference, 1987, p. 2008.
- 4. T. Gunji, "Overview of recent ALICE results," Nuclear Physics A, vol. 956, pp. 11 18, 2016, the XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2015.
- A. Angerami, "Recent highlights from the ATLAS heavy-ion program," Nuclear Physics A, vol. 956, pp. 19 – 26, 2016, the XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2015.
- 6. K. Fukushima and T. Hatsuda, "The phase diagram of dense QCD," Reports on Progress in Physics, vol. 74, no. 1, p. 014001, Jan. 2011.
- H. Heiselberg and M. Hjorth-Jensen, "Phases of dense matter in neutron stars," Phys. Rep., vol. 328, pp. 237–327, May 2000.
- 8. FAIR Baseline Technical Report 2006.
- B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp, and P. Senger, "The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments," Lect. Notes Phys., vol. 814, pp. pp.1–980, 2011.
- Margutti, Jacopo, "Measurements of anisotropic flow and flow fluctuations in Xe-Xe and Pb-Pb collisions with ALICE," Nuclear Physics A, vol. 982, pp. 367–370, 02 2019.

- J. Steinheimer, J. Auvinen, H. Petersen, M. Bleicher, and H. Stöcker, "Examination of directed flow as a signal for a phase transition in relativistic nuclear collisions," Phys. Rev., vol. C89, no. 5, p. 054913, 2014.
- 12. ALICE Collaboration, "J/ ψ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV," 06 2016.
- 13. ALICE Collaboration, "Constraints on jet quenching in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV measured by the event-activity dependence of semi-inclusive hadron-jet distributions," Physics Letters B, vol. 783, 05 2018.
- 14. Elia, Domenico, "Strangeness production in ALICE," Journal of Physics: onference Series, vol. 455, p. 012005, 08 2013.
- P. M. Hohler and R. Rapp, "Is ρ-meson melting compatible with chiral restoration?" Physics Letters B, vol. 731, pp. 103–109, Apr. 2014.
- 16. R. Rapp and H. van Hees, "Thermal dileptons as fireball thermometer and chronometer," Physics Letters B, vol. 753, pp. 586–590, 2016.
- 17.W. Henning, "FAIR An International Accelerator Facility for Research with Ions and Antiprotons," 06 2005.
- 18. "CBM Compressed Baryonic Matter experiment." <u>http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/nuclear-matter-physics/cbm/introduction.html</u>.
- 19. Ablyazimov, T. and others, "Challenges in QCD matter physics –The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR," Eur. Phys. J., vol. A53, no. 3, p. 60, 2017.
- 20. Malakhov, A. and Shabunov, A., Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet. Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2013.
- Johann Heuser, Walter Müller, V Pugatch, Peter Senger, Christian Joachim Schmidt, Christian Sturm, Ulrich Frankenfeld, CBM Collaboration, et al. Gsi report 2013-4. Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS), GSI, Darmstadt, 2013.
- 22. O Golosov, V Klochkov, E Kashirin, I Selyuzhenkov, CBM Collaboration, et al. Performance for proton anisotropic flow measurement of the CBM experiment at

FAIR. In Journal of Physics: Conference Series, volume 1690, page 012104. IOP Publishing, 2020.

- 23. H. Spieler, Semiconductor Detector Systems. Series on Semiconductor Science and Technology, OUP Oxford, 2005.
- 24. The CMS Collaboration, "Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker," J. Instrum., vol. 9, p. P10009. 80 p, May 2014.
- 25. P. Rodriguez Perez, "The LHCb Vertex Locator performance and Vertex Locator upgrade," JINST, vol. 7, p. C12008, 2012.
- V. Friese, C. Sturm, and A. Toia, CBM Progress Report 2015. Darmstadt: GSI, 2016.
- 27. K Kasinski, R Kleczek, and R Szczygiel. Front-end readout electronics considerations for silicon tracking system and muon chamber. Journal of Instrumentation, 11(02):C02024, 2016.
- 28. Jörg Lehnert, Walter FJ Müller, and Christian J Schmidt. The gbt-based readout concept for the silicon tracking system of the CBM experiment. In Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015, volume 9662, page 96622S. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- 29. D. Gottschalk J. Lehnert. Development and test of the CBM common readout board (crob). CBM Progress Report 2017, 03 2018.
- R. Szczygiel W. Zubrzycka K. Kasinski, W. Zabolotny. Sts/much-xyterv2 manual v1.30. AGH University, 01 2014.
- Fred James. Minuit: Function minimization and error analysis reference manual. Technical report, CERN, 1998.