

Інститут ядерних досліджень
Національної академії наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КШИВАНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 53.01:004.942+539.1.075, 539.1.08

ДИСЕРТАЦІЯ
**МОНІТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРЕМНІЄВОЇ ТРЕКЕРНОЇ СИСТЕМИ
ТА ОБЛАСТІ ЗІТКНЕНЬ ЯДЕР В ЕКСПЕРИМЕНТІ СВМ**

Спеціальність 104 – фізика та астрономія
Галузь знань 10 – природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.О. Кшиванський

Науковий керівник:
Пугач Валерій Михайлович,
член-кореспондент НАН України, доктор
фізико-математичних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Кшиванський О.О. МОНІТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІЄВОЇ ТРЕКЕРНОЇ СИСТЕМИ ТА ОБЛАСТІ ЗІТКНЕНЬ ЯДЕР В ЕКСПЕРИМЕНТІ CBM – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі природничих наук за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. – Інститут ядерних досліджень НАН України. Київ, 2026.

Фізичні цілі майбутнього експерименту з дослідження щільної баріонної матерії – CBM (Compressed Baryonic Matter) на базі центру дослідження важких іонів – GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) полягають у дослідженні властивостей матерії за умов надвисоких баріонних густин та помірних температур. Основною метою є дослідження фазової діаграми квантової хромодинаміки (КХД) в області надвисоких баріонних густин. Передбачається вивчення переходу між адронною матерією та кварк-глюонною плазмою, пошук критичної точки переходу КХД, пошук кваркїонної матерії та ознак відновлення хіральної симетрії. Ці дослідження мають фундаментальне значення для розуміння еволюції раннього Всесвіту. Отримання таких даних планується за допомогою дослідження таких процесів як утворення чармоніїв поблизу порогу їх народження, флуктуації баріонного заряду, дивності та електричного заряду, колективного потоку адронів, утворення лептонних пар, утворення дивних частинок тощо. Детекторна система CBM є форвардним спектрометром, що включає кремнієвий трекер, детектори часу прольоту, калориметри та мюонні детектори. Детекторна система розрахована на детектування продуктів реакції, утворених у р-Au та Au-Au зіткненнях у режимі фіксованої мішені із енергіями до 14 GeV та 29 GeV на нуклон для ядер золота та протонів відповідно, при частоті подій від 1 МГц до 10 МГц. Такі умови створюють значні обмеження для кількості чутливого

матеріалу, можливого розміщення зчитувальної електроніки та вимагають безтригерної обробки даних (зчитування та реконструкція в реальному часі), мінімізації шуму електроніки для реєстрації слабких та рідкісних сигналів.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню та розробці програмних аналогів детекторних модулів кремнієвої трекерної системи (Silicon Tracking System, KTC) та прототипу детекторного модуля запропонованої Системи Радіаційного Моніторингу RMS-CBM майбутнього експерименту CBM, що реалізується на базі міжнародного наукового центру FAIR. Основною метою дослідження є створення програмної моделі відгуку, аналізу та оптимізації роботи детекторних модулів KTC, а також розробка прототипу системи радіаційного моніторингу для забезпечення стабільності роботи експерименту за умов високих інтенсивностей іонних зіткнень.

Обґрунтовано доцільність створення таких моделей з точки зору дизайну високоточних та чутливих детекторних систем, їх подальшого використання в умовах високих радіаційних навантажень та описано їхню важливість та вплив на роботу детектора CBM, якість отриманих даних та час життя детектора.

Розглянуто методи опису складних електричних систем, що використовуються у сучасних експериментах з фізики елементарних частинок на прикладі існуючих моделей, що використовуються в LHCb, ATLAS, Fermilab тощо. Розглянуто приклади попередніх програмних моделей детекторних модулів KTC та їх компонент.

Об'єктом дослідження є кремнієві двосторонні мікροстріпові сенсори, детекторні модулі KTC та прототип системи радіаційного моніторингу RMS-CBM. Предметом дослідження є фізичні процеси, що відбуваються у детекторних модулях, зокрема формування сигналу, транспорт заряду, вплив шумів та паразитних ефектів.

У роботі використано сучасні методи чисельного моделювання, зокрема симуляції аналогової електроніки (LTspice), методи Монте-Карло для моделювання взаємодії іонізуючого випромінювання з матеріалом сенсора (Allpix2, Geant4), а також програмні засоби аналізу даних (ROOT, Python).

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан фізики елементарних частинок, відкриті питання Стандартної Моделі (СМ), пошуки нової фізики поза межами СМ у дослідженнях зіткнень важких іонів, запланований експеримент CBM на базі нового Центру дослідження антипротонів та іонів – FAIR (Facility for Antiprotons and Ions Research), його програма дослідження та будова детектора, характеристики та будова КТС експерименту CBM, важливість розробки спеціалізованих симуляцій детекторних систем у сучасних експериментах, приклади таких симуляцій у сучасних експериментах, симуляції для КТС та сформульовано завдання цього дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** описано процес розробки програмного аналога детекторного модуля КТС: загальний підхід до розробки симуляцій таких електронних систем та процесів, що у них відбуваються, вибір симулятора аналогової електроніки, розробка спрощеної принципової схеми модуля з урахуванням різноманітних процесів, що у них відбуваються, тестування спрощеної схеми із застосуванням даних вимірювань у лабораторії робочої групи КТС, розбудова схеми програмного аналогу із розширенням до багатоканальної та двосторонньої схеми з врахуванням важливих для рівня шуму та обробки сигналу ефектів, викликаними взаємодією між компонентами модуля та між модулем та зовнішнім середовищем, приклади практичних результатів отриманих за допомогою такої принципової схеми, симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС із метою генерації вхідних даних для програмного аналога, приклад функціонування повного ланцюга подій, висновки та можливі подальші покращення якості симуляцій та можливості їх застосування під час експлуатації детектора CBM.

У **третьому розділі** описано мотивацію для створення системи радіаційного моніторингу для експерименту CBM, загальні будову, характеристики та вимоги основних компонент експерименту LHCb, систему радіаційного моніторингу RMS-R3 експерименту LHCb, її будову та принцип

роботи, можливість застосування системи, створеної на основі RMS-R3 для експерименту CBM, будову прототипу RMS-CBM, створення програмного аналога прототипу RMS-CBM, висновки та можливі подальші покращення якості симуляцій.

Завершується дисертація узагальненими висновками, переліком джерел цитованої літератури та подякою колегам за співпрацю.

Оригінальним внеском цієї роботи є розробка першої повноцінної програмної моделі сенсора та зчитувальної електроніки детекторного модуля КТС, що відтворює повний ланцюг фізичних подій для прототипу детекторного модуля RMS-CBM.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Розроблено першу комплексну програмну модель детекторного модуля КТС, що відтворює повний цикл реєстрації та обробки сигналу,
- Використовуючи розроблену модель, оптимізовано дизайн детекторних модулів КТС та покращено алгоритм реконструкції подій для підвищення його ефективності,
- Створено перший програмний аналог прототипу системи радіаційного моніторингу RMS-CBM.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для оптимізації конструкції детекторних модулів КТС, підвищення точності вимірювань та зниження рівня шумів. Розроблені моделі можуть застосовуватися як інструмент для тестування та калібрування детекторів під час їх експлуатації. Крім того, запропонована система радіаційного моніторингу забезпечує ефективний контроль радіаційних навантажень та положення пучка, що сприяє підвищенню надійності та довговічності експериментального обладнання.

Результати дисертаційного дослідження апробовано на міжнародних конференціях та відображено у наукових публікаціях.

Виконане дослідження має вагомий внесок у розвиток методів моделювання детекторних систем у фізиці високих енергій, а також створює науково-технічну основу для реалізації експерименту CBM і дослідження фундаментальних властивостей сильно взаємодіючої матерії.

Ключові слова: “Щільна Баріонна Матерія” – експеримент CBM (GSI/FAIR), симуляції функціонування сенсорів та аналогової електроніки, програмні пакети “LTspice” та інші, оцінки якості функціональних характеристик детекторних модулів, ON-LINE моніторинг радіаційно-безпечних умов експерименту та стабільності області світності.

ABSTRACT

Kshyvanskyi O.O. MONITORING OF THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF THE SILICON TRACKING SYSTEM AND THE COLLISION REGION IN THE CBM EXPERIMENT. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in field of Natural Sciences, specialty 104 - Physics and Astronomy. - Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The physics goals of the future Compressed Baryonic Matter (CBM) experiment (GSI/FAIR) are focused on the study of matter properties under conditions of extremely high baryon densities and moderate temperatures. The primary objective is the investigation of the phase diagram of quantum chromodynamics (QCD) in the region of high baryon densities. In particular, the study of the transition between hadronic matter and quark–gluon plasma, the search for the QCD critical endpoint and signatures of chiral symmetry restoration are planned. These studies are of fundamental importance for understanding the evolution of the early Universe. Such data are planned to be obtained through investigations of various processes, including charmonium production near threshold, fluctuations of baryon number, strangeness and electric charge, collective flow of hadrons, dilepton production, and strange particle production, among others. The CBM detector system is a forward spectrometer comprising a silicon tracking system, time-of-flight detectors, calorimeters, and muon detectors. The detector is designed to register reaction products from p–Au and Au–Au collisions in a fixed-target mode at energies up to 14 GeV and 29 GeV per nucleon for gold nuclei and protons, respectively, at interaction rates ranging from 1 MHz to 10 MHz. These operating conditions impose stringent constraints on the material budget and the placement of readout electronics, and require triggerless data acquisition (real-time readout and

reconstruction), as well as minimisation of electronic noise to enable detection of weak and rare signals.

The dissertation is devoted to the study and development of electronic models of detector modules for the Silicon Tracking System (STS), as well as to the design of a prototype detector module for the proposed Radiation Monitoring System (RMS-CBM) of the future CBM experiment, to be implemented at the international research facility FAIR. The primary objective of this research is to establish efficient approaches for the modelling, analysis, and optimisation of the performance of STS detector modules, as well as to develop a prototype radiation monitoring system aimed at ensuring the stable operation of the experiment under conditions of high-intensity ion collisions.

Methods for describing complex electrical systems used in modern high-energy physics experiments are reviewed, with examples from existing models employed in experiments such as LHCb, ATLAS, CMS (CERN), and RHIC (Fermilab). Previous electronic models of STS detector modules and their components are also considered.

The original contribution of this work consists in the development of the first comprehensive electronic model of both the sensor and readout electronics of an STS detector module, reproducing the full chain of physical processes, as well as a model for the RMS-CBM detector module prototype.

The object of the research comprises silicon double-sided microstrip sensors, detector modules of the STS, and a prototype of the RMS-CBM radiation monitoring system. The subject of the research encompasses the physical processes occurring within the detector modules, in particular signal formation, charge transport, and the influence of noise and parasitic effects.

The study employs state-of-the-art numerical modelling techniques, including analogue electronics simulations using LTspice, Monte Carlo methods for modelling the interaction of ionizing radiation with the sensor material using Allpix2 and Geant4, as well as data analysis tools such as ROOT and Python.

The first chapter reviews the current state of elementary particle physics, open questions of the Standard Model, and searches for new physics beyond it in heavy-ion collision studies. It also describes the planned CBM experiment at the Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR), its physics program, detector design, and the structure and characteristics of the Silicon Tracking System. The importance of specialized detector simulations in modern experiments is emphasized, along with examples of such simulations and previous studies performed for the STS. The objectives of the present dissertation are formulated.

The second chapter describes the development of an electronic analogue of the STS detector module. This includes the general approach to simulating such electronic systems and processes, the selection of an analogue electronics simulator, and the development of a simplified schematic incorporating various physical effects. The simplified model is validated using experimental data obtained by the STS working group. The model is then extended to a multichannel, double-sided configuration, accounting for noise and signal processing effects arising from interactions both within the module and with the external environment. Examples of practical results obtained using this model are presented, along with simulations of ionizing radiation interactions with the sensor for generating input data. The operation of the full signal chain is demonstrated, followed by conclusions and possible improvements of simulation quality and their applicability during CBM detector operation.

The third chapter presents the motivation for developing a radiation monitoring system for the CBM experiment. It reviews the structure, characteristics, and requirements of key components of the LHCb experiment, as well as the RMS-R3 radiation monitoring system, its design and operating principles. The applicability of an RMS-R3-based system to the CBM experiment is discussed. The design of the RMS-CBM prototype is presented, along with the development of its electronic analogue, followed by conclusions and prospects for further improvements.

The dissertation concludes with generalized conclusions, a list of sources of cited literature, and thanks to colleagues for their cooperation.

Scientific novelty of the obtained results:

- The first comprehensive electronic model of the STS detector module has been developed, reproducing the full cycle of signal registration and processing,
- Using the developed model, the design of STS detector modules has been optimized and the event reconstruction algorithm has been improved to enhance its efficiency,
- The first electronic analogue of a prototype radiation monitoring system, RMS-CBM, has been created.

Practical significance of the obtained results lies in the possibility of their application for optimizing the design of STS detector modules, improving measurement accuracy, and reducing noise levels. The developed models can be employed as tools for testing and calibration of detectors during their operation. Furthermore, the proposed radiation monitoring system ensures effective control of radiation loads and beam position, thereby contributing to increased reliability and longevity of experimental equipment.

The results of the dissertation research have been presented at international conferences and published in scientific journals.

The conducted research makes a significant contribution to the development of methods for modelling detector systems in high-energy physics, and also establishes a scientific and technical foundation for the implementation of the CBM experiment and the study of the fundamental properties of strongly interacting matter.

Keywords: Compressed Baryonic Matter – CBM experiment (GSI/FAIR), simulations of sensor and analogue electronics functioning, LTspice, Allpix², and other software packages, quality assessments of functional characteristics of detector

modules, ON-LINE monitoring of radiation-safe experimental conditions and stability of the luminosity region.

Список публікацій здобувача

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. О.О. Кшиванський, В.М. Пугач. Симуляція прототипу системи радіаційного моніторингу для експерименту CBM. Наука і техніка сьогодні, 13(54) (2025), 2744-2754. (Категорія Б, [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-2744-2754](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-2744-2754), фахове видання України. Внесок здобувача: відповідальний автор, розглянуто перспективи використання системи радіаційного моніторингу для експерименту CBM, розроблено програмний аналог прототипу RMS-CBM, виконано симуляції реєстрації сигналу та рівня шуму).
2. M. Teklishyn, ..., O. Kshyvanskyi et al. Minimal material, maximum coverage: Silicon Tracking System for high-occupancy conditions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1080, 2025, 170714. (Q2, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170714>, SCOPUS, WoS. Внесок здобувача: виконано дослідження поведінки залежності рівня шуму детекторного модуля KTC від параметрів контуру зворотного зв'язку, оптимізовано дизайн передньої зчитувальної плати).
3. О.О. Кшиванський, В.М. Пугач, М.А. Теклішин. Дослідження аналогового відгуку сенсорів кремнієвої трекерної системи експерименту CBM за допомогою пакета LTspice. Ядерна Фізика та Енергетика, 26(2) (2025), 193-199. (Q3, <https://doi.org/10.15407/jnpae2025.02.193>, фахове видання України, SCOPUS. Внесок здобувача: відповідальний автор, розроблено програмні аналоги варіацій детекторного модуля KTC, результати тестування перевірено використовуючи відповідні вимірювання характеристик виконані в лабораторії KTC).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. O. Kshyvanskyi et al. STS powering and grounding circuits optimization. 41st CBM Collaboration Meeting. Presentation. Mixed conference. Darmstadt, Germany, March 2023.
2. O. Kshyvanskyi et al. Understanding the response of the STS: Simulations of the analog electronics of the STS module. Highlight talk. Mixed conference. Bucharest, Romania, September 2023.
3. М. Теклішин, О. Кшиванський. Оцінка прототипів детекторних модулів для кремнієвої трекерної системи CBM. Моделювання аналогової електроніки. XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 вересня 2023 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. – 248 с. – с. 63. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/index.html. Eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/book%20of%20abstracts_2023.pdf
4. O. Kshyvanskyi et al. Understanding, modeling and implementing the analogue response of the silicon tracking system of the CBM experiment at GSI/FAIR. High Energy Physics Theoretical and Experimental Challenges 2025. Video conference. Kyiv, Ukraine, January 2025. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/2/contributions/>
5. О. Кшиванський та ін. Симуляції детектування та обробки сигналу детекторними модулями кремнієвої трекерної системи (КТС) Експерименту CBM. XXXII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26–30 травня 2025 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2025. – 209 с. – с. 73. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/4/overview>. Eprint: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/4/book-of-abstracts.pdf>
6. O. Kshyvanskyi et al. Simulation of the radiation monitoring system prototype for the CBM experiment. High Energy Physics Theoretical and Experimental

Challenges 2026. Video conference. Kyiv, Ukraine, January 2026. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/5/overview>

7. О. Кшиванський та ін. Моніторинг функціональних характеристик кремнієвої трекерної системи та області зіткнень ядер в експерименті CBM. XXXIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 травня 2025 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2026. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/13/>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. O. Kshyvanskyi, M. Teklishyn. CBM Progress Report 2023: Simulation of the analogue response of STS modules using LTSpice. GSI-2024-00765 (2024), 35. (URL: <https://dx.doi.org/10.15120/GSI-2024-00765>)

В складі колаборації LHCb (CERN):

1. Лауреат премії 2025 р. “BREAKTHROUGH IN FUNDAMENTAL PHYSICS” (Certificate attached): <https://cernbox.cern.ch/pdf-viewer/public/FYr1d3cHuJ51UIf/Oleksandr%20Kshyvanskyi.pdf> <https://breakthroughprize.org/Laureates/1/L3995>
2. Співавтор 97 публікацій в наукових виданнях квартилів $Q1$, $Q2$: <https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Kshyvanskyi-2/publications>
3. Індекс Гірша становить 12 за даними ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Kshyvanskyi-2>

Зміст

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT.....	7
Список публікацій здобувача.....	12
Зміст.....	15
Перелік умовних скорочень.....	17
Вступ.....	19
Розділ 1. Експеримент CBM.....	25
1.1 Преамбула.....	25
1.1.1 Стандартна Модель.....	25
1.1.2 Фазова діаграма КХД.....	27
1.1.3 Матерія за високих баріонних густин.....	29
1.1.4 Зіткнення важких іонів.....	29
1.2 FAIR. CBM.....	31
1.2.1 Центр дослідження антипротонів та іонів FAIR.....	31
1.2.2 Експеримент CBM.....	32
1.3 Кремнієва трекерна система.....	40
1.3.1 Детекторний модуль КТС.....	43
1.3.2 Симуляції детекторних систем.....	51
Розділ 2. Симуляції детекторних модулів КТС.....	55
2.1 Симуляції аналогової електроніки детекторного модуля КТС.....	56
2.1.1 LTspice.....	56
2.1.2 Одноканальна схема.....	57
2.1.4 Багатоканальна схема.....	71
2.1.5 Двостороння схема.....	80
2.1.6 Висновки.....	89
2.2 Симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС.....	90
2.2.1 Geant4 та Allpix ²	90

2.2.2 Геометрія сенсора.....	92
2.2.3 Іонізуюче випромінювання. Розподіл утворених зарядів.....	93
2.2.4 Висновки.....	98
2.3 Висновки до розділу 2.....	99
Розділ 3. Прототип Системи Радіаційного Моніторингу для експерименту CBM.....	100
3.1 Мотивація розробки Системи Радіаційного Моніторингу.....	100
3.1.1 Радіаційні навантаження в експерименті CBM.....	100
3.1.2 Експеримент LHCb. RMS-R3.....	102
3.1.3 Детектори LHCb та CBM.....	112
3.1.4 Прототип RMS-CBM.....	113
3.2 Симуляції прототипу RMS-CBM.....	116
3.2.1 Принципова схема RMS-CBM.....	117
3.2.2 Результати.....	120
3.2.3 Висновки до розділу 3.....	121
Висновки.....	122
Список використаних джерел.....	126
Додаток А.....	140
Додаток Б.....	143

Перелік умовних скорочень

APPA - Atomic, Plasma and Applications

ASIC - application-specific integrated circuit (інтегральна схема специфічного призначення)

CBM - Compressed Baryonic Matter (щільна баріонна матерія)

CRI - common readout interfaces

DAQ - Data Acquisition

EWT - electroweak theory

FAIR - Facility for Antiprotons and Ions Research (центр дослідження антипротонів та іонів)

FEB - front-end board

FEE - front-end electronics (передня електроніка)

FLES - First Level Event Selector

FSD - Forward Spectator Detector

Geant4 - GEometry ANd Tracking

GSI - Gesellschaft für Schwerionenforschung (центр дослідження важких іонів)

HADES - High-Angle Di-Electron Spectrometer

LHCb - Large Hadron Collider beauty

MVD - Micro Vertex Detector

MUCH - Muon Chambers Detector

NIEL - non-ionizing energy loss

NuSTAR - Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions

PANDA - anti-Proton Annihilation at Darmstadt

RHIC - Relativistic Heavy Ion Collider (Релятивістський Колайдер Важких Іонів)

RICH - Ring-Imaging Cherenkov Detector

RMS – Radiation Monitoring System (система радіаційного моніторингу)

ROB - readout board

SIS - SchwerIonenSynchrotron

SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

ToF - Time of Flight Detector

TRD - Transition Radiation Detector

UNILAC - Universal Linear Accelerator

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БАК (LHC) – Великий адронний колайдер (Large Hadron Collider)

ВЗІ – високочутливий зарядовий інтегратор

КГП – кварк-глюонна плазма

ККМ – Кабіббо–Кобаяші–Маскави

КТС (STS) – Кремнієва Трекерна Система (Silicon Tracking System)

КХД (QCD) – квантова хромодинаміка (quantum chromodynamics)

МФД – металеві-фольговий детектор

СМ – Стандартна Модель

Вступ

Актуальність роботи

Фазова діаграма сильно взаємодіючої речовини (фазова діаграма КХД) є одним з основних об'єктів дослідження у ядерній фізиці. Область високих температур було експериментально досліджено в експериментах на Релятивістському Колайдері Важких Іонів –RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) та БАК (Великому Адронному Колайдері) з використанням релятивістських зіткнень важких іонів. У цих експериментах відтворюються стани матерії, що існували дуже короткий час після Великого вибуху. Фундаментальний інтерес становлять властивості такої матерії, особливо рівняння її стану. Ці характеристики є важливими для розуміння таких об'єктів як нейтронні зірки, їх злиття, тощо. Ефективним шляхом утворення такої матерії в лабораторних умовах є використання пучків важких іонів.

Майбутній експеримент з дослідження щільної баріонної матерії – CBM (Compressed Baryonic Matter) розроблено для дослідження фазової діаграми КХД за високих баріонних густин та помірних температур. Для цього будуть використані пучки іонів або протонів та золота.

Критично важливою складовою детекторної системи CBM є кремнієва трекерна система (КТС). КТС є головним трекерним детектором CBM, мета якого полягає у високоточній реєстрації та реконструкції треків заряджених частинок з високою ефективністю.

Головна частина КТС – це детекторні модулі КТС. Складові модуля КТС: кремнієвий двосторонній сенсор (1024 стріпи на кожній стороні), передня зчитувальна електроніка, яка містить вісім інтегральних схем специфічного призначення – ASIC (application-specific integrated circuit), що підключені до стріпів кремнієвого сенсору через надтонкі алюмінієво-поліімідні мікрокабелі. Від якості роботи модулів КТС залежить ефективність головної трекерної системи, та усього експерименту.

Дослідження, заплановані для експерименту CBM, розраховані на вимірювання даних з високою статистичною точністю, для досягнення якої частота ядерних взаємодій пучка іонів у прискорювачі SIS100 із ядрами мішені має бути до 10 МГц при кінетичних енергіях пучків важких іонів та протонів до 14 GeV та 29 GeV на нуклон відповідно, що вимагає швидких, радіаційно стійких детекторів та надійного контролю пучка і створюваних радіаційних навантажень.

За таких умов, надійний моніторинг та аналіз характеристик пучка та області зіткнень ядер є гарантією контролю радіаційного навантаження компонент CBM, що забезпечить довший термін служби детектора та покращить якість отриманих даних. Моніторинг просторової стабільності пучка надасть можливість дослідження еліптичних потоків досліджуваних частинок, як свідків утворення кварк-глюонної плазми (КГП) у ядро-ядерних зіткненнях. Прототипом RMS-CBM обрано надійно функціонуючу систему радіаційного моніторингу RMS-R3 в експерименті LHCb (CERN). Її було виготовлено за технологією металевих-фольгових детекторів (МФД), розробленою в Інституті ядерних досліджень НАН України. Принцип роботи МФД базується на явищі вторинної електронної емісії з поверхні фольги при бомбардуванні потоками заряджених частинок. Для максимальної продуктивності RMS-CBM необхідно виконати симуляції її функціонування. Моделювання детекторних систем є передумовою для глибокого розуміння їхньої роботи, що є необхідним для оптимального вибору конструкції та для отримання достовірних фізичних результатів.

Метою даної роботи є дослідження прототипів детекторних модулів KTC експерименту CBM, за різних умов та виконання симуляцій прототипу RMS-CBM та їх аналіз.

Мета дослідження

Метою дослідження є:

1. Розробка програмного аналогу детекторного модуля КТС. Вивчення принципів роботи детекторного модуля КТС, дослідження відгуку та рівня шуму від параметрів детекторного модуля.
2. Розробка методу симуляції повного ланцюга подій при реєстрації частинок детекторним модулем КТС.
3. Розробка програмного аналогу прототипу детекторного модуля RMS-SBM. Дослідження його характеристик: відгуку, рівня шуму, впливу паразитних ємностей.

Досягнення поставленої мети потребує виконання наступних завдань:

1. Дослідження принципів роботи детекторного модуля КТС, визначення основних складових, їх будови та артефактів, що виникають при їх роботі (паразитні ефекти, перерозподіл заряду, шум тощо).
2. Проведення симуляцій спрощених аналогів та їх порівняння з наявними результатами фізичних вимірювань.
3. Розбудова спрощеного аналога шляхом врахування додаткових структурних елементів та присутніх ефектів.
4. Застосування методів Монте-Карло для виконання симуляцій взаємодії іонізуючого випромінювання із кремнієвим сенсором модуля КТС.
5. Відтворення відгуку детекторного модуля КТС використовуючи розроблений програмний аналог та Монте-Карло симуляції.
6. Дослідження принципів роботи прототипу детекторного модуля RMS-SBM, визначення основних складових, їх будови та артефактів, що виникають при їх роботі (паразитні ефекти, перерозподіл заряду, шум тощо).
7. Проведення симуляцій аналогу RMS-SBM та оцінка їх результатів.

Об'єкт дослідження – кремнієвий двосторонній мікростріповий сенсор, детекторний модуль КТС, металеві-фольгові детектори, прототип системи радіаційного моніторингу RMS-SBM.

Предмет дослідження – характеристики електроніки детекторних модулів КТС та процесів, що у ній відбуваються, передбачення можливих

проблем при їх експлуатації та шляхи їх подолання, дослідження характеристик електроніки прототипу RMS-CBM, оцінка можливості його застосування в експерименті CBM.

Методи дослідження – LTspice для виконання симуляцій аналогової електроніки та базових обчислень симульованих величин. Allpix² для симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із кремнієвим двостороннім кремнієвим сенсором та реєстрації утворених носіїв заряду, ROOT та код на основі Python для аналізу отриманих даних.

Наукова новизна отриманих результатів

- Розроблено першу модель відгуку детекторних модулів КТС, що дозволяє детально досліджувати процеси реєстрації, транспорту та обробки зареєстрованого заряду,
- Отримані результати дозволили покращити дизайн нових ітерацій детекторних модулів КТС,
- Вперше розроблено програмну модель прототипу системи радіаційного моніторингу RMS-CBM.

Практичне значення одержаних результатів

Детекторний модуль є основною функціональною складовою детектора КТС, що є головним трекерним детектором експерименту CBM. Якість роботи детектора КТС, його ефективність реєстрації та реконструкції треків є критичними для успішного виконання програми фізичних досліджень CBM. Якість роботи детектора КТС визначається якістю його компонент – детекторних модулів.

Розроблені симуляції роботи детекторних модулів КТС надають можливість отримати глибше розуміння їх функціонування, удосконалити їх дизайн та використовувати їх у якості еталону під час проведення експерименту CBM.

Фізична програма CBM передбачає високі радіаційні навантаження та вимагає гарного контролю пучка, для уникнення пошкоджень компонент детектора. Запропонована концепція системи радіаційного моніторингу RMS-CBM передбачає запровадження нової, легкої системи, призначеної для моніторингу радіаційних навантажень та положення пучка.

Розроблені симуляції прототипу RMS-CBM надають можливість оцінити характеристики прототипу та можливості його застосування в експерименті CBM.

Особистий внесок здобувача

Автором було розроблено, проведено тестування та удосконалено модель відгуку детекторного модуля KTC. Автором використано розроблені симуляції для дослідження функціональних характеристик детекторних модулів, процесу обробки зареєстрованих ними сигналів та удосконалення дизайну їх зчитувальної електроніки. Автором розглянуто різні типи детекторних модулів (централі, периферичні тощо). Автором було виконано оцінки впливів паразитних ефектів, що впливають на функціонування детекторних модулів.

Автором було розроблено перший програмний аналог прототипу RMS-CBM. Автором було розглянуто шляхи опису металевих-фольгових детекторів з використанням електричних компонентів. Автором було проаналізовано отримані результати та оцінено можливість використання RMS-CBM при проведенні експерименту.

Результати розробки програмних аналогів детекторних модулів KTC та прототипу RMS-CBM були представлені автором на робочих і наукових засіданнях у GSI, Інституті ядерних досліджень НАН України та на міжнародних та українських конференціях.

Апробації результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи були представлені на наступних конференціях: 41st CBM Collaboration Meeting (Дармштадт, Німеччина, 2023), XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2023), 42nd CBM Collaboration Meeting (Румунія, Бухарест, 2023), PhD Thesis Presentation Contest (Німеччина, Саарбрюкен, 2024), High Energy Physics Theoretical and Experimental Challenges (Київ, 2025), XXXII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2025), High Energy Physics Theoretical and Experimental Challenges (Київ, 2026).

Матеріали дослідження були представлені здобувачем на регулярних наукових семінарах відділу фізики високих енергій Інституту Ядерних Досліджень НАНУ та засіданнях робочої групи КТС експерименту CBM.

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 3 наукових праці, з них 1 стаття у фахових періодичних виданнях України, 1 стаття у реферованих наукових виданнях України (категорія Б), проіндексованих в наукометричній базі даних Scopus (Q3), 1 стаття у реферованому науковому виданні, проіндексованому в наукометричній базі даних Scopus та WoS (Q2). Дисертант є співавтором звіту колаборації CBM про виконання НДДКР.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, основної частини, списку використаних джерел; викладена на 146 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 107 сторінок), містить 56 рисунків, 1 таблицю, список використаних джерел складається з 138 найменувань вітчизняних та зарубіжних авторів (14 сторінок).

Розділ 1. Експеримент СБМ

1.1 Преамбула

Упродовж останнього століття розвиток експериментальних методів ядерної фізики та фізики елементарних частинок призвів до створення прискорювачів, здатних досягати дедалі більших енергій та астрономічних засобів спостереження, що надають можливість дослідження віддалених космічних об'єктів. Це забезпечило можливість описувати явища від масштабу елементарних частинок (10^{-15} м) до астрономічних об'єктів (10^{26} м). Подальший технологічний прогрес і вдосконалення експериментальних методів забезпечили глибше розуміння фундаментальних характеристик матерії. Встановлено, що вся речовина у Всесвіті складається з обмеженого набору елементарних частинок, властивості та взаємодії яких визначаються чотирма базовими силами, за винятком гравітаційної взаємодії, яка описується Загальною теорією відносності, три інші взаємодії узагальнюються в межах Стандартної моделі (СМ) [1].

1.1.1 Стандартна Модель

СМ було сформовано упродовж другої половини 20-го століття. У СМ було закладено теоретичну основу для опису електромагнітної, слабкої та сильної взаємодій, що дало можливість з високою точністю відтворити майже всі експериментальні результати та передбачити широкий спектр фізичних явищ. Хоча СМ є самоузгодженою та найуспішнішою теорією елементарних частинок, вона не є вичерпною теорією фундаментальних взаємодій.

У межах СМ постулюється існування сімнадцяти елементарних частинок (рис. 1.1). Їх поділяють на два типи: ферміони – складові речовини та бозони – носії взаємодій. Ферміони підпорядковуються статистиці Фермі-Дірака і принципу Паулі та поділяються на кварки і лептони. Кожна з цих підгруп містить по шість частинок, організованих у три покоління. Перше покоління включає найлегші й найстабільніші частинки, з яких складається вся стабільна

матерія у Всесвіті, тоді як частинки другого і третього покоління мають більшу масу та швидко розпадаються у більш стабільні стани.

Три з чотирьох фундаментальних взаємодій можливі завдяки обміну бозонами, що підпорядковуються статистиці Бозе-Ейнштейна. Кожній взаємодії відповідає власний носій: фотон для електромагнітної, W- і Z-бозони для слабкої та глюони для сильної. Взаємодія реалізується через обмін дискретними порціями енергії між цими частинками. Слабка взаємодія описується електрослабкою теорією [2]. Сильна взаємодія характеризується квантовим значенням так званого “кольору”, який може мати три значення, разом із відповідними антикольорами. Перенесення сильної взаємодії здійснюється глюонами, які передають дискретні комбінації кольорів. Сильна взаємодія формалізується у межах квантової хромодинаміки (КХД) [3].

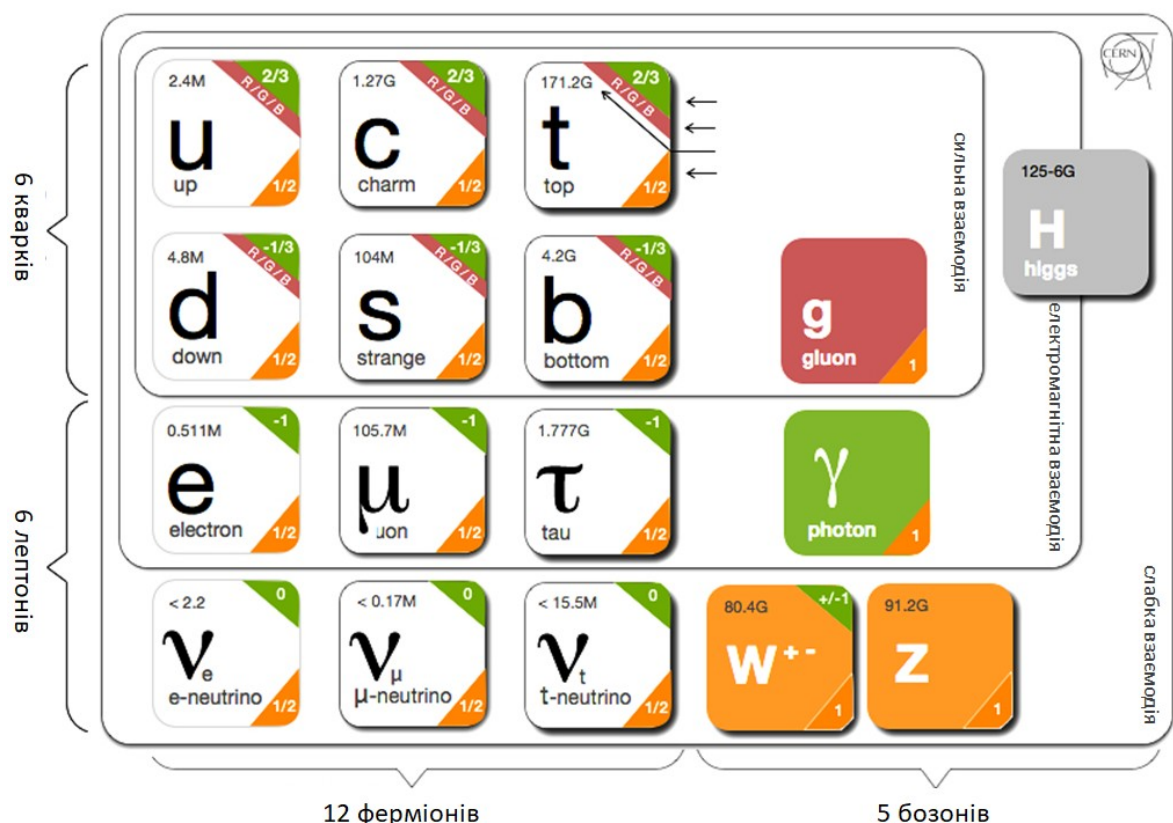


Рис. 1.1 Схематичне зображення категорій елементарних частинок, згідно опису СМ [4].

У рамках КХД існує два важливих явища – конфайнмент та асимптотична свобода. Конфайнмент зумовлює неможливість існування кварків і антикварків у вільному стані. Вони спостерігаються виключно як складові зв'язаних систем – адронів. Асимптотична свобода описує протилежну поведінку: на малих відстанях або за високих енергій взаємодія між кварками істотно послаблюється. Попри відсутність строгого аналітичного доведення конфайнменту, чисельні розрахунки в рамках КХД на ґратці (Lattice QCD) вказують на існування умов, за яких конфайнмент зникає. За таких умов формується новий стан речовини – кварк-глюонна плазма (КГП), у якій кварки та глюони здатні рухатися вільно в об'ємі, що перевищує типові адронні масштаби ($\sim 10^{-15}$ м). Передбачається, що така фаза матерії може існувати також у надщільних внутрішніх шарах деяких астрофізичних об'єктів, зокрема нейтронних зір.

Наразі експериментальні дані, отримані на колайдерах RHIC та БАК [5], демонструють, що гідродинамічний підхід забезпечує узгоджений опис КГП-стану, що свідчить про утворення майже ідеальної сильно взаємодіючої КГП-рідини. У сучасних прискорювальних експериментах, КГП є коротко живучим проміжним станом у зіткненнях важких іонів ($\sim 10^{-23}$ с), що унеможлиблює її безпосереднє дослідження. Про її існування свідчать виключно її вплив на еволюцію ядерного середовища та кінцеві спектри вторинних частинок, що з нього утворюються. До основних непрямих ознак КГП належать аномалії колективних потоків [6, 7], пригнічення утворення J/ψ частинок [8], загасання струменів (jet quenching) [9], а також зміни в утворенні дивних частинок [10]. Важливими додатковими ознаками є випромінювання фотонів та дилептонів [5, 11].

1.1.2 Фазова діаграма КХД

Речовини у Всесвіті, залежно від температури та тиску, можуть перебувати в різних фазових станах. Зміна цих параметрів зумовлює фазові переходи. Фазові межі зазвичай описуються фазовими діаграмами, у яких

температура розглядається як функція тиску або як функція відповідних термодинамічних параметрів. На рисунку 1.2 представлено гіпотетичну фазову діаграму сильно взаємодіючої матерії у просторі температури T та баріонного хімічного потенціалу μ_B . Дослідження такої фазової діаграми є одним із ключових напрямів сучасної фізики високих енергій [12]. На відміну від різноманітних фазових діаграм у фізиці конденсованих середовищ, фазова діаграма, що досліджується у зіткненнях важких іонів, є унікальною та фундаментальною характеристикою КХД.

Експериментальні результати, отримані на RHIC та БАК, надали переконливі докази існування вільних кварків та глюонів поблизу нульових значень баріонного хімічного потенціалу (μ_B) та при температурах, що перевищують 156 MeV [13]. Подальше охолодження та розширення системи призводить до формування адронної матерії через безперервний фазовий перехід. Передбачається, що аналогічний процес відбувався у ранньому Всесвіті упродовж перших мікросекунд після Великого вибуху.

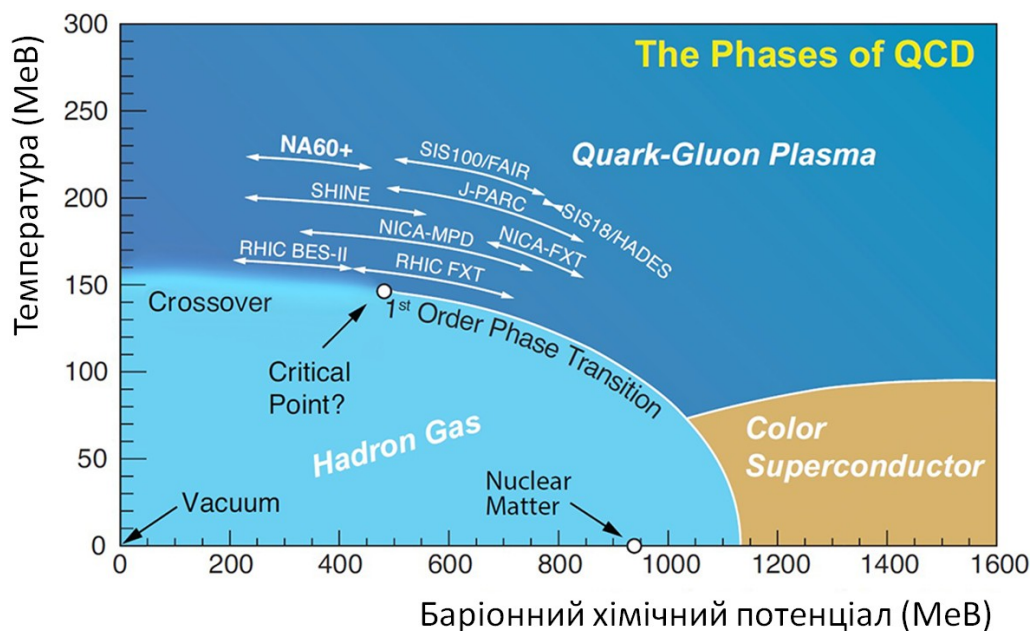


Рис. 1.2 Схематичне зображення фазової діаграми сильно взаємодіючої матерії, представленої в площині температури та баріонного хімічного потенціалу [14].

1.1.3 Матерія за високих баріонних густин

Дослідження властивостей, рівняння стану та ступенів вільності щільної баріонної матерії має фундаментальне значення для сучасної ядерної та астрофізики, зокрема у контексті опису об'єктів таких як нейтронні зорі [15, 16].

Нейтронні зорі можна розглядати як природні лабораторії, в яких реалізуються стани холодної щільної сильно взаємодіючої ядерної матерії [17]. Попри значний прогрес експериментів із зіткненням важких іонів та чисельних розрахунків у рамках КХД на ґратці, саме нейтронні зорі залишаються єдиними відомими природними об'єктами, що забезпечують доступ до холодної щільної КХД-матерії [16, 18].

Компактні зорі характеризуються внутрішньою динамікою, що визначається сукупною дією всіх фундаментальних взаємодій. Типові маси таких об'єктів становлять близько 1.4 маси Сонця, а радіуси – у межах 10-14 км [19]. Густина ядра може перевищувати густину ядерного насичення більш ніж у п'ять разів. Отже, властивості таких зір значною мірою визначаються рівнянням стану щільної баріонної матерії [17]. Оскільки температури в нейтронних зорях значно менші за 1 MeV, їхній стан на фазовій діаграмі КХД відповідає області великих хімічних потенціалів та низьких температур. За таких умов очікується реалізація надплинних та/або надпровідних фаз сильно взаємодіючої матерії [16, 18].

Інтерес до фізики щільної матерії суттєво посилюється після серпня 2017 року, коли колаборація LIGO–Virgo вперше зареєструвала гравітаційно-хвильовий сигнал від злиття подвійної системи нейтронних зір GW170817 [20].

1.1.4 Зіткнення важких іонів

Розрахунки теоретичних моделей свідчать, що зіткнення важких іонів за помірних енергій пучків є ефективним методом формування та дослідження сильно взаємодіючої матерії при високих баріонних густинах у лабораторних умовах [7, 21]. На сьогодні існує декілька експериментів, спрямованих на

дослідження різних областей фазової діаграми КХД. Зокрема, програми на прискорювачах RHIC (Brookhaven National Laboratory) та БАК (CERN) досліджують КПП у області низьких баріонних густин і високих температур [22], відтворюючи умови раннього Всесвіту через кілька мікросекунд після Великого вибуху. Результати отримані в експериментах ALICE [23] та STAR [24] вказують на домінування партонних ступенів вільності на початкових стадіях еволюції гарячої та щільної сильно взаємодіючої матерії – “вогняної кулі” (fireball) [18]. Водночас доступна статистика та характеристики детекторних систем [25] обмежують точність вимірювання низки спостережуваних величин, чутливих до властивостей щільної ядерної матерії. Це зумовлює необхідність забезпечення високих частот взаємодій пучок-пучок (пучок-мішень). Частоти взаємодій у сучасних і запланованих установках наведено на рисунку 1.3.

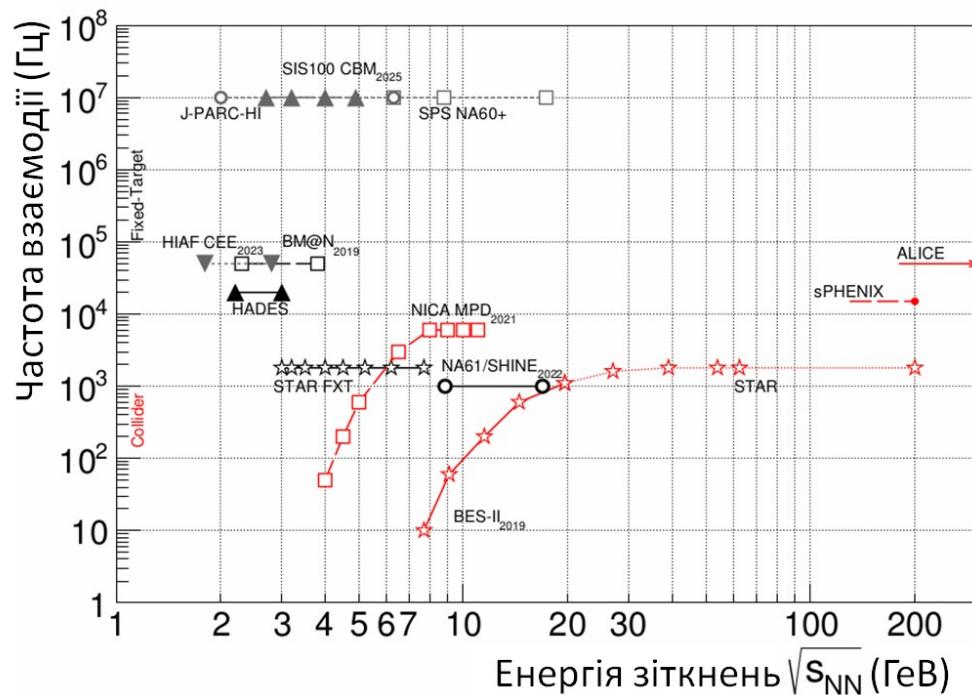


Рис. 1.3 Частоти взаємодій та енергії в системі центру мас для існуючих і запланованих експериментів із важкими іонами [26]. Зокрема, експеримент CBM характеризується високою частотою подій, яка перевищує частоти інших експериментальних установок на 2-3 порядки.

1.2 FAIR. CBM

Центр дослідження антипротонів та іонів FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Дармштадті (Німеччина) відкриває нові можливості для дослідження області високих баріонних густин. Початкова модульна конфігурація FAIR передбачає використання кільцевого прискорювача SIS100, який забезпечуватиме енергії пучків іонів золота до 14 GeV на нуклон ($\sqrt{s_{NN}} = 4.9$ GeV), для ядер із $Z = N$ до 15 GeV на нуклон, а також до 29 GeV для протонних пучків.

Експеримент з дослідження Щільної Баріонної Матерії – CBM (Compressed Baryonic Matter) належить до експериментів нового покоління, реалізація якого відбувається у центрі FAIR [27]. Фізична програма CBM є однією з найбільш широких та перспективних у галузі фізики важких іонів. Основною метою експерименту є дослідження фазової діаграми КХД в області високих баріонних густин та помірних температур шляхом аналізу зіткнень іонів та протонів. Важливою особливістю CBM є надзвичайно висока частота подій, яка на кілька порядків перевищує показники інших сучасних експериментальних установок [28]. Наразі експеримент розробляється міжнародною колаборацією, до якої входять наукові установи з Німеччини, Індії, Румунії, Польщі, України та інших країн [27].

1.2.1 Центр дослідження антипротонів та іонів FAIR

Міжнародний науковий центр FAIR створить унікальні умови для фундаментальних досліджень у галузях ядерної, атомної та фізики плазми та для прикладних досліджень у радіаційній біофізиці та матеріалознавстві [27, 29]. Фундаментом прискорювального комплексу слугуватимуть модернізовані установки UNILAC та SIS18, які виконуватимуть роль інжекторів. Подальше прискорення забезпечуватиме синхротрон SIS100 довжиною 1084 м. Для його модернізації, передбачено можливість встановлення SIS300 в тому самому тунелі для досягнення вищих енергій. Ключова відмінність між цими

синхротронами полягає у величинах магнітної жорсткості – 100 Тл·м та 300 Тл·м. На рисунку 1.4 представлено існуючі та майбутні компоненти FAIR.

FAIR стане одним із наймасштабніших та технологічно складних прискорювальних комплексів у світі, унікальність якого полягатиме у здатності формувати пучки практично всіх хімічних елементів, їхніх іонів, а також протонів і антипротонів. Наукова програма FAIR була розроблена в межах чотирьох основних колаборацій: APPA (Atomic, Plasma and Applications), CBM, NuSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions) та PANDA (anti-Proton Annihilation at Darmstadt). APPA орієнтована на дослідження фундаментальних взаємодій і симетрій та розвиток медичних застосувань ядерної фізики. NuSTAR – на вивчення структури атомних ядер і процесів ядерної астрофізики. PANDA – на дослідження антиматерії, сильної та слабкої взаємодій, екзотичних станів речовини та структури адронів.

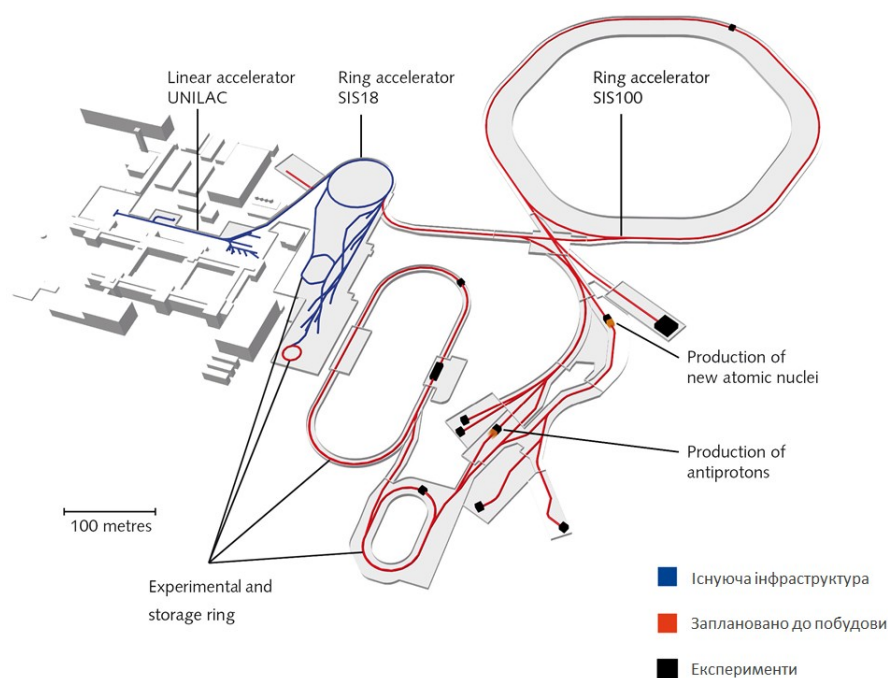


Рис. 1.4 Схема центру FAIR. Синім кольором позначено наявні компоненти GSI, червоним відображено нову прискорювальну інфраструктуру [27].

1.2.2 Експеримент CBM

Експеримент CBM є експериментом наступного покоління, що планується до введення в експлуатацію у центрі FAIR. Його дослідницька

програма орієнтована на вивчення фазової діаграми КХД у області високих баріонних густин. У межах цієї програми очікується виявлення фазового переходу першого роду від адронної до партонної матерії та дослідження хірального фазового переходу.

Детекторна система CBM реалізована як форвардний спектрометр із фіксованою мішенню та із використанням швидкодійних та радіаційно стійких детекторів. Вона ґрунтується на використанні зчитувальної електроніки з новою концепцією онлайн-реконструкції подій, що принципово відрізняється від традиційного тригерного підходу. Конструкцію детектора CBM оптимізовано для роботи за високих частот подій (до 10 МГц), що забезпечує прецизійні вимірювання флуктуації потоків вторинних частинок так і рідкісних процесів [30]. На поточному етапі експеримент перебуває на завершальній стадії розробки та будівництва.

Фізична програма експерименту CBM

Фізична програма експерименту CBM спрямована на дослідження рівняння стану речовини при густинах, близьких до густин в ядрах нейтронних зірок та на пошук можливого фазового переходу від адронної матерії до КГП, критичної точки фазової діаграми КХД [30, 31]. Потенційно, CBM дозволить дати відповідь на такі фундаментальні питання:

- Рівняння стану речовини та відповідні ступені вільності при високих баріонних густинах. Існує фазового переходу від адронної матерії до КГП та області співіснування цих фаз.
- Зміна властивостей адронів у щільному баріонному середовищі.
- Можливість розширення таблиці “дивних” елементів шляхом утворення одно- та дво-дивних гіперядер.

З метою пошуку відповідей на ці питання, експеримент CBM здійснюватиме дослідження з використанням зіткнень пучків важких іонів та протонів із фіксованими мішенями з важких елементів при енергіях пучка в

діапазоні 2-29 ГеВ на нуклон (до 14 ГеВ для іонів золота та до 29 ГеВ для протонів і легких ядер із $Z/A = 1/2$) [27]. Інтенсивність пучків SIS100 сягатиме до 10^9 іонів/с, що за ймовірності взаємодії з мішенню близько 1% забезпечить до 10^7 подій за секунду. Використання пучків високої інтенсивності з детекторною системою, здатною працювати за високих частот подій, створює унікальні умови для всебічного дослідження КХД при максимально можливих у лабораторних умовах баріонних густинах. Це проілюстровано на рисунку 1.5 [32], де густина енергії збудження в центрі області зіткнення представлена як функція баріонної густини для центральних Au-Au зіткнень. Згідно з результатами симуляцій, вже при енергіях пучка 10 ГеВ на нуклон можливо досягнути густин, що перевищують густину ядерного насичення приблизно у 8 разів. За таких умов, теорія передбачає перехід до змішаної фази баріонів і кварків.

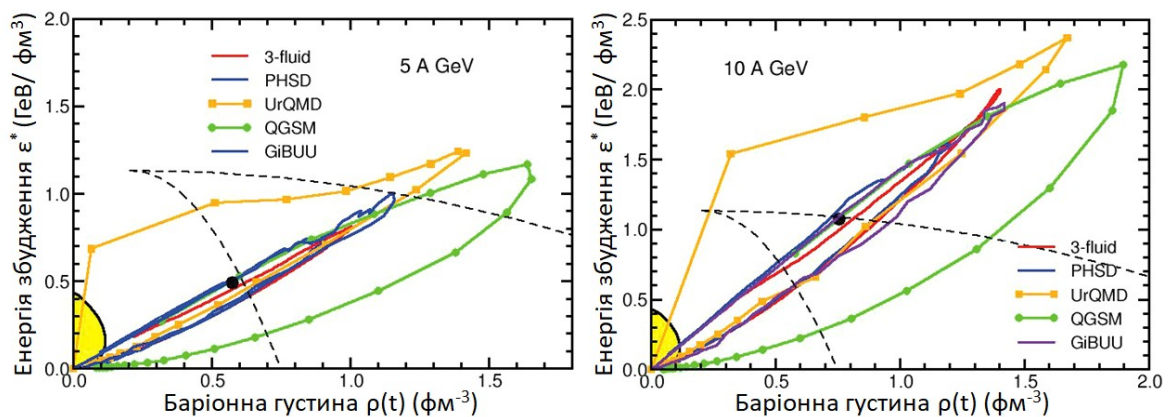


Рис. 1.5 Еволюція енергії збудження в центрі “вогняної кулі” як функція баріонної густини, обчислена за допомогою різних транспортних моделей і трирідинного гідродинамічного коду. Зіткнення Au-Au змодельовані для двох різних режимів прискорювача – при 5 ГеВ (ліворуч) та 10 ГеВ (праворуч) на нуклон відповідно [30].

Вимірювані величини

З огляду на складність кінцевого стану у зіткненнях важких іонів, вилучення корисної інформації потребує проведення систематичних вимірювань, дослідження функцій збудження, залежностей від розміру

системи та багатодиференціальних розподілів у фазовому просторі для ідентифікованих частинок, включно з колективними потоками та флуктуаціями подій.

Флуктуації величин між зіткненнями

Поблизу фази деконфайнменту спостерігається суттєве посилення флуктуацій густини матерії, що може спричинити флуктуації баріонного числа, дивності та електричного заряду. Такі флуктуації мають безпосередній зв'язок із термодинамічними властивостями утвореної системи та можуть слугувати в якості сигналів для дослідження властивостей речовини, сформованої в умовах високоенергетичних зіткнень [33].

Колективний потік

Особливе значення має радіальний ізотропний потік адронів, що утворюються внаслідок зіткнень важких іонів, який відображає стан системи на стадії кінетичного “заморожування”, тобто в момент припинення пружних зіткнень між частинками. Водночас анізотропні компоненти потоку формуються під впливом градієнтів тиску, що виникають через початкову просторову неоднорідність густини. Такі ефекти забезпечують чутливість до рівняння стану щільної ядерної матерії [30].

Дивність

У межах досліджень ядерних зіткнень при енергіях, характерних для FAIR, особливого значення набувають високоточні вимірювання потоків, імпульсних та кутових розподілів багатодивних гіперонів. Такі спостереження відкривають можливість реконструкції рівноважного стану “вогняної кулі”. Утворення дивних частинок розглядається як фундаментальний сигнал, що може бути безпосередньо пов'язаний із фазовим переходом до стану деконфайнменту.

Відкритий та прихований чарм

Потоки утворених адронів, що містять чарм-кварки, є сигналами чутливими до стану речовини на ранніх етапах еволюції “вогняної кулі”, оскільки пари $c\bar{c}$ кварків формуються виключно внаслідок процесів на

початковій стадії зіткнень ядер. Подальша адронізація цих пар у D-мезони, чармовані баріони або чармонії суттєво визначається характером їхньої взаємодії із утвореним середовищем [30].

Лептонні пари

Короткоживучі векторні мезони розпадаються з утворенням дилептонних пар ($\rho, \phi, \omega \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$), які взаємодіють із навколишнім середовищем виключно через електромагнітну взаємодію. Завдяки відсутності подальших сильних або слабких взаємодій під час виходу з утвореного середовища, дилептони слугують безпосереднім сигналом термодинамічних параметрів системи в момент їх утворення.

Детекторна система CBM

Експеримент CBM характеризується широкою фізичною програмою, що охоплює дослідження розподілів у фазовому просторі та колективних потоків частинок. Багато з ключових спостережуваних величин є рідкісними та слабкими сигналами, які несуть інформацію про стадію еволюції “вогняної кулі” [18]. Детекторна система CBM спроектована для вимірювання з безпрецедентною точністю та статистикою колективної поведінки адронів разом із рідкісними сигналами. Більшість цих частинок буде досліджено вперше в енергетичному діапазоні FAIR. Для досягнення необхідної статистики, вимірювання виконуватимуться при частотах подій до 10 МГц, що зумовлює потребу у використанні надшвидких і радіаційно стійких детекторів, новітньої концепції зчитування та аналізу даних, що включає безтригерну передню електроніку (FEE) та високопродуктивного обчислювального кластера для онлайн-відбору подій [18]. CBM було спроектовано як багатофункціональний детектор, здатний реєструвати адрони, електрони та мюони в p-p, p-Au та Au-Au зіткненнях в усьому діапазоні енергій пучка FAIR. Детектор має кутову апертуру в межах від 2.5° до 25°. Оцінена швидкість потоку даних для всього експерименту в Au-Au зіткненнях становить близько 1 ТБ/с, тому швидкі алгоритми реконструкції та відбору подій

працюватимуть в режимі реального часу з метою зменшення обсягу збережених даних.

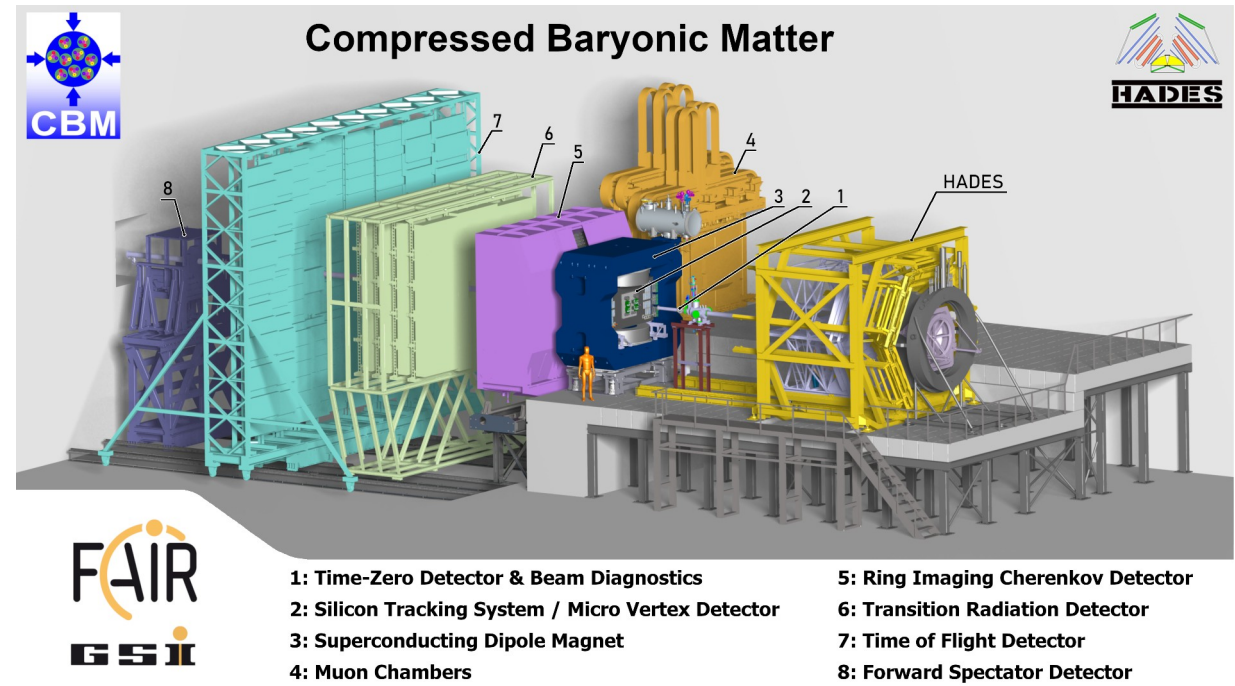


Рис. 1.6 Детекторна система CBM із її підсистемами в кінцевому положенні та детектор HADES як частина FAIR.

Табл. 1.1 Підсистеми CBM, що використовуються для реєстрації певних типів частинок позначені символом ✓. Підсистеми, що можуть сприяти зменшенню фону, позначені використовуючи (✓) [33].

Частинка	MVD	STS	RICH	MUC	TRD	TOF	FSD
	Н						
π , K, p	✓	✓	(✓)		(✓)	✓	✓
Гіперони		✓			(✓)	(✓)	✓
Відкритий чарм	✓	✓	(✓)		(✓)	✓	✓
Електрони	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Мюони		✓		✓		(✓)	✓
Гамма							✓
Гамма через $e^{\pm}$ анігіляцію	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Схематичне зображення детекторної системи CBM, включно з експериментом HADES (High-Angle Di-Electron Spectrometer), наведено на рисунку 1.6. Детектор CBM може працювати у двох режимах. Перший режим оптимізовано для ідентифікації електронів (у ньому задіяні всі підсистеми, окрім MUCH), другий режим використовуватиметься для ідентифікації мюонів (RICH замінюється на MUCH). Далі розглянуто основні складові детекторної системи CBM.

Надпровідний дипольний магніт

Надпровідний дипольний магніт призначений для викривлення траєкторій заряджених частинок. Він є ключовим елементом для визначення імпульсів усіх заряджених частинок. Використання надпровідних технологій зумовлене необхідністю зниження експлуатаційних витрат. Надпровідний дипольний магніт створює магнітне поле 1 Т·м в області взаємодії [34].

Мікровершинний детектор (MVD)

Основним завданням MVD є відокремлення первинних від вторинних вершин, зокрема для реконструкції розпадів чармованих адронів (D-мезони або Λ_c баріони).

MVD розташований безпосередньо за мішенню (на відстані 5 – 20 см за напрямом пучка) всередині дипольного магніту. Монолітні активні піксельні сенсори CMOS (MAPS) використовуються для виконання вимог щодо високої просторової роздільної здатності, низького матеріального бюджету та радіаційної стійкості. Через обмежену швидкість зчитування MVD використовуватиметься лише при частотах подій взаємодії до 1 МГц [35, 36].

кремнієва трекерна система (STS)

КТС є головним трекерним детектором CBM. Він відповідає за детектування треків заряджених частинок та визначення їх імпульсів. Детальний опис КТС наведено в наступному розділі.

Мюонна система (MUCH)

MUCH у поєднанні зі КТС є основними детекторами для дослідження дво-мюонних каналів розпаду векторних мезонів (ρ , ω , ϕ , J/ψ), реконструкція

яких потребує високоточної ідентифікації мюонів [37]. Система MUCH розташована за детектором KTC і замінює детектор RICH у мюонній конфігурації CBM.

Детектор черенковського випромінювання (RICH)

Детектор RICH призначений для ідентифікації електронів за допомогою черенковського випромінювання [38] та пригнічення піонів у діапазоні імпульсів до 8 GeV/c. RICH розташований за дипольним магнітом на відстані близько 1.6 м від мішені та використовується в електрон-адронній конфігурації CBM. Фотодетектори використовують багатокатодні фотопомножувачі, що забезпечують високу гранулярність та високу ефективність реєстрації фотонів [39].

Детектор перехідного випромінювання (TRD)

TRD доповнює RICH для ефективного вимірювання діелектронів. Також TRD забезпечує реєстрацію треків між RICH і TOF та використовується як трекерний детектор у мюонній конфігурації CBM. Детектор розташований приблизно на відстані 5 м від мішені та складається з однієї станції з чотирма шарами.

Часопрольотний детектор (ToF)

Основною метою TOF є ідентифікація адронів: піонів, каонів і протонів. Частинки з однаковим імпульсом мають різні швидкості через різні маси, що використовується для їх розрізнення. TOF розташовано на відстані 6 м від мішені (для енергій SIS100) [40] та покриває площу близько 120 м².

Форвардний-спостерігач (FSD)

FSD є модульним свинцево-сцинтиляційним калориметром, що забезпечує високу та однорідну енергетичну роздільну здатність. FSD використовується для визначення центральності зіткнень та орієнтації площини реакції. Він складається з 44 модулів, кожен із яких містить 60 шарів свинець-сцинтилятор розміром 20 × 20 см² [41].

Система відбору подій першого рівня (FLES)

Фізична програма CBM вимагає високої статистики, що зумовлює високі частоти взаємодій та великий обсяг даних. У традиційних системах збору даних максимальна частота становить близько 100 кГц. У CBM використовується концепція безапаратного тригера – всі необроблені дані передаються до обчислювального кластера в реальному часі. FLES є спеціалізованим обчислювальним кластером, що зменшує обсяг даних більш ніж на два порядки, зберігаючи можливість повної реконструкції подій [42].

1.3 Кремнієва трекерна система

Кремнієва трекерна система є головним трекерним детектором експерименту CBM. Головним завданням КТС є вимірювання імпульсів заряджених частинок із роздільною здатністю 1.5% для імпульсів $p \geq 1$ GeV/c та реконструкція їхніх треків з ефективністю 95% для імпульсів $p \geq 1$ GeV/c. З метою мінімізації багаторазового кулонівського розсіяння, утворення дельта-електронів та електроні конверсії, трекер повинен складатися із мінімальної кількості матеріалу. Нижче наведено деякі з ключових вимог, що враховувалися при розробці системи:

- Система має бути розміщена в об'ємі приблизно $1.4 \times 2.3 \times 1.3$ м³ всередині надпровідного дипольного магніту CBM,
- Детектор має забезпечувати можливість реєстрації до 1000 частинок при одному центральному Au-Au зіткненні за частот взаємодії 10 МГц,
- Зчитування сигналів із сенсорів здійснюватиметься за допомогою швидкої передньої електроніки із самозапуском (self-triggering),
- Передня електроніка повинна забезпечувати надійну роботу в умовах радіаційного навантаження до 100 крад/рік,
- Система охолодження має забезпечувати відведення до 50 кВт теплової потужності з об'єму детектора.

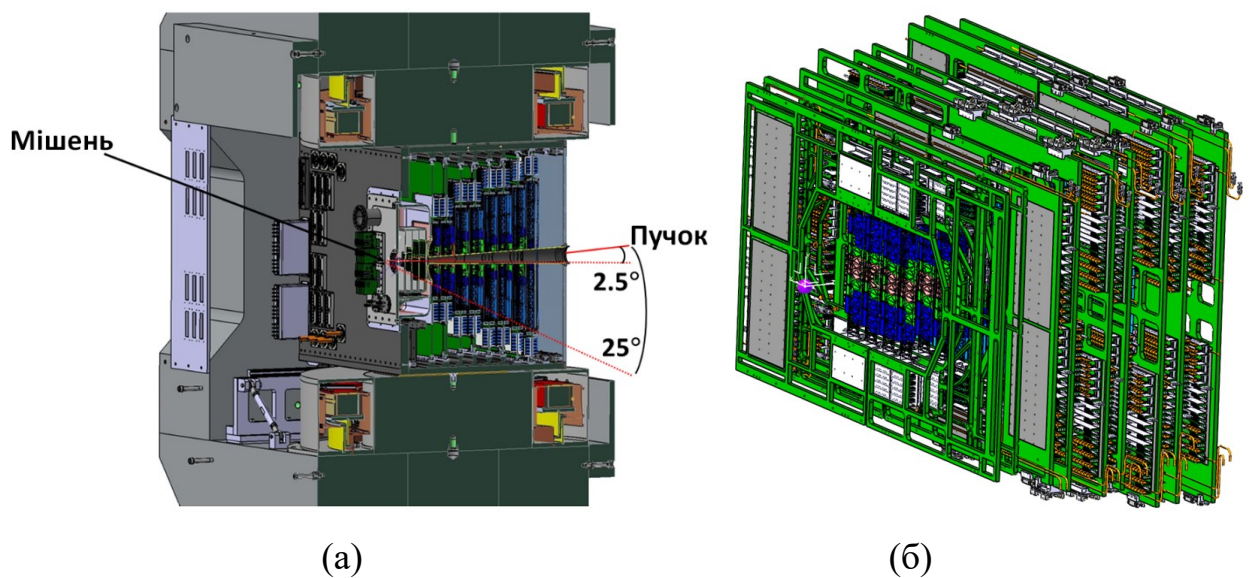


Рис. 1.7 (а) КТС розміщено всередині надпровідного дипольного магніту на відстані від 30 см до 100 см за мішенню (вниз за потоком); (б) Вісім змонтованих трекерних станцій.

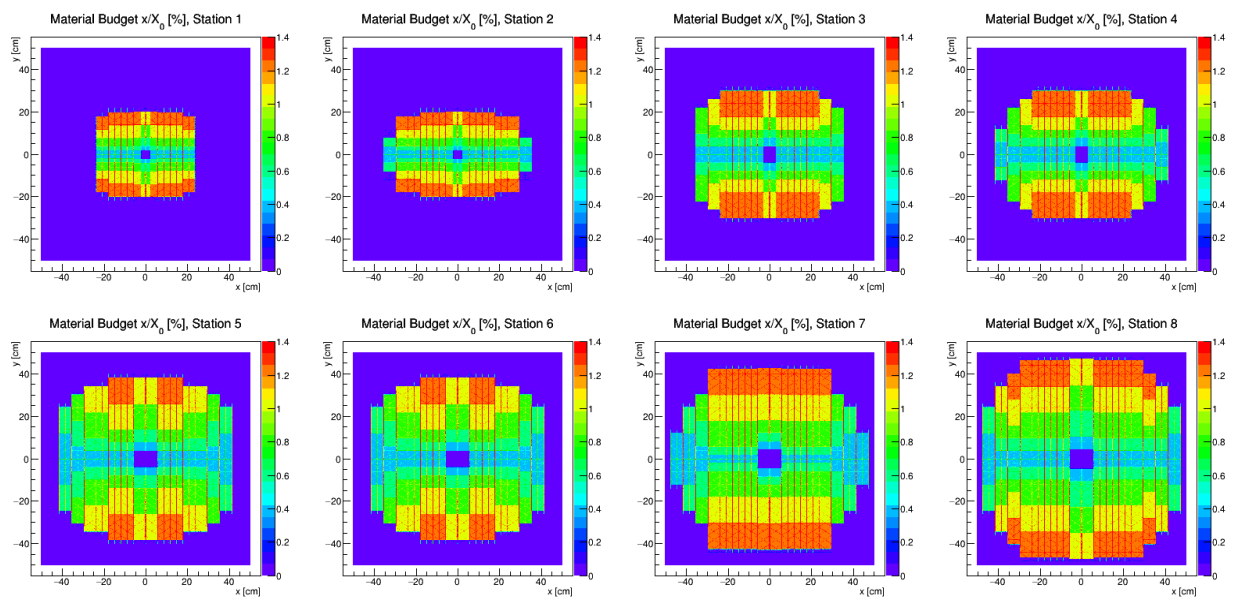


Рис. 1.8 Візуалізація розподілу матеріального бюджету для восьми станцій КТС з урахуванням усіх опорних конструкцій та кабелів.

Система містить 876 двосторонніх кремнієвих мікростріпових сенсорів, що складають 8 трекерних станцій. КТС розміщена на відстані від 30 до 100 см від мішені всередині дипольного магнітного поля 1 Т·м [43]. Детекторні модулі встановлено на легких вуглецевих каркасних конструкціях [44], при

цьому зчитувальна електроніка розташована на периферії детектора. Сигнали від сенсорів передаються до передньої електроніки через надтонкі кабелі довжиною до 50 см [43]. Очікується, що внутрішні сенсори КТС повинні витримувати неіонізуюче навантаження до 10^{14} 1 MeV n_{eq} та іонізуючу дозу близько 1.1 Мрад за період роботи SIS100. На рисунку 1.7.а зображено схему восьми трекерних станцій КТС всередині дипольного магніту, на рисунку 1.7.б – детекторні модулі, змонтовані на легких вуглецевих конструкціях. Загальний матеріальний бюджет становить до 1.3% X_0 на трекерну станцію.

Детектор КТС буде розміщено в термічно ізольованому контейнері, що встановлюється в апертурі дипольного магніту. Зазначений контейнер виконує функцію опорної конструкції для детекторів КТС та MVD, а також для мішені та іонопроводу. У процесі експлуатації вся система безперервно випромінює теплову енергію на рівні приблизно 50 кВт. Найбільший внесок у тепловиділення має передня та зчитувальна електроніка, тоді як решта тепла переважно генерується низьковольтними кабелями живлення, теплообміном через стіни контейнера КТС, а також, незначною мірою, сенсорами (приблизно 6 мВт/см²) [43]. Підвищення температури в системі призводить до зростання струму витоку детектора I_{leak} . Це, у свою чергу, впливає на рівень дробового шуму, що є пропорційним до $\sqrt{I_{leak}}$. Крім того, струм витоку детектора збільшується зі зростанням дози опромінення [45].

З метою утримання робочої температури в заданому діапазоні, система охолодження має забезпечувати функціонування сенсорів за температур нижче за -5° С. Оскільки теплообмін у межах апертури повинен реалізовуватися з використанням мінімальної кількості матеріалу, це зумовлює застосування газової конвекції в об'ємі КТС. Рівень вологості необхідно підтримувати на низькому рівні для запобігання конденсації вологи на сенсорах. Для охолодження електроніки обрано тепловідведення на основі CO₂, що пояснюється його високим об'ємним коефіцієнтом теплообміну. Охолоджувальні блоки будуть жорстко з'єднані з корпусами, що містять передню електроніку, розташовану у верхній та нижній частинах КТС [43].

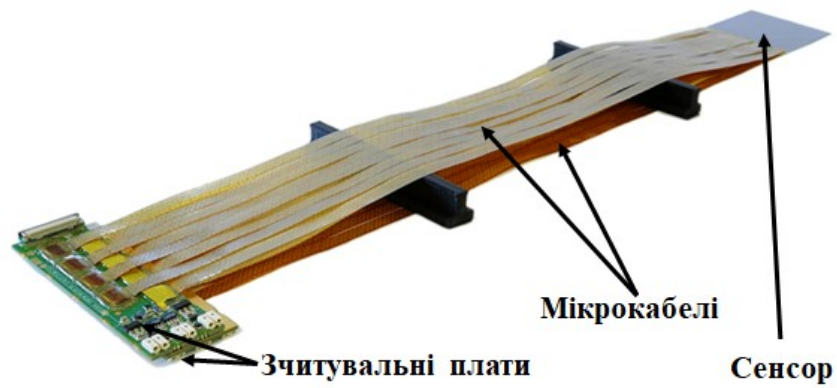
1.3.1 Детекторний модуль КТС

Базовим блоком системи КТС є детекторний модуль. Він складається з двостороннього кремнієвого мікстріпового сенсора, з'єданого з двома передніми зчитувальними платами (front-end board - FEB) за допомогою надтонких мікрокабелів. Кожна сторона сенсора містить 1024 стріпи та підключена до FEB, що має 8 спеціалізованих інтегральних схем STS-XYTER (Application-Specific Integrated Circuit - ASIC). Групи з 128-ти стріпів з'єднані із парою мікрокабелів, що передають аналогові сигнали до передньої електроніки [43]. Фотографію прототипу модуля наведено на рисунку 1.9.а. Фотографію прототипу напів ланки наведено на рисунку 1.9.б.

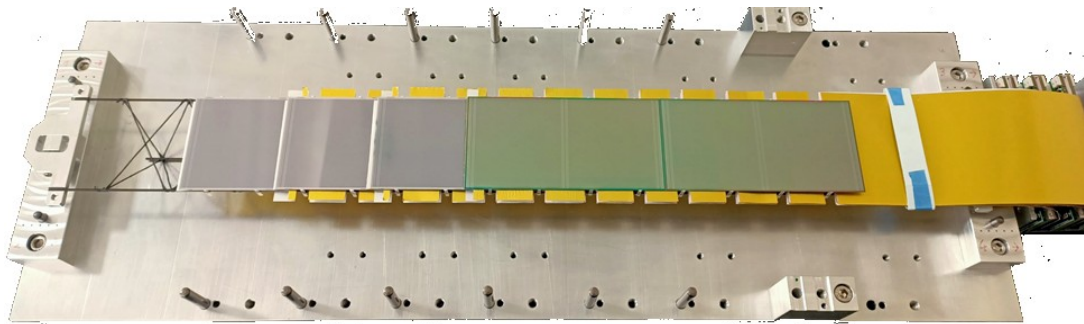
Мікстріпові сенсори були виготовлені компанією Hamamatsu Photonics KK (Японія). Мікрокабелі було розроблено та виготовлено в LTU (Харків, Україна) [46]. Зчитувальний інтегральна схема STS-XYTER була розроблена в AGH University of Science and Technology (Краків, Польща) [47, 48].

Множинність заряджених частинок у межах апертури детектора сягатиме значень до 10^3 . Залежно від їхнього розташування у детекторі, модулі мають різні форм-фактори (розміри сенсорів та довжини мікрокабелів). Менші сенсори з коротшими стріпами будуть розміщені у центрі КТС, поблизу іонопроводу, з високою концентрацією подій. Це дозволить зменшити частоту реєстрації подій на один сенсор та, відповідно, спростити процедуру реконструкції. Усі сенсори встановлюються з перекриттям з метою мінімізації “мертвих” зон. Для уникнення накладання подій, швидка передня зчитувальна електроніка забезпечуватиме часову роздільну здатність на рівні < 5 нс.

Приблизно 14000 ASIC-мікросхем необхідні для зчитування сигналів із $\sim 1.8 \cdot 10^6$ стріпів. Опромінення детекторних модулів призводить до низки негативних ефектів, зокрема: зростання струму витоку та зміни ефективної концентрації домішок, а також зниження ефективності збору утвореного заряду.



(а)



(б)

Рис. 1.9 (а) Детекторний модуль КТС із мікροстріповим сенсором розміром $62 \times 62 \text{ мм}^2$ без екранувальних шарів [49]. Для передачі сигналу використовуються два шари мікрокабелів з алюмінієвими провідниками; (б) Зібраний прототип половини драбини з п'ятьма мікροстріповими сенсорами. Ліворуч видно опорну конструкцію з вуглецевого волокна.

Кремнієвий мікροстріповий сенсор

Кремнієві сенсори є ключовими елементами сучасних експериментів з фізики високих енергій, що забезпечують ефективний трекінг і визначення імпульсу заряджених частинок завдяки високій швидкості роботи, радіаційній стійкості та просторовій роздільній здатності. Їх ефективність було багатьма сучасними масштабними експериментами [50, 51]. У КТС передбачено використання двосторонніх кремнієвих мікροстріпових сенсорів [52]. Обрану технологію оптимізовано з урахуванням компромісу між ефективністю реконструкції треків і обмеженнями матеріального бюджету. Конструкція сенсорів КТС реалізована у чотирьох варіантах довжини стріпів із

застосуванням двосторонньої мікостріпової технології. Кожна сторона сенсора містить 1024 стріпи з кроком 58 мкм. Використання двосторонніх сенсорів дозволяє визначати двовимірні координати треків [43].

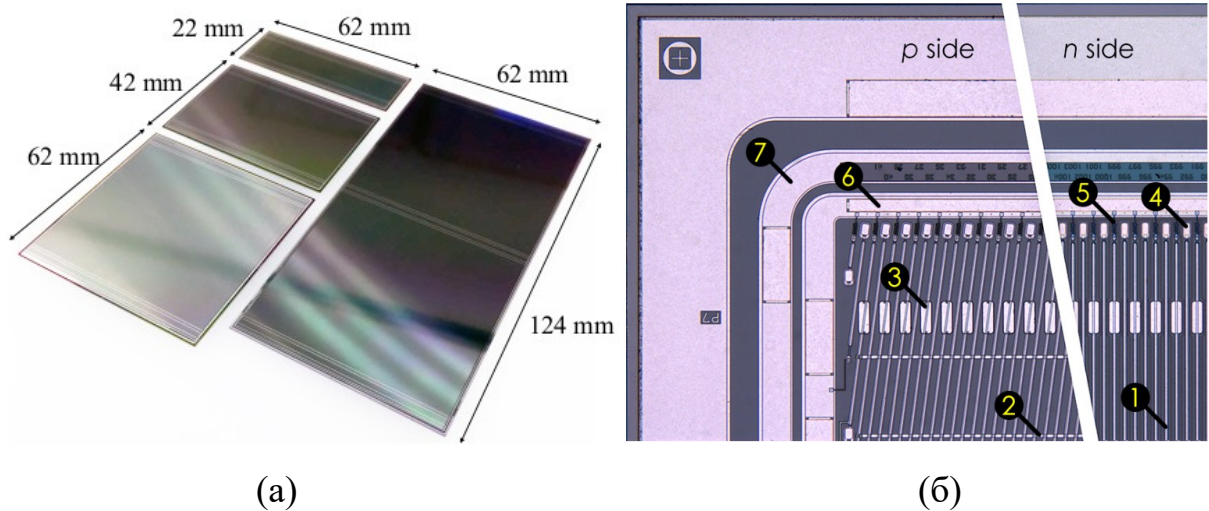


Рис. 1.10 (а) Кремнієві стріпові сенсори CBM06 виготовлені з однаковою шириною (62 мм) та чотирма різними довжинами стріпів (22, 42, 62 та 124 мм); (б) Топологія кремнієвого мікостріпового сенсора: 1 – алюмінієві зчитувальні стріпи, 2 – з’єднувальні стріпи, 3 – АС-контактні площинки, 4 – DC-контактні площинки, 5 – полікремнієві резистори зміщення, 6 – контур зміщення, 7 – захисне кільце.

На рисунку 1.10.а наведено загальний вигляд двосторонніх стріпових сенсорів, що використовуватимуться в КТС, на рисунку 1.10.б представлено фрагмент їх кутової області. Етапи розробки сенсорів, включаючи створення та дослідження прототипів CBM01–CBM05, детально описані в роботах [53–56]. Фінальним прототипом серії є CBM06.

На n-стороні сенсорів стріпи розташовані під прямим кутом відносно сторін сенсора, тоді як на р стороні вони нахилені під кутом 7.5° з метою мінімізації кількості реєстрації “примарних” частинок та одночасного збереження достатньо високої просторової роздільної здатності. Через зміщення стріпів р-сторони виникають короткі стріпи на краях сенсора [57],

з'єднані між собою за допомогою горизонтальних ліній на металевому шарі (схематично зображено на рисунку 1.11). Таким чином, їх можна зчитувати з одного краю.

Як раніше було зазначено, радіаційна стійкість є критично важливою характеристикою кремнієвих мікрострипових сенсорів з огляду на радіаційні умови при їх експлуатації в СВМ. Їх радіаційну стійкість було експериментально підтверджено до флюенсу, що вдвічі перевищує очікуваний за термін роботи [44, 57]. Ефективність збору заряду сенсора зменшується на 15–20% після опромінення до рівня, що вдвічі перевищує зазначене значення.

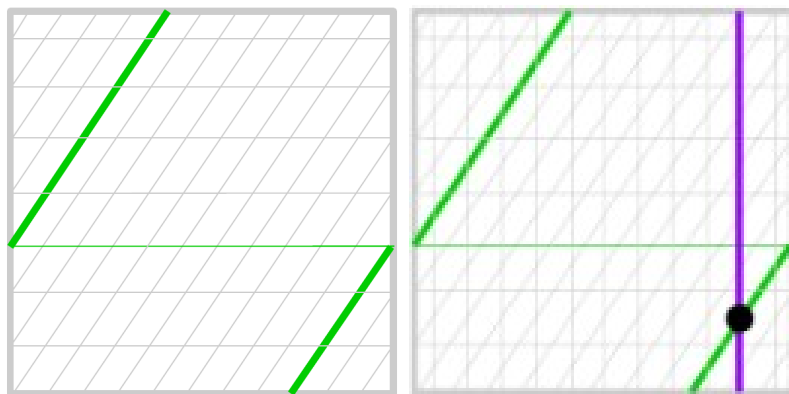


Рис. 1.11 Схема з'єднання стріпів р-сторони. Активується один зелений стріп, однак через наявність другого металевого шару (тонка горизонтальна зелена лінія) геометричну координату неможливо реконструювати однозначно.

Легкі алюміній-поліімідні мікрокабелі

Легкі мікрокабелі використовуються для передачі сигналів від сенсорів до передньої зчитувальної електроніки, яка розміщується на периферії детектора через обмеження, пов'язані з матеріальним бюджетом. Для фінальної конфігурації КТС передбачається застосування мікрокабелів довжиною до 50 см. Мікрокабелі було виготовлено на науково-виробничому підприємстві LTU (Харків, Україна) із застосуванням літографічного процесу на основі алюмінієвої фольги, покритої поліімідом. Кожен кабель складається з двох сигнальних шарів, виготовлених з алюміній-поліімиду, двох сітчастих

розділювальних шарів (товщиною 75 мкм) та екранувального шару. Екранувальні шари необхідні для зменшення електромагнітних наводок та забезпечення електричної ізоляції модулів на несущій конструкції.

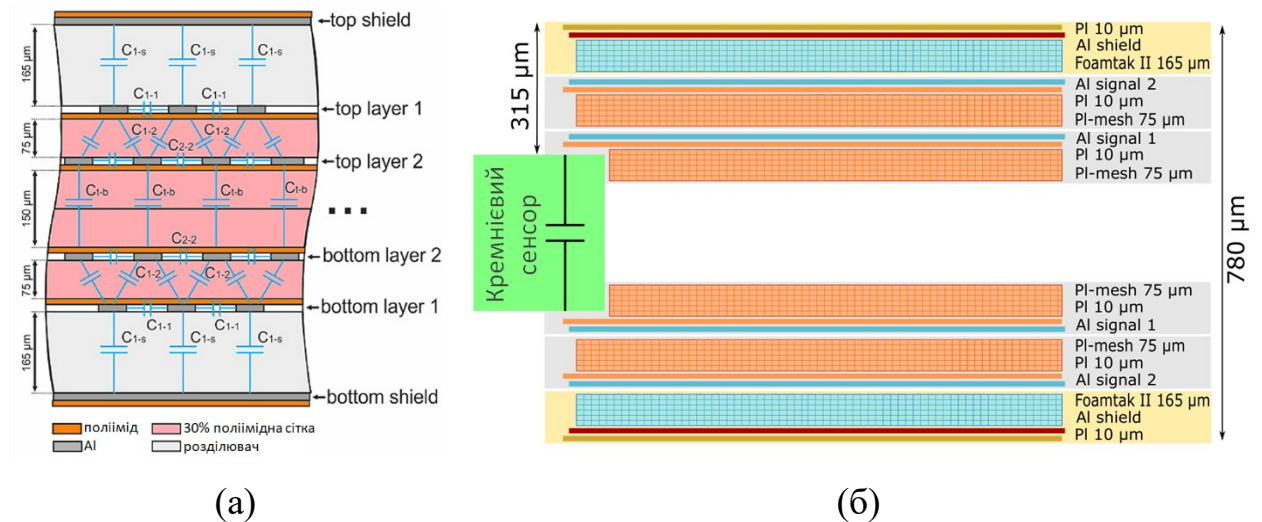


Рис. 1.12 (а) Поперечний переріз стеку зчитувальних мікрокабелів. На схемі проілюстровано ефективні ємності між різними шарами [43]. (б) Поперечний переріз двох шарів мікрокабелів, з'єднаних із кремнієвим сенсором.

Для передачі сигналу використовуються два шари з шириною 45 мкм та кроком 116 мкм. Вони розділені сітчастим прошарком з метою зменшення паразитної ємності. Для зниження кількості матеріалу застосовуються сітчасті прошарки з хрестоподібною структурою. Для одного детекторного модуля використовується 64 кабелі [43]. На рисунку 1.12 наведено поперечний переріз мікрокабелів, приєднаних до кремнієвого сенсора.

Зчитувальна система КТС

Зчитувальна система КТС має забезпечувати зчитування та достатню пропускну здатність для збереження всієї необхідної інформації. З цією метою система зчитування включатиме понад 14000 інтегральних схем STS-XYTER, близько 1792 FEB, 600 зчитувальних плат (ROB) та 2400 оптичних з'єднань між загальними зчитувальними інтерфейсами (CRI) та платами ROB.

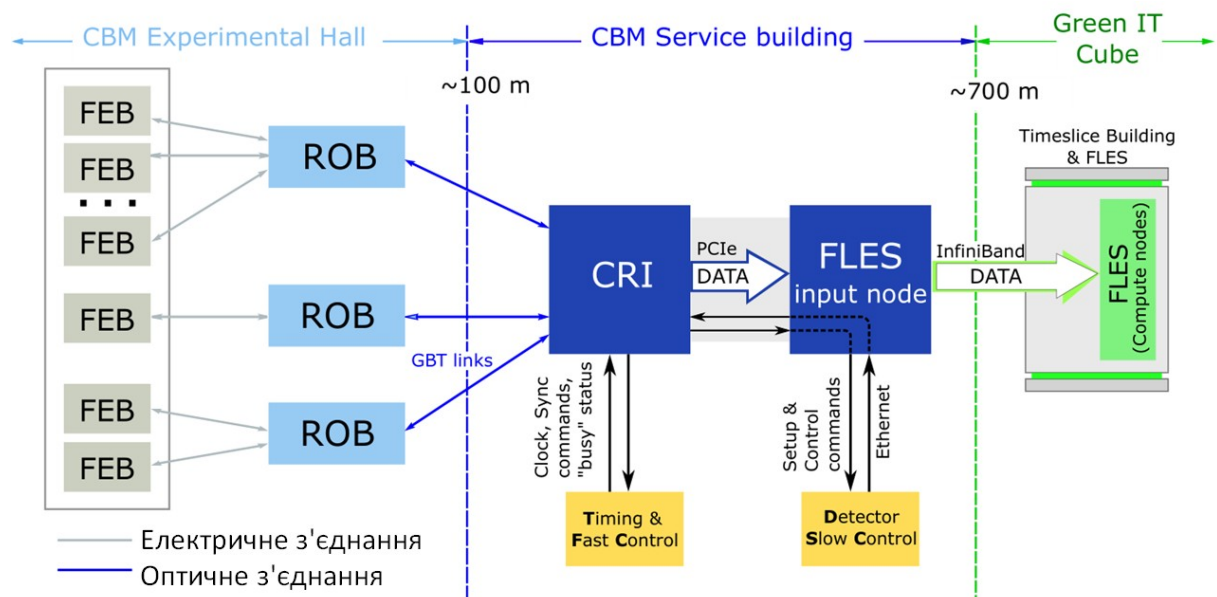


Рис. 1.13 Схема зчитувального ланцюга КТС [61]. Оцифровані дані з FEB обробляються у вузлах ROB та передаються за межі детекторного модуля через швидкісні оптичні лінії зв'язку. Дані передаються на інтерфейс CRI, розміщений у сервісній будівлі експерименту, де здійснюється попередня обробка даних. Високопродуктивний обчислювальний кластер реалізує онлайн-відбір подій із використанням паралельних алгоритмів.

Програма досліджень CBM, реалізація якої можлива лише за умов високих частот взаємодій, накладає жорсткі вимоги на характеристики детектора та системи збору даних (DAQ). У межах CBM буде реалізовано DAQ із безперервним потоком даних без апаратних тригерів, що передбачає поєднання передньої електроніки із самозапуском, швидкої передачі даних у режимі безперервного потоку, онлайн-відбору та реконструкції подій [58, 59]. На рисунку 1.13 наведено узагальнену схему зчитувального ланцюга для КТС. Оцифровані дані з FEB обробляються на ROB та передаються з детектора через оптичні канали. Модулі CRI, розміщені в сервісній будівлі експерименту, виконують попередню обробку даних. Основні компоненти зчитувальної системи CBM:

- Передня зчитувальна плата (FEB): містить 8 інтегральних схем STS-HYTER, кожна з яких зчитує 128 каналів [54].

- Зчитувальна плата (ROB): розроблена на основі CERN GBT (Giga Bit Transceiver) ASIC, здійснює обробку даних від однієї або кількох FEB та забезпечує електрично-оптичний інтерфейс [60].
- Загальний зчитувальний інтерфейс (CRI): плата на основі програмованої користувачем вентиляційної матриці (FPGA), призначена для попередньої обробки даних та взаємодії з повільною і швидкою системами керування.
- Система відбору подій першого рівня (FLES): відповідає за онлайн-відбір та повну реконструкцію подій.

Передня зчитувальна електроніка

Зчитування сигналів із кремнієвих сенсорів здійснюватиметься за допомогою спеціалізованої інтегральної схеми STS-XYTER (STS, координати X, Y, зчитування часу та енергії). STS-XYTER виконуватимуть дискримінацію та оцифрування сигналів з кожного стріну. На одній платі FEB встановлено вісім STS-XYTERv2.2, забезпечуючи зчитування 1024 каналів. Мікросхема використовує зарядочутливий підсилювач з вхідним транзистором ELT NMOS, зміщеним при номінальному струмі стоку 2 мА та живленням від окремого джерела напруги 1.2 В (VDDM). Підсилювач має коефіцієнт підсилення 9.2 мВ/фКл, коефіцієнт посилення у відкритому контурі $2.5 \cdot 10^3$ та добуток коефіцієнта посилення на пропускну здатність $1.3 \cdot 10^9$. Вісім STS-XYTER розташовані у шаховому порядку для узгодженості з шириною сенсора та кроком стріпів. Плати FEB розміщуються по периметру станцій детектора (поза апертурою детекторної системи) та монтуються у вигляді поличок, що контактують з охолоджувальною пластиною для відведення тепла, що генерується електронікою. Основною функцією плати FEB є забезпечення відповідних напруг живлення для вісьмох STS-XYTER та реалізація ємнісного з'єднання інтерфейсу передачі даних із зчитувальною

платою. На рисунку 1.14 наведено прототипи конструкцій FEB-8 А та В типу з розмірами приблизно $10 \times 3 \text{ см}^2$.

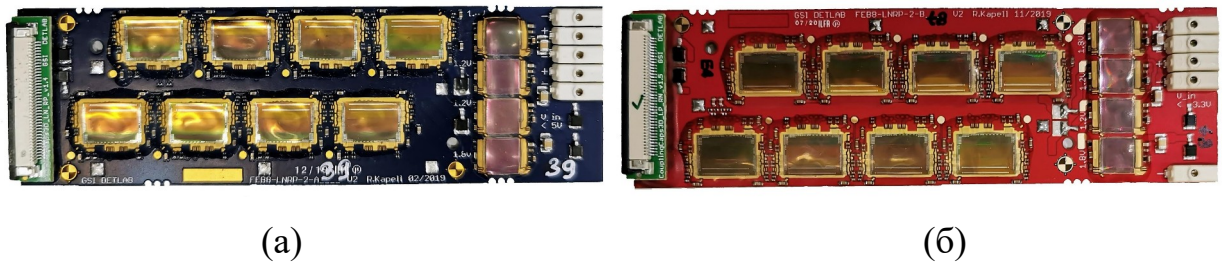


Рис. 1.14 Прототип конструкції плат FEB-8 для зчитування 1024 каналів із кремнієвих сенсорів для р та n сторін типу А (а) та типу В (б).

Зчитувальна плата

Електричний інтерфейс між FEB та зчитувальною платою ROB реалізовано із застосуванням гнучких плоских кабелів з метою забезпечення передачі керуючих сигналів та зчитування даних. Основним призначенням ROB є обробка даних із численних каналів та від кількох FEB і STS-XYTER та забезпечення електронно-оптичного інтерфейсу для з'єднання підземної експериментальної зони CBM з CRI, розташованими на поверхні. Також нею здійснюється керування командами для повільного та швидкого керування передньої зчитувальної електроніки [62]. Оцінені рівні опромінення за весь життєвий цикл тривалістю 10 років загальної іонізаційної дози до 1 Мрад. Відповідно, плати ROB виготовляються з використанням радіаційно-стійких компонент.

Загальний зчитувальний інтерфейс

Зчитування даних із ROB здійснюється через три оптичні вихідні канали: один від головного модуля GBTX через трансивер VTRX та два від вторинного модуля GBTX через трансивери VTTX [60].

Загальний зчитувальний інтерфейс CRI є FPGA-платформою загального призначення для експерименту CBM. CRI відповідає за вихідну частину оптичних інтерфейсів для роботи зі зчитувальними платами.

Незважаючи на те, що остаточним рішенням для системи зчитування CBM є CRI, плати обробки даних (Data Processing Boards, DPB) використовуються на етапах розроблення та тестування [63]. DPB є багатоцільовою платформою для тестування та налагодження зчитувального ланцюга різних детекторів.

Система відбору подій першого рівня

У випадку CBM, для деяких важливих сигналів таких як Ω -гіперони або D-мезони, не існує простих критеріїв для тригера та відбору таких подій. Складні топології розпадів потребують повної реконструкції подій, що призводить до неприйнятно великої часової затримки [59]. CBM не передбачає традиційних апаратних тригерів, тому всі дані з детекторів передаватимуться на загальний кластер для онлайн-обчислювань. За високих частот подій, обсяг даних повинен бути зменшений більш ніж на два порядки шляхом онлайн-відбору важливих даних. Онлайн-система CBM FLES буде складатися з модулів із сучасними багатоядерними CPU та графічними картами [42].

1.3.2 Симуляції детекторних систем

Розглянемо декілька прикладів програмних аналогів детекторних систем на основі кремнієвих стріпових сенсорів, що використовуються у сучасних експериментах з дослідження фізики елементарних частинок.

VELO (LHCb)

Вершинний локатор (VErtex LOcator - VELO) експерименту LHCb [64] на БАК складається з односторонніх кремнієвих стріпових сенсорів, сегментованих таким чином, щоб забезпечити вимірювання r або ϕ координат [65]. Відповідно до [66], у програмному аналозі VELO враховано такі ефекти:

емісія δ -електронів, неоднорідний розподіл заряду вздовж треку, дифузія заряду під час його збирання, паразитна ємність між стріпами.

Semiconductor Tracking System (ATLAS)

Напівпровідникова Трекерна Система (Semiconductor Tracking System) експерименту ATLAS [67] на БАК, використовує детекторні модулі з односторонніми кремнієвими мікостріповими сенсорами [68]. Кожен модуль складається з двох з'єднаних послідовно сенсорів під кутом 40 мрад. У напівпровідниковому трекері ATLAS реалізовано дві окремі комп'ютерні моделі. Моделювання електроніки включає наводки між сусідніми каналами. Після цього до амплітуди сигналу додається електронний шум, згенерований за гаусівським розподілом зі стандартним відхиленням, що дорівнює еквівалентному електронному заряду (Equivalent Noise Charge – ENC), визначеному з експериментальних даних. Стріпи, сигнал яких перевищує поріг, реєструються.

The Collider Detector (Fermilab)

Кремнієвий детектор CDF складається з трьох компонент. Внутрішня частина системи трекінгу була побудована у вигляді послідовних кремнієвих мікостріпових детекторів [69]. Модель відгуку детектора для L00 описана в [70]. З метою моделювання відгуку детектора траєкторія падаючої частинки розбивається на кроки довжиною 1 мкм. На кожному кроці обчислюється загальна кількість електрон-діркових пар [71]. Дифузія враховується згідно з моделлю з [72]. Для моделювання шуму до кожного сигналу додається випадкова величина, розподілена за Гаусом.

Silicon detectors (PAMELA)

Детектор PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) використовується для дослідження потоку космічних променів із акцентом на антиматерію [73, 74]. Модель відгуку детектора описано в [75]. Відповідно до цієї моделі, траєкторія частинки розбивається на кроки довжиною 10 мкм, генерація заряду обчислюється з використанням GEANT3. Паразитні ефекти моделюються за допомогою спрощеного

співвідношення: частка сигналу, що реєструється на сусідньому каналі, визначається відношенням $r = C_{interstrip} / C_{coupling}$. Для відтворення шуму електроніки, до сигналів додаються флуктуації за розподілом Гауса.

Важливість та вплив

КТС є найважливішою частиною детекторної системи СВМ [43]. Її головною метою є відновлення треків частинок із високою ефективністю та визначення їх імпульсів з високою точністю. Для повного розкриття потенціалу КТС необхідно використовувати симуляції її функціонування. Точні симуляції детекторних систем є ключовим методом для кращого розуміння їхніх характеристик, що є передумовою для обґрунтованих технічних рішень, подальшого отримання коректних фізичних результатів під час проведення експерименту та їх аналізу.

Остання модель відгуку детектора КТС використовувала аналітичні методи для опису втрат енергії іонізуючими частинками у кремнієвому сенсорі, утворення носіїв заряду, їх дрейфу у електричному полі до стріпів сенсора та інтеграції заряду зчитувальною електронікою із урахуванням основних електричних ефектів, що спотворюють вихідний сигнал [76]. Головними недоліками поточної моделі є відносно простий підхід до опису електроніки детекторного модулю КТС. Внаслідок цього, модель не має можливості відтворити шум детекторного модулю та не надає можливості дослідження пропагування заряду через зчитувальну електроніку, що є важливим для оптимізації та глибшого розуміння роботи детекторного модуля. Застосування спрощеної моделі відгуку детектора призводить до спотворення оцінок його характеристик. Використання більш реалістичної моделі відгуку детектора має здійснюватися на основі порівняння з експериментальними даними, а також із урахуванням впливу самої моделі на оцінку ефективності детектора. Останнє є необхідним, оскільки існує низка ефектів, що погіршують характеристики детектора, але водночас є складними для експериментального вимірювання та для виокремлення їхнього внеску.

Більш реалістична модель відгуку детектора є перспективним шляхом для отримання достовірних результатів щодо характеристик роботи електроніки КТС за різних умов: після опромінення, за високого рівня шуму, у випадках, коли окремі стріпи, чіпи або модулі не зчитуються [77] та при використанні різних варіацій детекторних модулів [78].

Задача цього дослідження

З метою удосконалення програмного аналогу детекторного модуля КТС, завданням цього дослідження є розробка програмного аналогу детекторного модуля КТС, що дозволяє дослідити процес реєстрації, пропагування та обробки заряду утвореного в кремнієвому сенсорі при взаємодії із іонізуючим випромінюванням. Основним підходом в цьому дослідженні є використання високоточних програм, розроблених для симуляцій процесів фізики високих енергій та аналогової електроніки, на відміну від аналітичних оцінок, що використовуються у поточній моделі відгуку детектора КТС.

Розроблений програмний аналог має відтворювати повний ланцюг подій при реєстрації сигналів детекторним модулем КТС: від взаємодії іонізуючого випромінювання із кремнієвим сенсором і утворення носіїв заряду, до симуляції вихідного сигналу, із явним врахуванням різноманітних негативних ефектів, що виникають у модулі. Головною перевагою такого підходу є можливість явного дослідження процесів, що перебігають у електроніці детекторного модуля КТС.

Розділ 2. Симуляції детекторних модулів КТС

Детекторний модуль КТС є системою зі складними електричними властивостями. У той же час, КТС - це високоінтегрований об'єкт з дуже обмеженим фізичним доступом після її збірки та інсталяції у експериментальній залі СВМ [79]. За таких обставин, без можливості фізичної перевірки та тестування компонент під час проведення експерименту СВМ, електронне моделювання основних компонент КТС, з практичної точки зору, є одним з можливих шляхів дистанційного моніторингу якості роботи детекторних модулів КТС. Такий підхід, у порівнянні із відсутністю програмної моделі, дозволить оптимізувати компоненти детекторних модулів до початку експерименту та зможе бути використаний як еквівалент для оцінки якості їх роботи під час проведення експерименту із урахуванням зміни параметрів компонент електричних ланцюгів детекторних модулів КТС внаслідок інтенсивної взаємодії з іонізуючим випромінюванням. Це гарантуватиме краще розуміння отриманих сигналів, що є першочерговою вимогою при пошуку та реєстрації рідкісних та слабких сигналів.

В цьому розділі наведено фізичні вимоги та технічні характеристики детекторних модулів КТС, описано процес розробки програмного аналогу їх електроніки, методи перевірки результатів симуляцій, симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС та оцінка якості отриманих результатів для характеристик зареєстрованих ним сигналів.

Загалом, моделювання відгуку кремнієвого стріпового детектора можна розділити на такі етапи моделювання [76]:

1. Проходження іонізуючої частинки через середовище сенсора: втрати енергії та утворення носіїв заряду (електронів та дірок),
2. Пропагація носіїв заряду в об'ємі сенсора:
 - а. рух носіїв заряду до стріпів в електричному полі,
 - б. дифузія носіїв заряду під час дрейфу,
 - с. вплив магнітного поля на рух частинки,

3. Перерозподіл заряду між зчитувальними каналами через паразитні ємності,
4. Інтеграція сигналу зчитувальною електронікою,
5. Електричний шум.

Взаємодія іонізуючого випромінювання із напівпровідниковими детекторами є ретельно дослідженим питанням у експериментальній фізиці [80]. З огляду на це та на першочерговість необхідності краще розуміти електроніку детекторних модулів КТС, для їх оптимізації та подальшого контролю якості отриманих ними даних, першою чергою було розроблено симуляції аналогової електроніки детекторних модулів КТС: двосторонній мікροстріповий кремнієвий сенсор, дві зчитувальні плати та мікрокабелі, що їх з'єднують.

2.1 Симуляції аналогової електроніки детекторного модуля КТС

Загальний підхід до розробки програмного аналогу електроніки складної детекторної системи складається з відтворення базових компонент та функцій електричного ланцюга із його поступовою розбудовою та ускладненням за рахунок врахування наявних артефактів, викликаних паразитними ємностями, геометрією детектора тощо. Першочергово, необхідно визначитися із методом реалізації електронних симуляцій аналогової електроніки.

2.1.1 LTspice

Для відтворення та аналізу роботи складних електричних ланцюгів, широко використаними є програми-симулятори на основі відкритого коду SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Попередньо, для базових симуляцій детекторних модулів КТС [81], робочою групою КТС було використано LTspice (програмне забезпечення для симуляції аналогових електронних схем на основі SPICE) [82]. LTspice має наступні важливі

характеристики для симуляції аналогової електроніки детекторних модулів КТС:

- Екстенсивна бібліотека електричних компонент,
- Можливість створення нових електричних компонент із бажаною конфігурацією та параметрами,
- Відсутність лімітів на кількість компонент та їх підкомпонент у принциповій схемі,
- Параметризація характеристик елементів (опору, ємності тощо) в залежності від заданих параметрів (розміри сенсора, довжина мікрокабелів тощо),
- Можливість симуляцій амплітудно-частотної характеристики, спектральної густини шуму та перехідних процесів (пропагування сигналу через електричний ланцюг).

Зважаючи на зазначені переваги LTspice та його попереднє успішне застосування до схожих завдань робочою групою КТС та іншими дослідниками [83, 84], LTspice було використано для відтворення та аналізу аналогової електроніки детекторних модулів КТС у ході цього дослідження.

2.1.2 Одноканальна схема

З технічної точки зору, базовою одиницею детекторного модуля КТС є один зчитувальний канал, як найбільш базова частина електричного ланцюга, що реєструє продукти іонізації в кремнієвому сенсорі та формує вихідний сигнал. Після реалізації принципової схеми одного каналу детекторного модуля КТС, можлива подальша розбудова та ускладнення програмного аналога.

Основні компоненти

Детекторний модуль КТС (детальний опис компонент наведено у розділі 1.3.1) складається з трьох основний компонент (рис. 2.1):

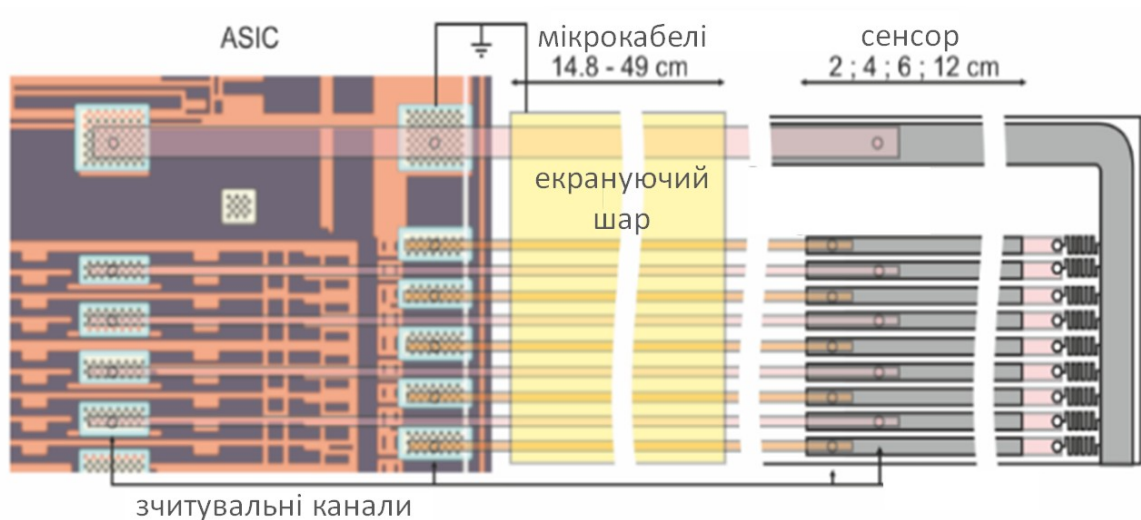


Рис. 2.1 Поперечний переріз компонент детекторного модуля KTC: ASIC, мікро-кабелі, сенсор.

- Двосторонній кремнієвий стріповий сенсор шириною 62 мм та загальною товщиною 320 мкм, виготовлений із кремнію n-типу з великим опором. Сенсори мають чотири можливі довжини: 22, 42, 62 та 124 мм. Кожна сторона сенсора містить 1024 стріпи, Стріпи р сторони мають нахил 7.5° відносно сторін сенсора;
- Дві FEB плати, кожна з яких містить вісім STS-XYTER інтегральних схем;
- 32 надтонкі мікрокабелі довжиною в діапазоні довжин 15-50 см, кожен кабель забезпечує з'єднання 128 стріпів з одним STS-XYTER чіпом.

Кожна з цих компонент має складну структуру та ряд додаткових ефектів (паразитні ємності, наводки, механічні недосконалості тощо), що виникають внаслідок їх геометрії, що можуть значно впливати на якість отриманих даних [81].

Окрім детекторного модуля KTC, необхідно реалізувати ланцюг зчитувальної електроніки (рис. 2.2). У якості зчитувальної електроніки виступає комбінація інтеграторів заряду, розміщених у чіпах ASIC – SMX канал (детальний опис компонент наведено у розділі 1.3.1).

Основним і найскладнішим завданням цього дослідження є створення програмного аналогу перелічених компонент у мірі, що відтворює їх функціонування (разом із їх дефектами) з гарною точністю, упродовж помірною часового терміну без моделювання повної схеми з усіма деталями. У переважній більшості випадків, складні детектори такі як детекторний модуль КТС, для оцінювання якості роботи такої системи, можуть бути наближено описані використовуючи простіші, але близькі за показниками та структурою компоненти у комбінації із додатковими елементами (що не присутні у фізичній принциповій схемі) для врахування додаткових ефектів. Такий підхід вимагає гарного розуміння принципів роботи детекторної системи, як цілого, її окремих компонент, характеристик вхідних та вихідних даних, методів їх обробки та аналізу, вимог до точності отриманих результатів.

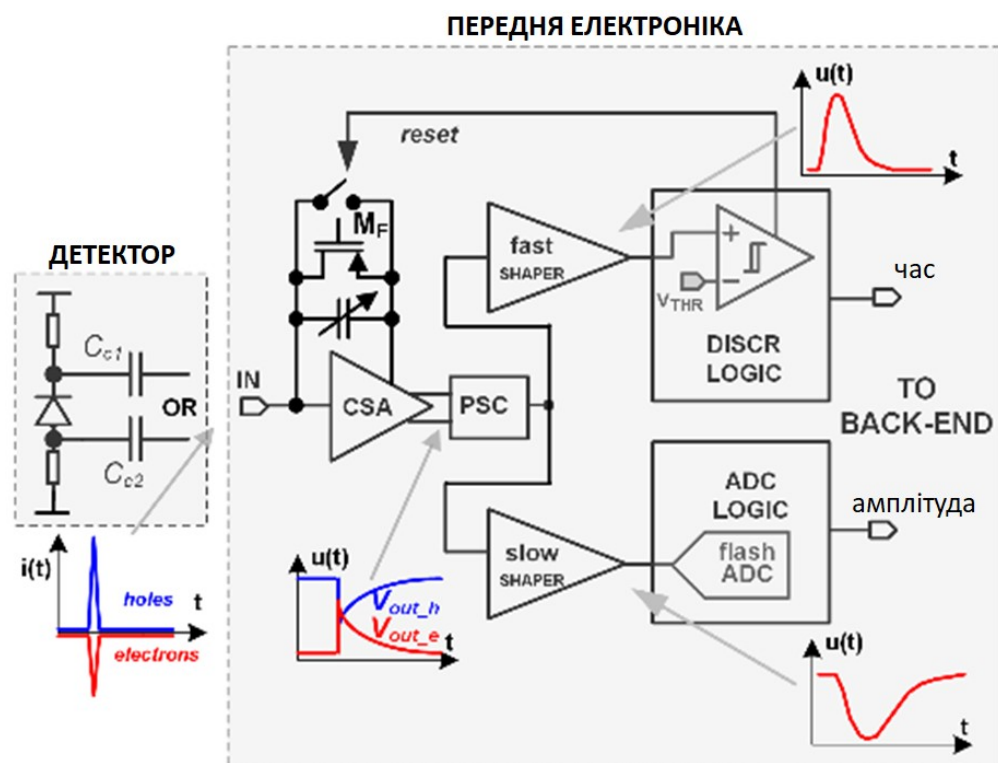


Рис 2.2 Схематичне зображення детекторного модуля КТС та його зчитувальної електроніки [85].

LTspice схема

Мотивуючись попередньо наведеними міркуваннями, створення програмного аналогу детекторної системи КТС було розпочато з відтворення базових компонент та функціонування одного зчитувального каналу. Така принципова схема може бути описана, як детекторний модуль КТС з одностороннім мікро-стріповим сенсором. Еквівалентна схема такого модуля складається з наступних ключових елементів (рис. 2.3): джерело високої напруги, контур зворотного зв'язку, сенсорний стріп, мікрокабель та SMX канал.

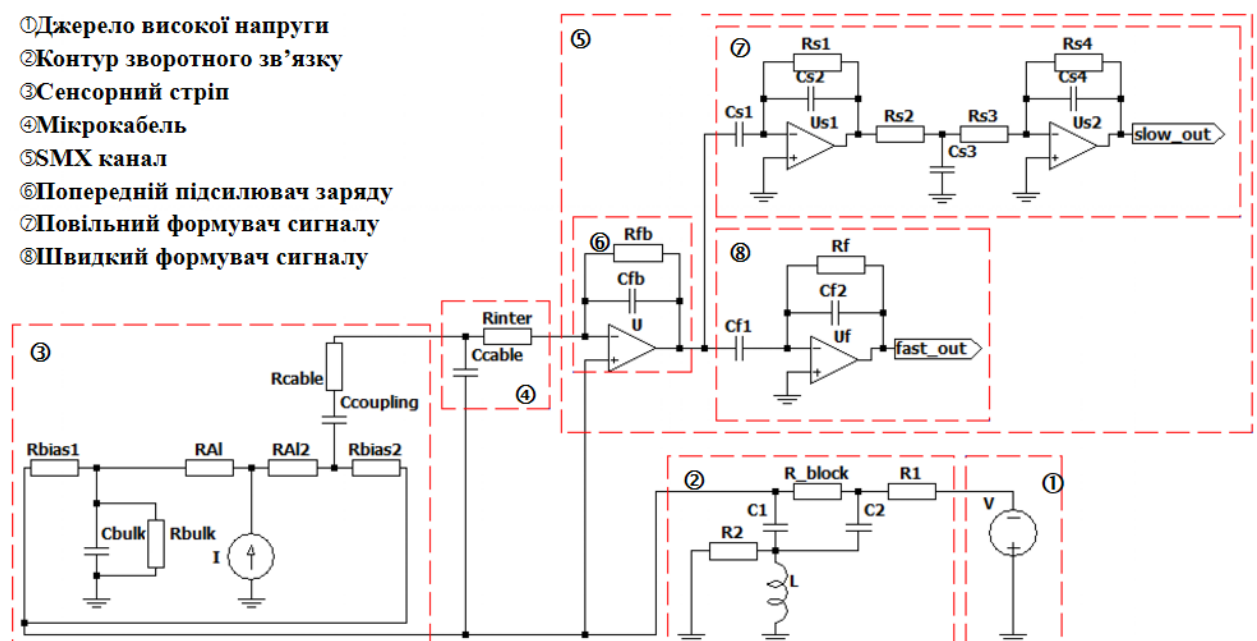


Рис. 2.3 LTspice схема одностороннього, одноканального детекторного модуля КТС.

Контур зворотного зв'язку - частина схеми модуля, що стабілізує заземлення SMX каналу (діапазон частот 15 кГц - 1 МГц для повільного та 15 кГц – 10 МГц для швидкого каналу зчитування) та пригнічує шум від джерел напруги. За своєю суттю, це комбінація RC (R_1 - C_2) та CR (C_1 - R_2) фільтрів. Котушка індуктивності L репрезентує складне з'єднання двох половин контуру зворотного зв'язку. Це дозволяє врахувати додаткове джерело шуму присутнє у фізичній системі.

Металевий стріп сенсора було представлено у вигляді двох резисторів (R_{Al} та R_{Al2}) із взаємозалежними значеннями електричних опорів, для можливості симуляції реєстрації електронів різними частинами стріпа. За замовчуванням $R_{Al} = R_{Al2}$, тобто електрони реєструються на середині стріпа. Джерелом зареєстрованих електронів виступає джерело струму I , що використовується як імпульсний генератор. Окрім цього, стріп під'єднано до кола напруги зміщення, представленого двома резисторами (R_{bias1} , R_{bias2}). Додатково до стріпу під'єднано до комбінації конденсатора C_{bulk} з резистором R_{bulk} , елементи, що не присутні у фізичній системі, але які репрезентують паразитні ефекти, що виникають між протилежними сторонами сенсора. Один з кінців стріпа під'єднано до з'єднуючого резистора R_{cable} через конденсатор зв'язку $C_{coupling}$.

Сенсор під'єднано до SMX каналу через надтонкий мікро-кабель, що реалізовано через використання резистора з малим опором R_{inter} . Конденсатор C використовується для симуляції паразитної ємності, що виникає між мікро-кабелем та ланцюгом напруги зміщення.

SMX канал реалізовано у спрощеному вигляді. Він складається зі стандартного LTspice попереднього операційного підсилювача (ідеальний однополюсний операційний підсилювач) [82] зі зворотнім зв'язком RC - U та двох окремих виходів для швидкого та повільного формувачів сигналу, що в свою чергу складаються з одного та двох стандартних LTspice операційних підсилювачів зі зворотнім RC зв'язком відповідно (U_f , U_{s1} та U_{s2}). Швидкий та повільний формувачі сигналу використовується для реєстрації часу та характеристик сигналу відповідно. Використання спрощених моделей операційних підсилювачів із близькими до реальних характеристиками зумовлене необхідністю виконання швидких симуляцій. Найважливіші характеристики STS-XYTERv2.2, що використовувалися у цьому дослідженні наведено у розділі 1.3.1. Детальний опис характеристик STS-XYTER наведено у роботі [85], діаграму чіпу STS-XYTER наведено на рисунку Б1.

Номинальні значення компонент цієї схеми, що присутні у фізичній системі та значення паразитних ємностей, є відомими з документації виробників, попередніх досліджень характеристик прототипів системи, попередніх симуляцій, вимірювань характеристик модулів для контролю їх якості та оцінки паразитних ефектів [81]. Частина номінальних значень (R_{Al} , R_{Al2} , R_{cable} , R_{inter} , $C_{coupling}$) є функціями довжин стріпа (22 – 214 мм) або мікрокабелю (12 – 50 см). Ці значення були параметризовані відповідним чином, для можливості симулювати всіх можливих варіацій детекторних модулів КТС.

LTspice симуляції

Перед подальшою розбудовою та ускладненням необхідно провести тестування принципової схеми. З цією метою було проведено перевірку наступних залежностей: перевірка залежності амплітуди вихідного сигналу від параметрів стріпа та мікрокабелю, залежність вихідного сигналу повільного формувача в залежності від часу формування та рівень шуму на виході повільного формувача в залежності від ємнісного навантаження SMX каналу.

У випадку дослідження залежності вихідного сигналу від довжин стріпів та мікро кабелів, амплітуда вихідного сигналу A прямо пропорційна заряду, отриманому SMX каналом Q_{SMX} . Загальному, через наявність паразитних ефектів (міжстріпових ємностей, ємностей між кабелями та ємностей між елементами протилежних сторін сенсора) $Q_{SMX} < Q_{total}$, де Q_{total} – заряд отриманий стріпом каналу, оскільки частка Q_{total} перерозподіляється між сусідніми каналами детекторного модуля. Зазначені паразитні ємності мають лінійну залежність від довжини стріпів або кабелів.

Розглянемо два гіпотетичні крайні випадки: всі паразитні ефекти відсутні ($Q_{SMX} = Q_{total}$) – $A_0(l_0) = A(l)$; весь отриманий заряд Q_{total} перерозподілено між сусідніми каналами ($Q_{SMX} = 0$) – $A_0(l_0) = 0$. Де l , l_0 – довжина компоненти (стріпа або кабелю), $A_0(l_0)$ – амплітуда вихідного сигналу повільного формувача при

довжині компоненти l_0 , $A(l)$ - амплітуда вихідного сигналу повільного формувача при довжині компоненти l . В загальному випадку:

$$A(l)/A_0(l_0) \sim e^{-\alpha \cdot l} \quad (2.1)$$

Однак, розглядати випадки $A(l) \ll A_0(l_0)$ не має фізичного сенсу, оскільки детекторний модуль КТС було спеціально розроблено для обробки слабких сигналів із мінімальними втратами. Додатково, фізичні вимірювання залежностей рівня шуму та втрат сигналу від геометричних параметрів детекторного модуля демонструють переважно лінійну залежність [43]. Отже, для невеликого діапазону довжин елементів, можна очікувати зменшення максимальної амплітуди вихідного сигналу пропорційно до довжини елементів:

$$A(l)/A_0(l_0) \sim l \quad (2.2)$$

Результати симуляцій відношення $A(l)/A_0(l_0)$ для схеми аналогу одноканального модуля демонструють переважно лінійну поведінку у випадку зміни довжини стріпа $[A/A_0 = -0.002 \text{ см}^{-1} \cdot l_0 + 0.994]$ та лінійну залежність для довжини мікрокабеля $[A/A_0 = -0.001 \text{ см}^{-1} \cdot l_0 + 1.016]$ (рис. 2.4). Результати демонструють гарну узгодженість із очікуваними результатами.

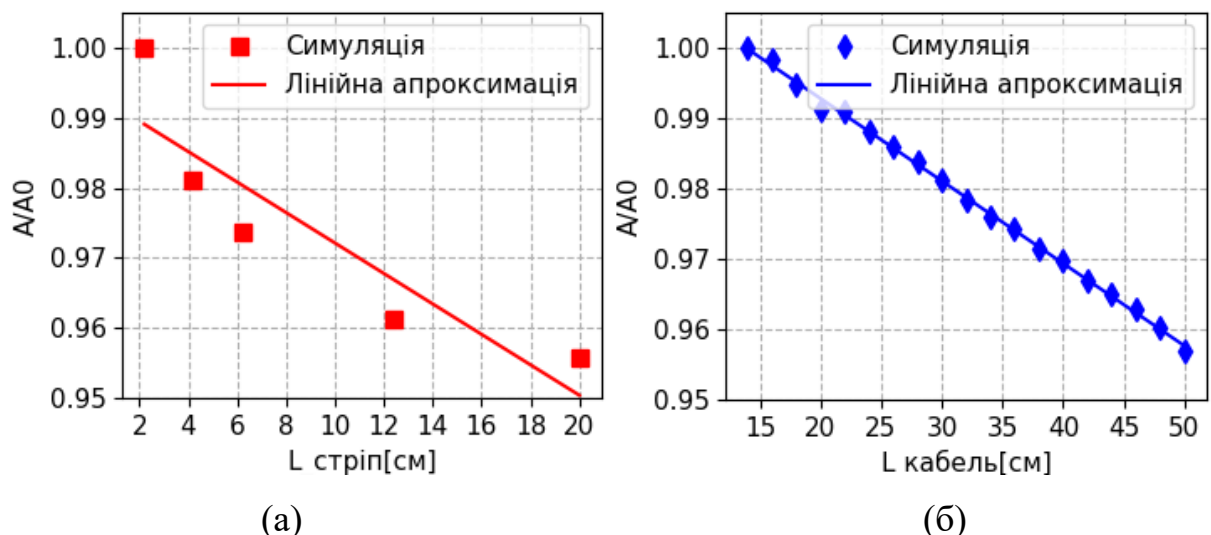


Рис. 2.4 Відношення значень амплітуд вихідних сигналів повільного формувача від: а) довжини стріпа (кабель 20 см); б) довжини мікрокабеля (стріп 12.4 см). В обох випадках в канал було інжектровано заряд 4.5 фКл.

Для оцінки якості результатів, отриманих використовуючи спрощену схему, окрім перевірки очікуваної залежності параметрів вихідного сигналу від номінальних значень елементів схеми також необхідно виконати порівняння із фізично вимірними результатами. Оскільки фізичного аналогу одноканального детекторного модуля не існує, отже не існує результатів фізичних вимірювань виконаних такою системою, наступним варіантом є використання фізичних вимірювань певних частин схеми.

Під час розробки зчитувальної електроніки, лабораторією робочої групи КТС було виконано екстенсивні вимірювання характеристик чіпів STS-XYTER [43, 87]. Серед них для відтворення спрощеною схемою є можливими наступні важливі характеристики SMX каналу: залежність амплітуди вихідного сигналу повільного формувача від його пікового часу, залежність рівня шуму повільного формувача від вхідного ємнісного навантаження SMX каналу.

Для симуляцій було використано принципову схему зображену на рисунку 2.5. Ця схема відтворює методику вимірювання, що була застосована у лабораторії КТС: SMX канал відокремлено від детекторного модуля КТС було під'єднано до джерела високої напруги та генератора імпульсів. Компоненти принципової схеми для тестування SMX каналу:

- I_1 – генератор сигналів,
- V_1 – джерело високої напруги,
- C_1 – ємнісне навантаження 1-40 пФ,
- Попередній операційний підсилювач,
- Швидкий формувач із часом формування 30 нс,
- Повільний формувач із часом формування 90 нс (у випадку дослідження роботи повільного формувача – 90, 160, 230 та 290 нс).

Формувачі імпульсів зазвичай перетворюють вузький імпульс сенсора на ширший імпульс із плавно заокругленим максимумом у момент досягнення піку (peaking time). Час піку є ключовим параметром проєктування, оскільки він визначає смугу пропускання шумів, а також має узгоджуватися з часом

відгуку сенсора та частотою подій. Повільний формувач типу CR – $(RC)^2$ забезпечує можливість вибору декількох значень часу піку шляхом зміни опорів [45].

Вихідні форми сигналів для всіх можливих часів формування наведені на рисунку 2.6.а. У канали подаються позитивні входні сигнали із загальним зарядом 4.5 фКл. Результати симуляцій вихідного сигналу повільного формувача, в залежності від ємнісного навантаження SMX каналу, представлені на рис. 2.6 (б), демонструють гарну узгодженість із вимірними даними.

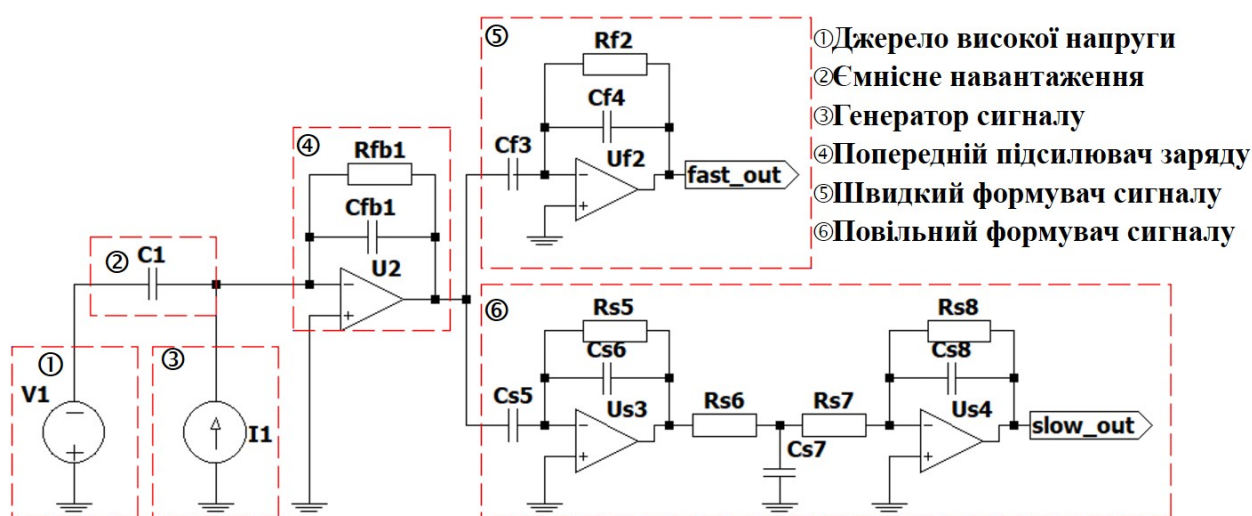


Рис. 2.5 Схема використана для тестування характеристик SMX каналу.

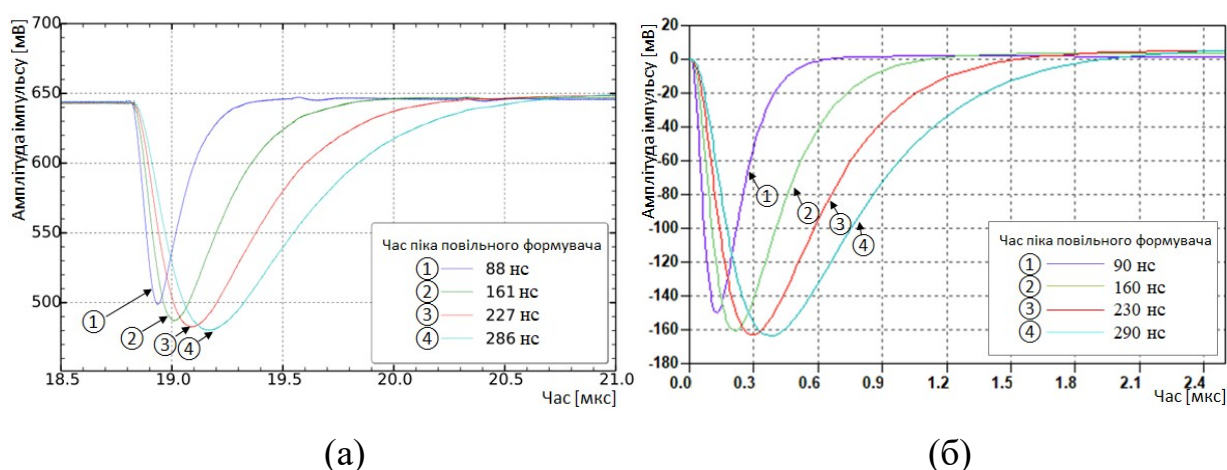


Рис. 2.6 Сигнал на виході повільного формувача сигналу, при інжектваному заряді 4.5 фКл для різних часів формування сигналу: (а) виміряно в лабораторії КТС [87], (б) результат LTspice симуляцій.

Відносна різниця значень амплітуд, часу наростання та спадання сигналу для всіх значень пікового часу не перевищує 5%. Присутня розбіжність може бути пояснена комбінацією спрощень кількох компонент у порівнянні із реальною системою. Першочергово, використання у симуляціях стандартного операційного підсилювача із параметрами близькими до фізичного чіпу STS-XYTER, що обмежує можливість врахування нелінійних ефектів. Повноцінне відтворення спеціалізованого чіпу STS-XYTER використовуючи LTspice є складною задачею, з огляду на його структуру, у поєднанні з необхідністю виконання швидких симуляцій із близькими результатами до фізичної системи. За таких умов, використання значно простішого аналогу, у порівнянні із STS-XYTER, дозволяє виконувати значно швидші розрахунки із близькими до реальних отриманих значень. Також потенційним є вплив недосконалостей генератора сигналу та з'єднуючих кабелів, що були використані для фізичних вимірювань, що є відсутніми у електронній схемі. Отже, відтворення форм вихідного сигналу повільного формувача залежно від часу піку електронною схемою дає задовільні результати, що можуть бути в подальшому покращені, за рахунок використання більш детальної моделі STS-XYTER чіпу та врахування додаткових ефектів у генераторі імпульсу, з'єднувальних кабелях тощо.

Детектор КТС у фінальній конфігурації передбачає використання кількох комбінацій сенсорів та кабелів із різними розмірами з оціненим ємнісним навантаженням в діапазоні від 12 до 40 пФ [88, 89]. Шум детекторної системи суттєво залежить від сумарного ємнісного навантаження яке має вхідний транзистор зарядочутливого підсилювача. Для сенсорів із низьким радіаційним навантаженням, очікується, що внесок у загальний рівень шуму переважно визначатиметься саме ємнісним навантаженням. Отже залежність рівня шуму від ємнісного навантаження є важливим критерієм для характеристики детекторної системи.

У випадку визначення рівня шуму, найпоширенішим параметром для характеристики рівня шуму є еквівалентний шумовий заряд (equivalent noise

charge – ENC), який визначається як такий зареєстрований заряд, що формує вихідний сигнал із амплітудою, рівною середньоквадратичному значенню шуму.

LTspice дозволяє виконати моделювання спектральної густини шуму V_{noise} [В/Гц^{1/2}]. Рівень шуму N [В] визначається наступним чином:

$$N[B] = \left(\int_{f_1}^{f_2} V_{noise}^2 df \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Для конвертації значення N з [В] у кількість зарядів електронів [e] використовується співвідношення:

$$N[e] = ENC[e] = \frac{N[B]}{q_e[K] \cdot A_{qs}[B/K]} \quad (2.4)$$

де A_{qs} – коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача (відомий з документації виробника), q_e – заряд електрона, f_1 та f_2 – межі часово-частотного вікна операційного підсилювача:

$$q_e = 1.6 \cdot 10^{-19},$$

$$A_{qs} = 9.2 \cdot 10^{12},$$

$$f_1 = 1[\text{кГц}],$$

$$f_2 = 10[\text{МГц}].$$

Результати симуляції залежності рівня шуму повільного формувача від вхідного ємнісного навантаження каналу SMX зображено на рисунку 2.7.

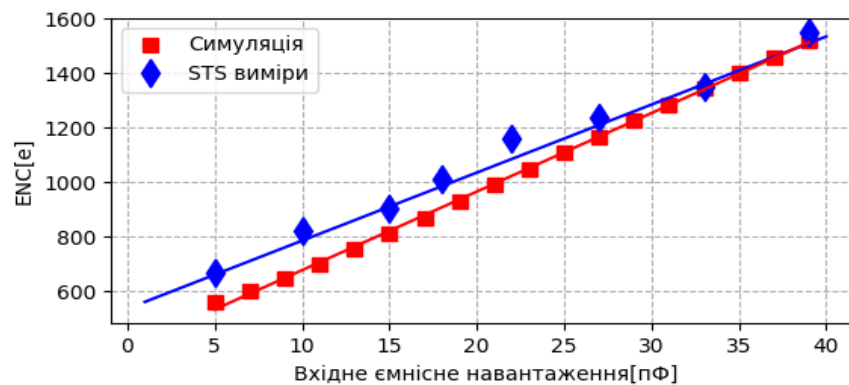
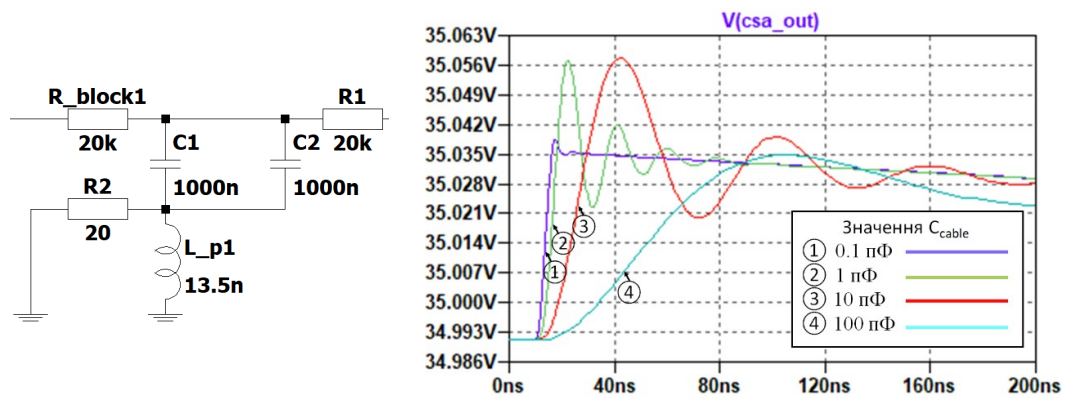
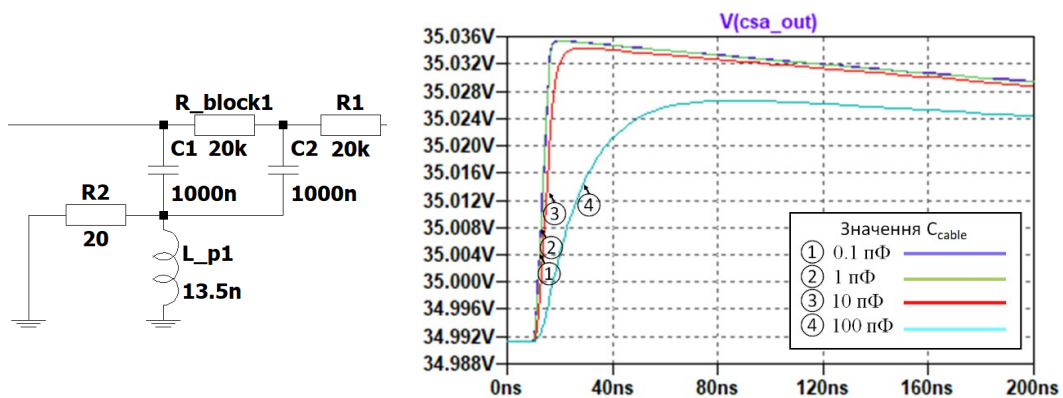


Рис. 2.7 Рівень шуму, виміряний на виході повільного формувача, як функція ємнісного навантаження: результат LTspice симуляцій (квадрати), виміряно в лабораторії КТС (ромби) [87].



(a)



(б)

Рис. 2.8 (а) принципова схема контуру зворотного зв'язку зі змінним розташуванням R_{block1} (ліворуч) та осциляції вихідного сигналу попереднього підсилювача для значень C_{cable} у діапазоні [0.1 пФ – 100 пФ] (праворуч); (б) принципова схема контуру зворотного зв'язку зі стандартним розташуванням R_{block1} (ліворуч) та вихідний сигнал попереднього підсилювача для значень C_{cable} у діапазоні [0.1 пФ – 100 пФ] (праворуч).

Результати симуляції демонструють лінійну залежність рівня шуму [$ENC = 28.75 \text{ е/пФ} \cdot C_{load} + 391.1 \text{ е}$], що підтверджується вимірюваннями виконаними в лабораторії КТС [$ENC = 24.9 \text{ е/пФ} \cdot C_{load} + 537.6 \text{ е}$] [87]. Максимальне значення розбіжності має місце для менших навантажень (5 пФ) і становить 17%. Розбіжність зменшується зі зростанням навантаження і становить < 1% для навантаження у 40 пФ. Аналогічно до вимірювання форми сигналу, різниця між виміряними та симульованими даними пояснюється використанням спрощених операційних підсилювачів у LTspice симуляціях.

Оскільки оцінене ємнісне навантаження лежить в діапазоні від 12 до 40 пФ [88, 89], із середнім відхиленням від виміряного значення близько 5%, результат використання спрощеного підходу до опису аналогової схеми каналу детекторного модуля КТС демонструє гарне узгодження із очікуваними результатами та використовується у подальших симуляціях.

Під час дослідження впливу номіналів схеми на характеристики вихідного сигналу та рівня шуму, були спостережені значні осциляції вихідного сигналу попереднього підсилювача (рис. 2.8.а). Амплітуда осциляцій визначається ємністю C_{cable} , із мінімальним впливом при значеннях < 0.1 пФ та з відчутним ефектом вже при 1 пФ. Причиною виникнення цих осциляцій стало розташування компоненти контуру зворотного зв'язку – резистора R_{block1} . Таке розташування проходило тестування з метою потенційного удосконалення контуру зворотного зв'язку, оскільки він є відповідальним за фільтр шуму в системі. Симуляції демонструють, що таке розташування призводить до створення коливального контуру в системі.

Причиною виникнення такої ситуації у фізичному модулі може бути помилка при його збірці, дефекти при виробництві, використання кабелів із великим опором при з'єднанні контуру зворотного зв'язку із рештою електроніки тощо. Саме така ситуація спостерігалася у модулях, виготовлених робочою групою КТС для застосування в експерименті J-PARC E16 [61].

Для подальших симуляцій використовувалося стандартне розташування R_{block1} (рис. 2.8.б).

Результати симуляцій одноканальної схеми демонструють, що використання спрощеної, у порівнянні із фізичною системою, електронної моделі, із відповідними номінальними значеннями та з урахуванням додаткових ефектів, викликаних геометрією детектора та вадами фізичних електричних компонент, надає можливість описати роботу фізичного аналога з достатньою точністю, для дослідження та моніторингу його загальних характеристик таких як рівень шуму та параметри вихідних сигналів.

Наступним кроком є створення багатоканальної електронної схеми, що дозволить досліджувати складні та важливі процеси, що виникають між електричними компонентами детекторного модуля.

Додаткові LTspice компоненти

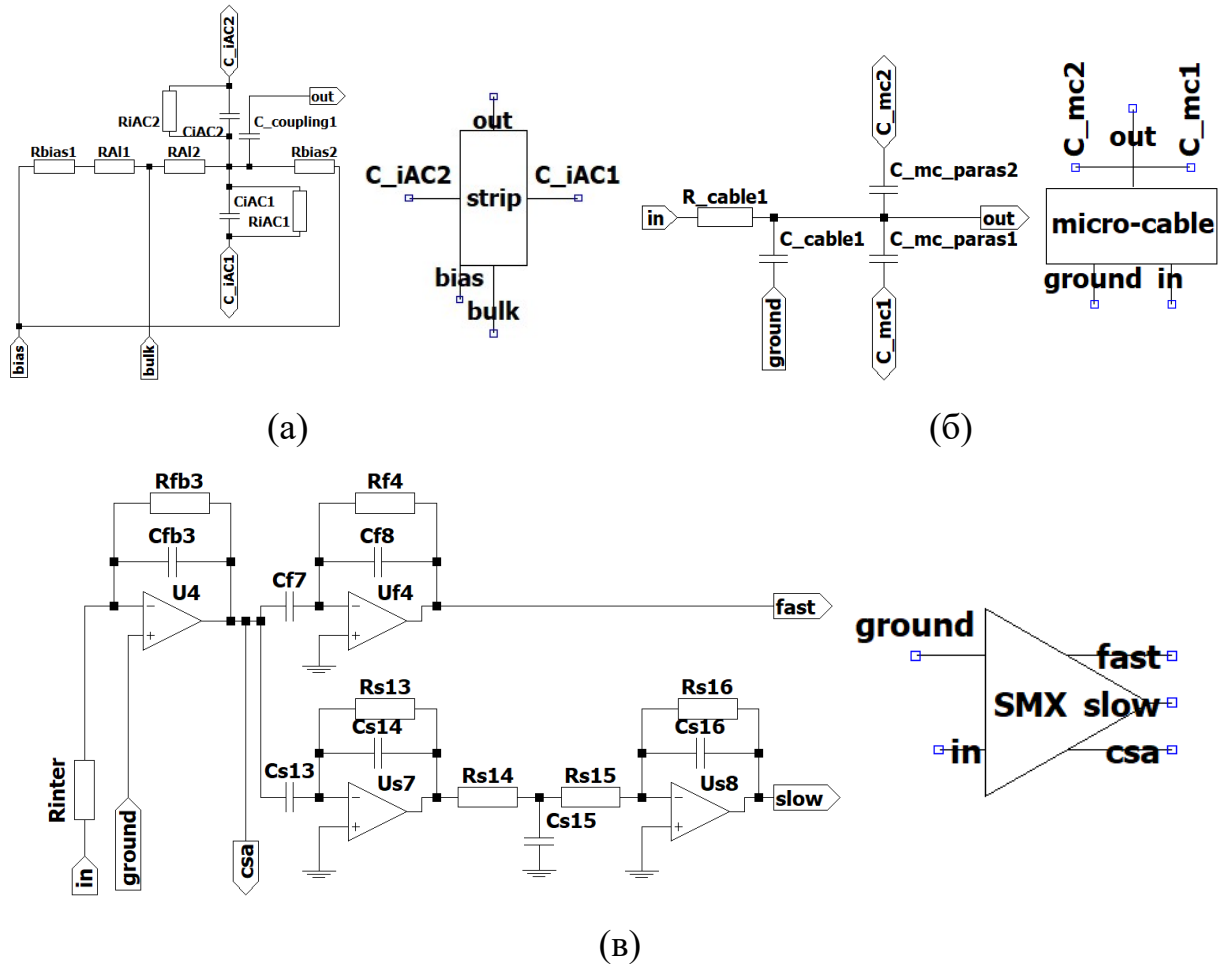


Рис. 2.9 Додаткові LTspice компоненти для симуляції детекторного модуля KTC – розгорнута схема та зображення нового елемента.

Для оптимізації моделювання багатоканальної схеми, було створено нові LTspice компоненти (рис. 2.9): (а) сенсорний стріп та супутні компоненти; п'ять точок під'єднання: для напруги зміщення, зареєстрованого сигналу, вихідного сигналу та паразитних ємностей із сусідніми стріпами; (б) мікро-кабель; п'ять точок під'єднання: для вхідного сигналу, вихідного сигналу, заземлення та паразитних ємностей із сусідніми (парними або непарними)

мікро-стріпами; (в) SMX канал; п'ять точок під'єднання: для вхідного сигналу, заземлення, вихідних сигнал з повільного та швидкого формувачів та з попереднього операційного підсилювача (у фізичній системі окремого виходу з попереднього операційного підсилювача, під час симуляцій він використовувався для моніторингу його характеристик). Всі номінальні значення компонент були параметризовані як функції довжини стріпу або мікрокабелю. Внаслідок геометричної конструкції детекторного модуля КТС, додаткові комбінації з резисторів та конденсаторів було додано для відтворення паразитних ємностей між сусідніми стріпами, парними та непарними мікрокабелями.

2.1.4 Багатоканальна схема

При відтворенні роботи детекторного модуля КТС важливе значення мають ефекти, що виникають через взаємодію між його електричними компонентами, електричними компонентами та навколишнім середовищем, додатковими монтажними або екрануючими конструкціями, через дефекти у електричних елементах тощо [81]. Аналіз таких ефектів, використовуючи симуляції детекторного модуля, вимагає відтворення конструкції багатоканальної детекторної системи.

Після перевірки якості симуляцій, отриманих використовуючи модель одноканальної детекторної системи, наступним кроком є використання нових, додаткових LTspice компонент (див. попередній розділ) для розбудови багатоканальної схема. Використовуючи нові компоненти, було змодельовано декілька багатоканальних принципових схем. В цьому розділі наведено результати для 8-ми канальної принципової схеми (рис. Б2). За своєю будовою, ця схема має аналогічну структуру до одноканальної моделі: джерело високої напруги, контур зворотного зв'язку, генератори сигналів (що були відокремленні від сенсорних стріпів), сенсорні стріпи, мікрокабелі та SMX канали.

Важливою відмінністю є врахування паразитних ефектів, що відсутні у одноканальній системі: між сусідніми стріпами, сусідніми парними та сусідніми непарними мікрокабелями. У випадку стріпів, паразитна ємність виникає між двома під'єднаними до напруги сусідніми металевими стріпами, що ефективно утворює плоский конденсатор. Для мікрокабелів, паразитна ємність виникає між двома сусідніми кабелями. У цьому випадку сусідніми є кожна наступна пара парних та непарних кабелів (1-й та 3-й є сусідніми, 2-й та 4-й є сусідніми). Це зумовлено фізичним розділенням виходів парних та непарних каналів, тобто вихідні сигнали з 128-ми послідовних каналів (128-ми послідовних сенсорних стріпів), зчитуються двома стеками, кожен з яких складається з 64-х мікрокабелів. Кожен стек під'єднано до парних або непарних каналів, після чого два стеки фізично ізольовано один від одного. Ці ефекти відображено на принциповій схемі через з'єднання відповідних сусідніх компонент: виходи C_{iAC1} та C_{iAC2} для сусідніх стріпів, C_{mc1} та C_{mc2} для сусідніх мікрокабелів. Для крайніх елементів, що мають лише один парний елемент (стріпи 1-го та 8-го каналів, мікрокабелі 1-го, 2-го, 7-го та 8-го каналів), вільний вихід заземлено. Номінальні значення паразитних ємностей були взято з дослідження [81], яке було присвячено вичерпному вимірюванню та дослідженню характеристик детекторних модулів КТС, включно із паразитними ємностями між різноманітними елементами системи.

Другою відмінністю від одноканальної принципової схеми є винесення генератора сигналу за межі схеми сенсорного стріпу. Це зроблено з метою їх незалежної один від одного параметризації, тобто кожен генератор може бути активований окремо та з різними параметрами сигналу, що необхідно для реалістичної симуляції реєстрації сигналів у кремнієвому сенсорі.

“Мертві” канали

Окрім паразитних ефектів, важливим параметром, що впливає на якість роботи детекторного модуля, а отже і на якість отриманих даних, є кількість “зламаних” або “мертвих” каналів. Такими є канали, що мають нехарактерно

низький або нульовий вихідний сигнал при реєстрації частинок. Частка “мертвих” каналів у КТС є важливою характеристикою, що необхідно враховувати при оцінюванні її продуктивності. Для визначення впливу кількості “мертвих” каналів на ефективність реконструкції та роздільну здатність за імпульсом було проведено низку симуляцій [90].

На рисунку 2.10 наведено результати моделювання залежності ефективності детектора від відсотка “мертвих” каналів [91]. Збільшення частки таких каналів до 5% призводить до зниження ефективності реконструкції треків до 90% для всіх треків, а також приблизно до 95% і 94% для первинних треків і розпадів D0 відповідно.

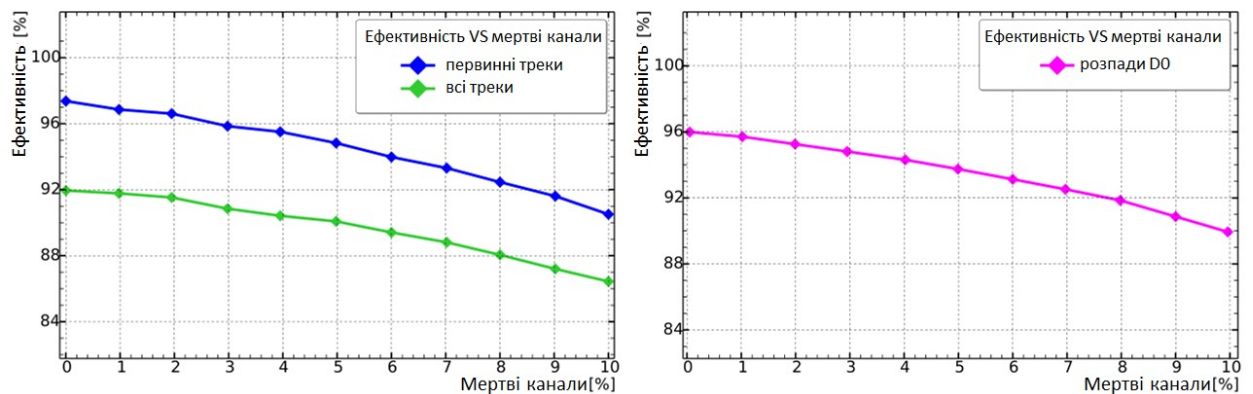


Рис. 2.10 Ефективність як функція кількості “мертвих” каналів для всіх треків і первинних треків (ліворуч), а також для треків із розпадів D0 (праворуч).

Реалістична кількість “мертвих” стріпів для сенсорів у середньому становить менше ніж 1% [90]. Виходячи з цього, може бути встановлена верхня межа надійності на рівні близько 3% “мертвих” каналів, як критерій відбору під час контролю якості сенсорів. Це відповідає приблизно 30 стріпам на одну сторону сенсора. Сенсори, у яких кількість таких стріпів перевищує це значення, відбраковуються та не використовуються для модулів детектора.

Очікується, що кількість таких каналів збільшиться у процесі збору та інсталяції модулів та під час проведення експерименту CBM.

Можливість завчасної ідентифікації таких каналів та розробка методу використання зареєстрованих ними сигналів є важливими задачами в умовах пошуку рідкісних та слабких сигналів. З цією метою, було виконано ряд симуляцій багатоканальної принципової схеми детекторного модуля КТС із використанням програмного аналогу “мертвих” каналів.

У переважній більшості випадків, “мертві” канали мають механічно пошкоджені сенсорні стріпи внаслідок недосконалостей виробничого процесу або механічних уражень під час тестування та збірки детекторних модулів у лабораторії КТС. Зважаючи на це, симуляції було виконано для таких механічних пошкоджень, де стріп було від’єднано від мікрокабеля (рис. 2.11).

Використовуючи схему 8-ми канального одностороннього детекторного модуля (рис. 2.12) було досліджено вплив таких каналів на розподіл інжектowanego заряду між усіма каналами, шляхом “від’єднання” 5-го стріпу від мікрокабеля (встановлення резистора із опором 1 ГОм між виходом стріпу “out” та входом мікрокабеля “in”). Для обох випадків працюючого та “мертвого” 5-го стріпу було виконано симуляції вихідного сигналу та рівня шуму для кожного каналу. П’ятий канал було обрано тестовим, через його розташування близько до середини сенсора, що дозволяє спостерігати паразитні ефекти усіх його “сусідів”: 4-й та 6-й стріпи, 3-й та 7-й мікрокабелі.

У випадку симуляцій вихідного сигналу, для всіх справних та 5-го “мертвого” каналу, вихідний сигнал було виміряно на виході попереднього операційного підсилювача кожного каналу. Результати зображено на рисунку 2.12.а,б. В усіх випадках, спостерігається присутність вихідного сигналу значно більшого за нуль у трьох каналах з обох сторін від інжектowanego каналу: при амплітуді вихідного сигналу в інжектowanym каналі 34.9 мВ, два канали з обох сторін мають амплітуду вихідного сигналу ~ 2.2 мВ та сусіди третього порядку ~ 0.2 мВ. Варто відмітити, що всі інші, більш віддалені канали, мають амплітуду відмінну від нуля, але меншу за попередні канали (~ 0.06 мВ). Результати демонструють помітний вплив паразитних ємностей на розподіл інжектowanego заряду між каналами.

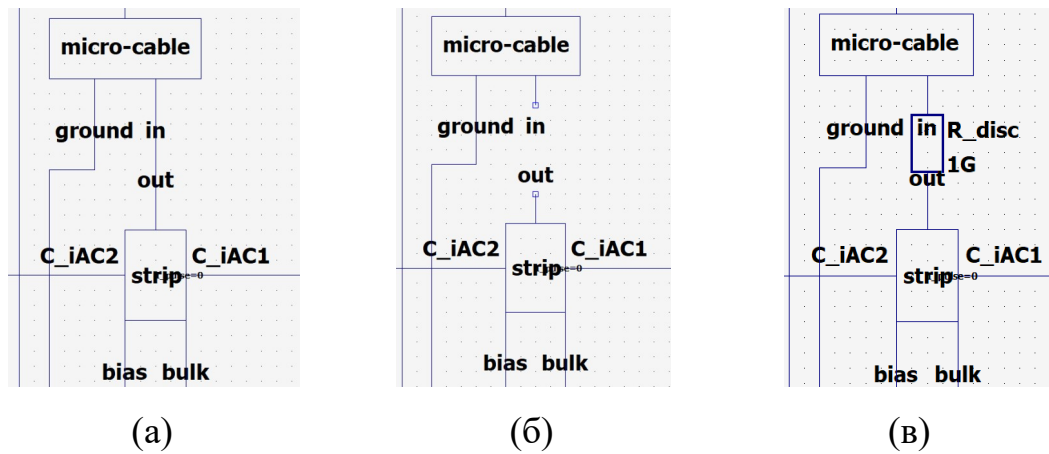


Рис. 2.11 LTspice схема, що відтворює: (а) справний канал (вихід стріпу “out” під’єднано до входу мікрокабеля “in”); (б) “мертвий” канал (вихід стріпу “out” від’єднано від входу мікрокабеля “in”); (в): “мертвий” канал (вихід стріпу “out” під’єднано до входу мікрокабеля “in” через резистор з великою ємністю порядку $\sim \Gamma\text{Om}$).

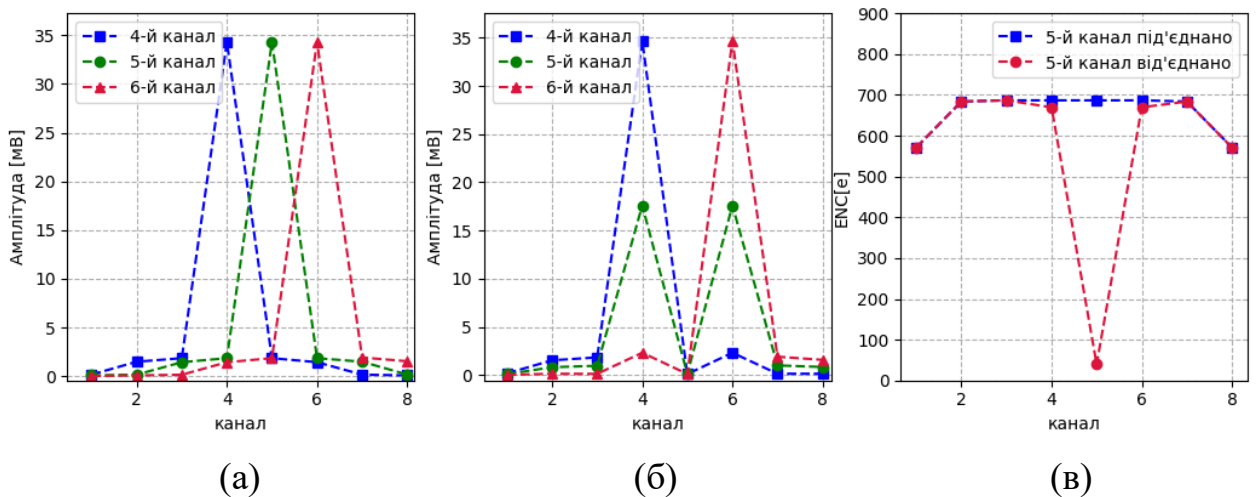


Рис. 2.12 8-ми канална схема одностороннього модуля КТС: (а) усі стріпи справні, заряд інjektується послідовно на 4-й, 5-й та 6-й стріпи; (б) 5-й стріп від’єднано, заряд інjektується послідовно на 4-й, 5-й та 6-й стріпи, (в) моделювання рівня шуму.

У випадку “мертвого” 5-го каналу, при його інjektуванні, тобто при реєстрації ним заряду утвореного в об’ємі кремнієвого сенсора, вихідний сигнал 5-го каналу має значення близьке до нуля. Значення не є істинно

нульовим, оскільки мала частина заряду потрапляє до його зчитувальної електроніки через паразитні ємності мікрокабелів. У свою чергу, два сусідні канали мають вихідні сигнали з амплітудами ~ 17.5 мВ та сусіди другого та третього порядків ~ 1.6 мВ. Ці результати демонструють, що такий розподіл можливо використовувати, як спосіб ідентифікації “мертвих” каналів, шляхом знаходження двох піків однакової амплітуди, розташованих по обидва боки каналу з дуже низькою або нульовою амплітудою сигналу.

При дослідженні впливу “мертвого” каналу на рівень шуму, аналогічно до заряду, 5-й стріп було від’єднано від його мікрокабеля, після чого було змодельовано спектральну густину шуму (вікно частот 1 кГц – 10 МГц), значення якої було виміряно на виході попереднього операційного підсилювача кожного каналу. Результати демонструють значне зменшення рівня шуму для “мертвого” каналу від 697 [e] до 45 [e] (рис. 2.12.в). Результати демонструють, що шум, що виникає в кремнієвому сенсорі перевищує комбінацію шумів, що виникають в мікрокабелі та зчитувальній електроніці разом із шумом індукованим через паразитну ємність мікрокабеля.

Результати дослідження впливу “мертвих” каналів на розподіл зареєстрованого заряду та рівень шуму демонструють важливість врахування паразитних ефектів при симуляції детекторного модуля КТС. Отримані результати можуть бути використані для ідентифікації “мертвих” каналів під час збірки модуля, тестування та експлуатації детектора СВМ, що покращать загальну якість детектора, та дозволить використовувати сигнали зареєстровані такими каналами, через опис розподілу зареєстрованого заряду через сусідні канали, що покращить ефективність реконструкції фізичних подій та частинок, що у них утворилися.

Окрім цього, результати дозволяють оцінити мінімальну кількість каналів, необхідних для адекватного опису роботи модуля КТС без симулювання повного модуля – вісім, що дозволяє повноцінно симулювати зчитувальний канал та його сусідів, для дослідження як окремих каналів так і паразитних ефектів між близько розташованими каналами. За такого підходу, симуляції

можуть бути виконані значно швидше (що є важливим фактором за необхідності швидкої обробки сигналів) без втрати якості результатів, оскільки, як було продемонстровано, вплив паразитних ефектів не розповсюджується далі ніж на сусідів третього порядку.

“Буферні” канали

Важливо відзначити, що у випадку дослідження рівня шуму для багатоканальної схеми, для двох крайніх каналів з обох сторін схеми спостерігається помітне відхилення значень рівня шуму (рис. 2.12.в). Це спричинено інакшим розподілом заряду на краях схеми внаслідок іншої кількості сусідніх каналів у порівнянні із рештою каналів, розташованими ближче до центру схеми. Для подальшої розбудови схеми, необхідне досягнення монотонного рівня шуму для всіх модельованих каналів, без спотворення вихідного сигналу.

Оскільки причина нерівномірності рівня шуму полягає у відсутності достатньої кількості сусідніх елементів із паразитними ємностями, рішення полягає в імплементації додаткової комбінації елементів із відповідною ємністю для компенсації різниці у рівні шуму.

Одним варіантом рішення є “широкі” канали (рис. Б3.б), що мають аналогічну структуру до звичайних 8-ми каналів, але модифіковані номінальні значення резисторів та конденсаторів, що відповідають ~ 500-та стандартним паралельним каналам (якщо прийняти, що початкові вісім стріпів розташовані приблизно в центрі сенсора). Такий метод значно покращує рівень шуму крайніх каналів (рис. 2.13.а) та не спотворює вихідний сигнал (рис. 2.13.б). Однак цей метод, технічно, вимагає використання нових компонент, загальний вплив яких на систему загалом складно передбачити. З цієї причини, цей метод не використовувався.

Технічно простішим та кращим рішенням є імплементація двох додаткових стандартних “буферних” каналів з кожної сторони (рис. Б3.в). Фактично таке рішення є розширенням схеми від 8-ми до 12-ти канального

детекторного модуля де два крайні канали (1-й, 2-й, 11-й та 12-й) використовуються виключно для досягнення монотонного рівня шуму для центральних восьми каналів. Такий підхід демонструє кращі результати за “широкі” канали (рис. 2.13.а) та не спотворює вихідний сигнал (рис. 2.13.б).

У подальшій симуляціях для отримання монотонних значень рівня шуму було використано “буферні” канали, з огляду на їх просту, гарно зрозумілу будову та роботу та якість отриманих результатів.

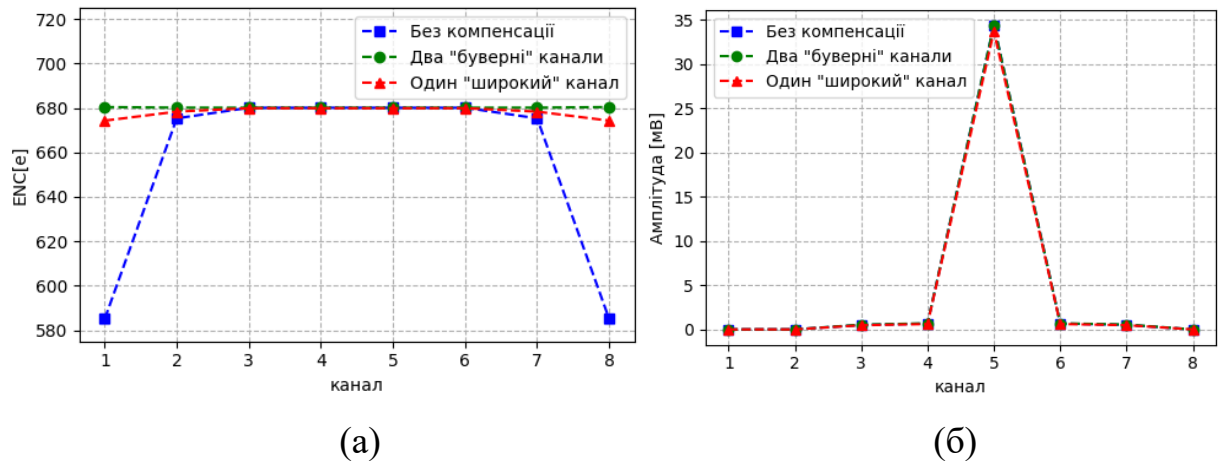


Рис. 2.13 Дослідження впливу додаткових конструкцій на: (а) монотонність рівня шуму та (б) поведінку вихідного сигналу.

Вплив паразитних ефектів

З попередніх досліджень детекторних модулів КТС, гарно відомо, що паразитні ефекти, що виникають між компонентами модуля, мають значний вплив на рівень шуму та розподіл задетектованого заряду. Водночас, комбінація впливів від довжин декількох компонент призводить до ґрунтовно відмінної поведінки у модулях – кожен модуль є унікальним (розмір сенсора, довжина кабелів, розташування у системі).

З метою оцінки впливів довжин компонент на характеристики модуля КТС, було виконано симуляції розподілу задетектованого заряду в модулях із різною комбінацією довжин кабелів (рис. 2.14) та розмірів сенсорів (рис. 2.15). Результати представлено у вигляді залежностей відношення амплітуд вихідних сигналів сусідніх каналів (1-4) A до амплітуди вихідного сигналу

інжектowanego каналу A_0 від параметрів модуля l_{cable} та l_{strip} (довжини кабелів та розміру сенсора відповідно).

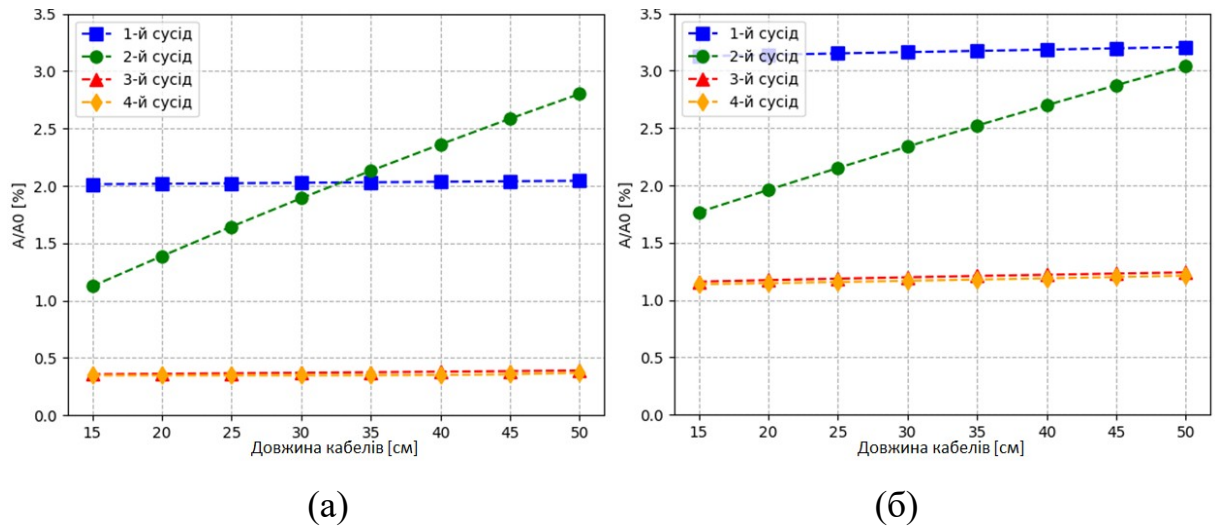


Рис. 2.14 Відношення амплітуди сигналу на сусідніх каналах до амплітуди інжектowanego каналу в залежності від довжини мікрокабеля (15 – 50 см) для граничних розмірів сенсора: (а) 2.2 см сенсор, (б) 12.4 см сенсор.

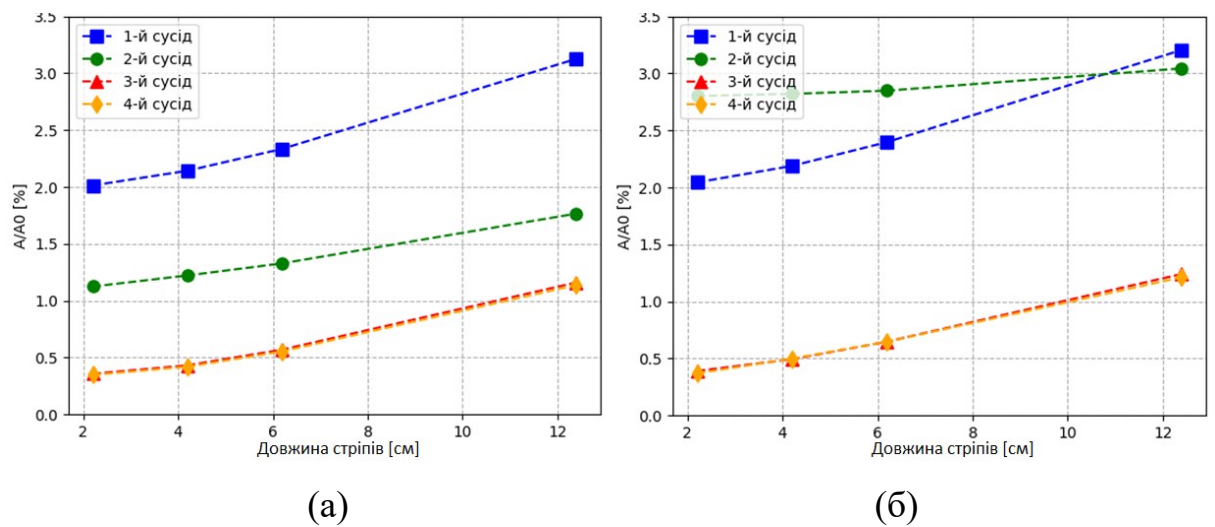


Рис. 2.15 Відношення амплітуди сигналу на сусідньому каналі до амплітуди інжектowanego каналу в розмірі сенсора (2.2 – 12.4 см) для граничних довжин мікрокабеля: (а) 15 см кабель, (б) 50 см кабель.

У випадку впливу довжин кабелів (рис. 2.14), для 1-го, 3-го та 4-го сусідів спостерігаються мінімальні зміни при збільшенні довжини кабелів, водночас, для 2-го сусіду спостерігається збільшення відношення майже в три рази. Така поведінка викликана значним збільшенням паразитної ємності між сусідніми

кабелями для інжектowanego каналу та його 2-го сусіда, вплив на 4-го сусіда через паразитні ефекти між кабелями є мінімальним через значний спад у кількості переданого заряду. Варто відмітити, що для сенсорів меншого розміру (рис. 2.14.а) тип домінуючих паразитних ефектів залежить від довжини кабелів: до 33 см домінують ефекти між сусідніми стріпами, понад 33см - ефекти між сусідніми кабелями. Для сенсорів більшого розміру, переважний вплив мають паразитні ефекти між стріпами (рис. 2.14.б).

У випадку різних розмірів сенсорів (рис. 2.15) спостерігається рівномірне зростання співвідношення амплітуд для всіх сусідів. Аналогічно до випадку на рисунку 2.14.а, для модулів із довгими кабелями та короткими сенсорами спостерігається домінування паразитних ефектів між кабелями, що призводить до більшого заряду на 2-х сусідах, ніж на 1-х (рис. 2.15.б).

Варто зазначити, що у всіх розглянутих випадках, амплітуди вихідних сигналів на сусідніх каналах до інжектowanego мають значення величиною порядку 1% від A_0 та мають максимальне значення $\sim 3\%$ для 1-го та 2-го сусідів для модулів із максимальними довжинами сенсорів та кабелів (12.4 см та 50 см відповідно). Загалом, отримані результати переконливо демонструють важливість впливу ємностей між кабелями та розміру сенсора для загального розподілу заряду між усіма сусідніми каналами.

2.1.5 Двостороння схема

Фінальним кроком розробки LTspice аналогу детекторного модуля КТС є імплементація другої сторони детекторного модуля – р сторони, для відтворення паразитних ефектів між елементами його протилежних сторін, що мають значний вплив на рівень шуму та є необхідною компонентою для симуляції розподіл заряду утвореного в об'ємів сенсора між його каналами.

За своєю структурою, р сторона має схожу будову до n сторони (яка до тепер була об'єктом симуляцій), але має одну важливу відмінність – для зменшення кількості реєстрації “примарних” хітів (див. розділ 1.3.1), металеві стріпи р сторони розташовані під кутом нахилу 7.5° відносно сторін сенсора

та стріпів n сторони. Це призводить до того, що для сенсорів усіх розмірів, p стріпи завжди мають більшу довжину ніж n стріпи та, що деякі з p -стріпів складаються з двох окремих частин, розташованих на протилежних сторонах сенсора та з'єднані між собою за допомогою горизонтальних ліній трасування на металевому шарі (шар подвійної металізації). У комбінації із додатковими паразитними ефектами, що виникають між стріпами протилежних сторін, для реалістичного опису повного детекторного модуля КТС, необхідно відтворити наступні ефекти:

- Більшу довжину p -стріпів,
- Паразитні ємності між стріпами обох сторін та шаром подвійної металізації,
- Паразитні ємності між стріпами протилежних сторін.

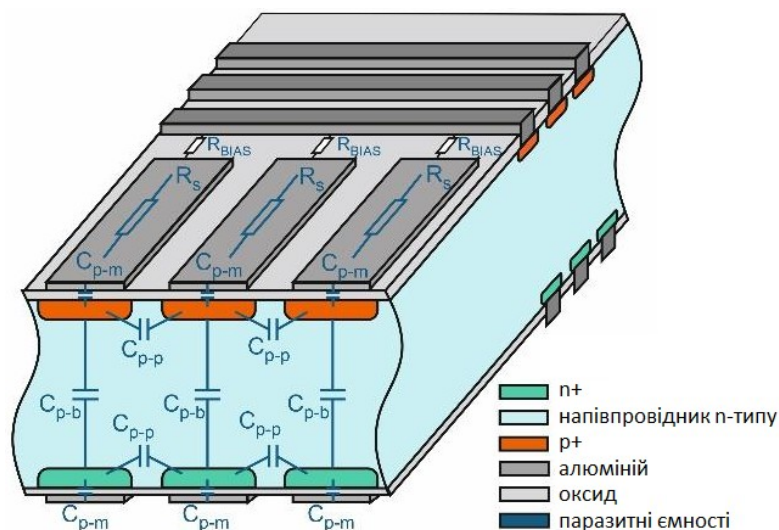


Рис. 2.16 Поперечний переріз двостороннього стріпового сенсора та паразитні ємності, що виникають між його компонентами [76].

Довжина p стріпів

Для врахування додаткової довжини p -стріпів, на основі LTspice компоненти “strip” (рис. 2.9.a) було створено дві окремі компоненти - “n-strip” та “p-strip” (рис. 2.17), що є однаковими за будовою, але мають відмінні значення опорів резисторів з яких складається металевий стріп - R_{Al} та R_{Al2} , та ємностей C_{iAC} та $C_{coupling}$, що визначені, як функції довжини відповідних стріпів.

Таке рішення дозволяє описати цей ефект без створення нових компонент, що виключає можливість виникнення непередбачених ефектів.

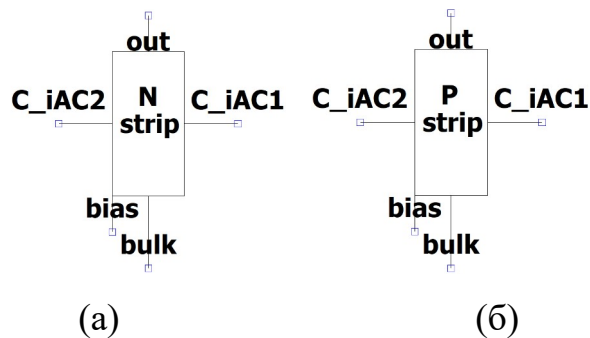


Рис. 2.17 LTspice компоненти “n-strip” (a) та “p-strip” (б) використані при симуляції двостороннього кремнієвого сенсора.

Шар подвійної металізації

З попередніх вимірювань електричних характеристик детекторних модулів КТС відомо, що загальна паразитна ємність стріпів складає 1.02 пФ/см та 1.33 пФ/см для n та p сторін відповідно [81], в той час як паразитна ємність спричинена наявністю шару подвійної металізації складає лише 15 фФ/см. Мотивуючись незначним внеском цього ефекту та для збереження відносної простоти розробленого LTspice програмного аналогу, для врахування впливу шару подвійної металізації на рівень шуму, його фінальні значення множаться на фактор 1.0015 та 1.0011 для n та p сторін відповідно.

n-p паразитні ємності

При моделюванні паразитної ємності між стріпами протилежних сторін використовується величина паразитної ємності виміряна у [81], що складає 0.24 нФ на один канал детекторного модуля із сенсором $62 \times 22 \text{ мм}^2$.

Через різну довжину, n та p стріп мають різну кількість перетинів. Кількість перетинів на сантиметр довжини для n та p стріпів (N_n та N_p відповідно) може бути оцінена наступним чином (рис.2.18):

$$\Delta x = 58 \text{ мкм} \quad (2.5)$$

$$\Delta y = \Delta x / \tan 7.5^\circ = 440.6 \text{ мкм} \quad (2.6)$$

$$N_n[1/cm] = l[cm]/\Delta y \approx 22.7 [1/cm] \quad (2.7)$$

$$N_p [1/cm] = l[cm] \cdot \sin 7.5^\circ / \Delta x \approx 22.5 [1/cm] \quad (2.8)$$

де Δx – відстань між центрами стріпів (пітч). Як показують розрахунки, для максимальної довжини стріпів (12.4 см сенсор), при загальній кількості перетинів $N_n \cdot 12 \text{ см} \approx 272$, $N_p \cdot 12 \text{ см} \approx 270$, різниця в загальній кількості перетинів між n та p стріпами складає $\Delta = (N_n - N_p) \cdot 12 \text{ см} = 2$, що становить менше ніж 1% від їх загальної кількості. Для менших сенсорів Δ має навіть нижче значення. Для чотирьох можливих розмірів сенсора (22, 42, 62 та 124 мм), N_n має відповідні значення: 45, 90, 136 та 272. Отже, з наведених розрахунків можна зробити висновок, що для опису обох кількостей перетинів для n та p стріпів можна використовувати оцінку (2.7). З оцінок (2.7) та (2.8) було обрано використовувати (2.7), оскільки вона має більше значення, отже немає небезпеки недооцінити рівень шуму сенсора. Вплив цього наближення в подальшому враховано додаючи додаткову похибку в 1% до результатів симуляції рівня шуму (реальна похибка є значно меншою).

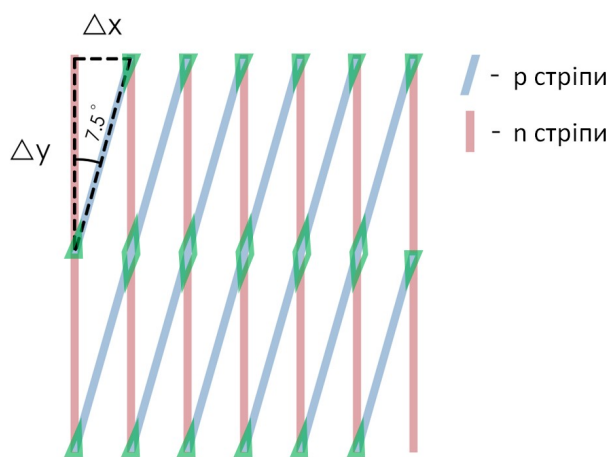


Рис.2.18 Стріпова ґратка сенсора КТС. Стріповий крок становить 58 мкм, кут між стріпами протилежних сторін – 7.5° . Просторова роздільна здатність у горизонтальному та вертикальному напрямках визначається величинами Δx та Δy відповідно. Місця перетину стріпів формують умовні пласкі конденсатори (позначено зеленим).

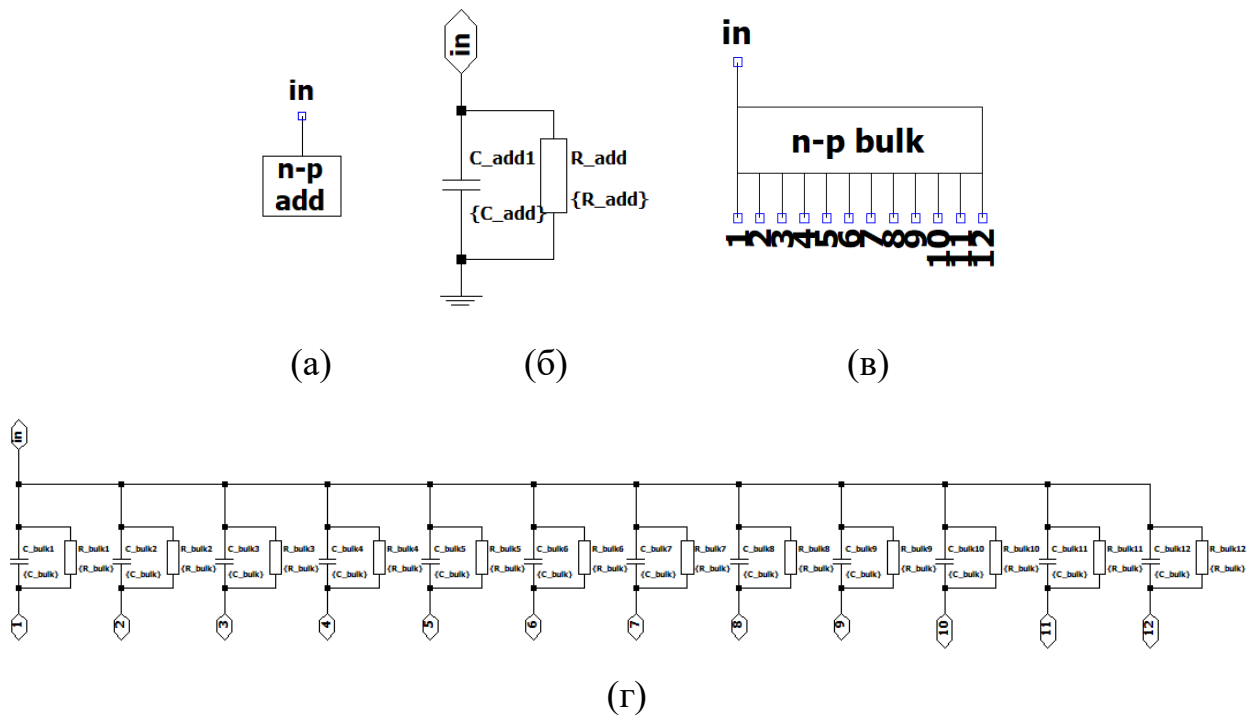


Рис.2.19 (а) новий елемент “n-p add” та його будова (б), (в) новий елемент “n-p bulk” та його будова (г).

Знаючи загальну кількість перетинів для кожного стріпу та ємність утворених плоских конденсаторів, наступним кроком є створення LTspice аналогу конструкції, що відображала б цей ефект.

Для принципової схеми 12-ти каналного детекторного модуля (8 зчитувальних та 4 “буферних” канали) було створено дві нових LTspice компоненти; “n-p bulk” та “n-p add”.

Елемент “n-p bulk” (рис.2.19.в) відтворює паразитні ємності між явно змодельованими стріпами (один з n сторони та 12 на p стороні, або навпаки) та складається з 12-ти паралельних комбінацій резистора та конденсатора. Це залишає $(N_n \cdot l - 12)$ ємностей, що мають бути враховані (де l - довжина стріпів, що моделюється). Для цього використовується елемент “n-p add” (рис.2.19.а), що складається з розташованих паралельно резистора та конденсатора. Їх номінальні значення розраховано як $(N_n \cdot l - 12)$ паралельних конденсаторів та $(N_n \cdot l - 12)$ паралельних резисторів. Кожен стріп під’єднано до його власного елементу “n-p add”.

Для принципової схеми 12-ти каналного детекторного модуля (8 зчитувальних та 4 “буферних” канали), комбінація з 12-ти “n-p bulk” та 24-х “n-p add” елементів повністю відтворює паразитні ефекти, що виникають між стріпами протилежних сторін сенсора.

Повна принципова схема

LTspice аналог схеми двостороннього, 16-ти каналного детекторного модуля КТС складається з наступних компонент (рис. Б4):

- Джерело високої напруги,
- Ланцюг зворотного зв’язку,
- n та p сторони. Кожна сторона має 12 каналів (8 зчитувальних та 4 “буферних”), до кожного з яких під’єднано:
 - індивідуальний генератор сигналу,
 - “n-p bulk” ємність,
 - “n-p add” ємність,
- Додатково, елементи, що раніше були заземлені використовуючи стандартний LTspice елемент, були підключені до опорних потенціалів V_{n_ref} та V_{p_ref} для сторін n і p відповідно, аналогічно до схеми заземлення реалізованої у лабораторії КТС [87].

Описана принципова схема надає можливість симулювати пропагування заряду, утвореного в об’ємі кремнієвого сенсора, через електричний ланцюг детекторного модуля КТС та його зчитувальної електроніки, із генерацією вихідного сигналу та електричного шуму електричних компонент.

Сигнал

Як і у випадку з модулем із одностороннім сенсором (розділ 2.1.4), заряд отриманий одним детекторним каналом перерозподіляється між його сусідніми каналами внаслідок паразитних ефектів. У випадку двостороннього

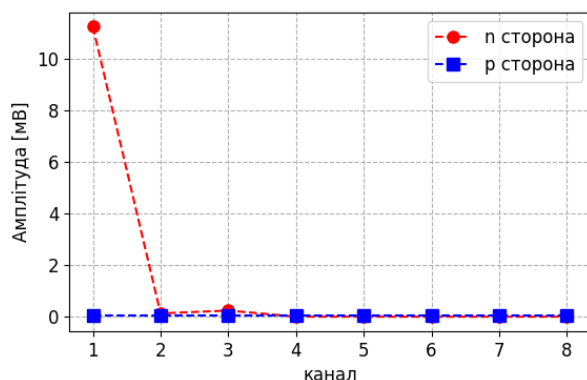
модуля, частина заряду також переходить до каналів протилежної сторони через об'ємну паразитну ємність.

Для оцінки впливу паразитних ефектів на перерозподіл заряду у двосторонньому модулі були виконані симуляції сигналу для двох типів модулів – кабель 50 см, сенсор 2.2 см та кабель 15 см, сенсор 12.4 см. Ці варіації модулів були обрані, оскільки вони є граничними випадками для їх фізичного розташування у детекторі КТС (найбільш центральний та найбільш периферійний модуль) та для джерел паразитних ємностей (центральный – домінуючий вплив від кабелів, периферичний - домінуючий вплив від сенсора). В обох випадках заряд розміром 0.35 фКл було інжектровано на перший канал n сторони.

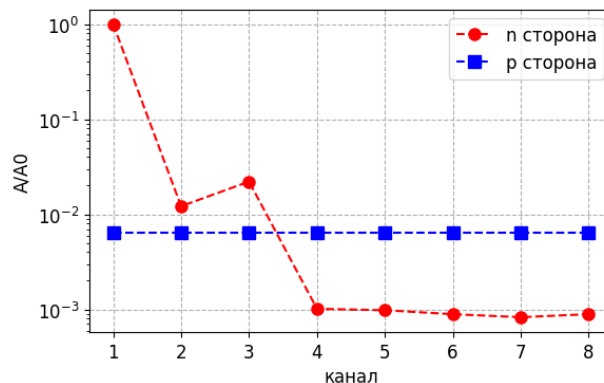
Для центрального модуля (рис. 2.20), результати демонструють значний вплив паразитних ємностей між кабелями, що призводить до переважного перетікання заряду між непарними каналами n сторони. Така ж поведінка була виявлена для одностороннього сенсора (рис. 2.14). Значення заряду, що було передано каналам p сторони є однаковим для всіх симульованих каналів, оскільки, в такій конфігурації, кожен канал p сторони перетинає всі канали n сторони, отже і кількість переданого заряду є однаковою. Варто зазначити, що в фізичному детекторному модулі така поведінка спостерігатиметься виключно для каналів p сторони, що перетинають інжектований канал n сторони, решта матиме заряд близький до нуля.

Для периферичного модуля (рис. 2.21) спостерігається домінування міжстріпових паразитних ефектів, що призводить до рівномірного спадання перерозподіленого заряду з віддаленням від інжектованого каналу. Аналогічно до попереднього випадку, заряд переданий каналам p сторони є однаковим для всіх симульованих каналів.

У порівнянні із центральним, периферичний модуль має значення амплітуди для інжектованого каналу менше на 74.2% за однакового значення інжектованого заряду. Ці втрати пояснюються значним збільшенням загального опору системи.

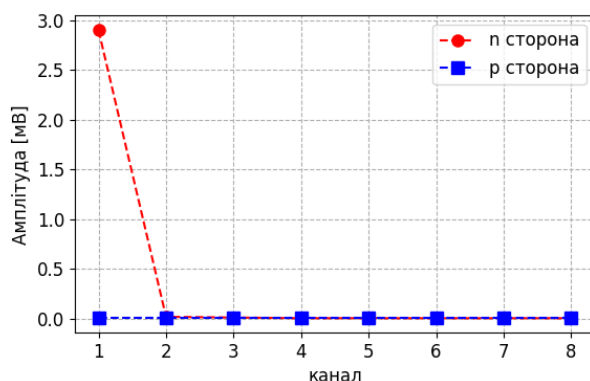


(а)

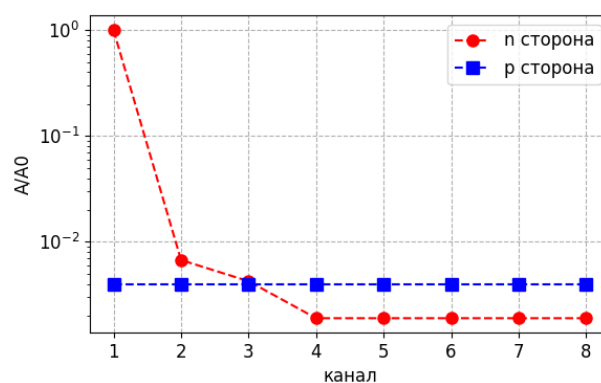


(б)

Рис. 2.20 Кабель 50 см, сенсор 2.2 см: (а) амплітуда сигналу для кожного каналу обох сторін; (б) відношення амплітуди сигналу у кожному каналі до амплітуди сигналу в каналі, що було інжектровано (A_0).



(а)



(б)

Рис. 2.21 Кабель 15 см, сенсор 12.4 см: (а) амплітуда сигналу для кожного каналу обох сторін; (б) відношення амплітуди сигналу у кожному каналі до амплітуди сигналу в каналі, що було інжектровано (A_0).

Результати симуляції сигналу для детекторних модулів КТС демонструють узгодженість із попередніми оцінками поведінки заряду всередині системи.

Шум

Результати симуляції рівня шуму для двостороннього детекторного модуля КТС демонструють:

- Підвищення загального рівня шуму приблизно на 190 [e] у порівнянні із результатами для аналогу одностороннього модуля (рис. 2.13), що є очікуваним через додаткові паразитні ефекти між двома сторонами модуля,
- Вищий рівень шуму для каналів р сторони, що є очікуваним через їх більшу довжину, що призводить до більших паразитних ефектів та більших опорів металевих стріпів.

Результати симуляцій демонструють узгодженість із рівнем шуму виміряним у лабораторії КТС, головними характеристиками якого є рівень шуму порядку 1000 [e] та вищий рівень шуму для каналів р сторони.

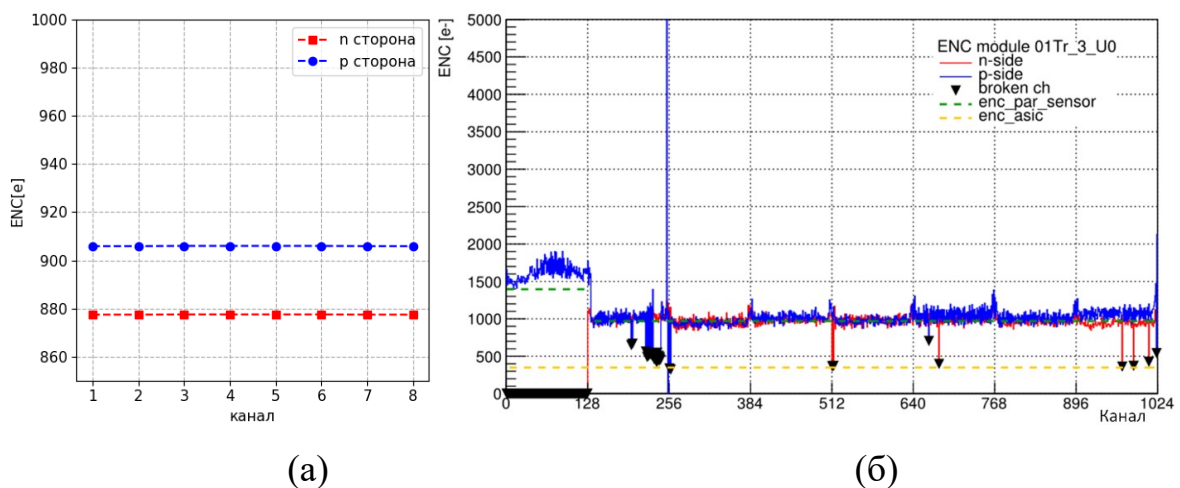


Рис. 2.22 Кабель 50 см, сенсор 2.2 см (а) симуляція рівня шуму двостороннього детекторного модуля КТС; (б) виміряний рівень шуму детекторного модуля у лабораторії КТС [87].

Рівень шуму ~ 1000 [e] однією з основних вимог до детекторних модулів КТС для ефективної реєстрації слабких сигналів. Варто зазначити, що це значення рівня шуму є ідеальним. Кожен детекторний модуль може мати унікальні дефекти, що можуть непередбачувано на рівень шуму. Тому, перш за все, метою симуляцій є відтворення поведінки рівня шуму та сигналу в залежності від параметрів системи, а не точність отриманих числових значень, оскільки точне відтворення числових результатів є принципово неможливим.

2.1.6 Висновки

На етапі дослідження характеристик детекторних модулів КТС було розроблено LTspice аналог схеми детекторного модуля із двостороннім стріповим кремнієвим сенсором із 8-ма каналами на кожній стороні. Використовуючи розроблений програмний аналог, було виконано моделювання функціонування детекторних модулів КТС: рівень шуму та розподіл зареєстрованого заряду між каналами модуля. Симуляції були виконані для декількох можливих варіацій детекторних модулів (розмір сенсора та довжини кабелів). Отримані результати узгоджені із існуючими вимірюваннями та аналітичними передбаченнями. Розроблений інструмент надає можливість покращити контроль якості модулів КТС шляхом виявлення дефективних стріпів (що також покращить якість реконструкції задетектованих подій) та детально дослідити процес реєстрації та обробки заряду електронікою КТС, що є неможливим при використанні поточної моделі відгуку детектора КТС. LTspice аналог також продемонстрував свою ефективність передбачивши можливі проблеми в роботі детекторного модуля, що пізніше були виявлені при тестуванні модифікованих модулів для експерименту J-PARC E16. Результати симуляцій з використанням розробленого аналогу були використанні для удосконалення електроніки нової версії детекторних модулів КТС [93].

Необхідними вхідними даними для виконання симуляцій є характеристики детекторного модуля (розміри сенсора та довжини мікро-кабелів) та характеристики зареєстрованого сигналу (розподіл заряду в часі). Характеристики детекторного модуля є заздалегідь відомими, характеристики сигналу можуть бути оцінені аналітично, або отримані із симуляцій взаємодії іонізуючих частинок із сенсором та транспорт утворених електронів до металевих стріпів.

2.2 Симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС

У сучасній експериментальній фізиці важливу роль відіграють комп'ютерні симуляції, що дозволяють досліджувати взаємодію частинок із речовиною. Вони дозволяють з високою точністю передбачити поведінку детекторних систем при їх експлуатації, що використовується для покращення їх конструкції. Такі програми широко застосовуються у фізиці високих енергій, ядерній фізиці та суміжних наукових галузях. Використання подібних симуляцій є критично важливим для розробки та оптимізації детекторних систем у великих експериментах фізики елементарних частинок.

У попередній версії модулі відгуку, для детекторних модулів КТС такі процеси оцінювалися аналітично, однак для цього була використана велика кількість грубих наближень [93]. З метою відтворення повної послідовності процесів при реєстрації подій детекторним модулем КТС та для покращення моделі відгуку, було прийнято рішення використовувати симуляції взаємодій частинок із матерією, для визначення характеристик сигналів, що мають бути згенеровані для симуляції аналогової електроніки детекторного модуля КТС.

2.2.1 Geant4 та Allpix²

Geant4 (GEometry ANd Tracking) – набір бібліотек програм, призначених для симуляції взаємодії елементарних частинок з матерією використовуючи метод Монте-Карло [61]. Geant4 є одним із найбільш поширених інструментів для виконання таких досліджень, оскільки він дозволяє симулювати процеси взаємодії іонізуючого випромінювання з різними матеріалами, включно із процесами іонізації, гальмівного випромінювання, комптонівського розсіяння, фотоелектричного ефекту тощо. За допомогою цієї програми можливо створювати детальні геометричні моделі експериментальних установок та досліджувати поведінку частинок у складних детекторних системах. Однак Geant4 описує лише перший етап процесу - взаємодію частинок із матеріалом

та первинне утворення носіїв заряду. Для повного відтворення роботи кремнієвих сенсорів необхідно враховувати подальші процеси перенесення заряду, формування сигналу та цифрову обробку даних. Для цього використовується Allpix² [94].

Спеціалізований програмний фреймворк Allpix² використовується для більш детального моделювання напівпровідникових детекторів, зокрема кремнієвих піксельних та стріпових сенсорів. Він інтегрує Geant4 та ROOT і дозволяє досліджувати процеси утворення електрон-діркових пар, дрейф носіїв заряду під дією електричного поля, процеси дифузії та збирання заряду на електродах. Однією з ключових переваг Allpix² є його модульна структура. Кожен фізичний процес реалізується у вигляді окремого модуля, який можна конфігурувати або замінювати залежно від потреб дослідження. Окремі модулі відповідають за генерацію частинок, енергію іонізації з Geant4, дрейф носіїв заряду, моделювання зчитувальної електроніки та формування сигналу. Такий підхід дозволяє гнучко налаштовувати симуляцію відповідно до архітектури певної детекторної системи.

Процес симуляції складається з кількох етапів. На першому етапі Geant4 генерує первинні частинки та моделює їх взаємодію з матеріалом сенсора. Результатом цього етапу є мапа енерговиділення вздовж траєкторії частинок. На другому етапі Allpix² використовує цю інформацію для генерації електрон-діркових пар у відповідних точках об'єму сенсора. Далі відбувається моделювання руху носіїв заряду під дією внутрішнього електричного поля сенсора. Електрони та дірки дрейфують до відповідних електродів, при цьому зазнаючи дифузії. Точне моделювання цих процесів є важливим для прогнозування просторової точності детектора та розподілу заряду між сусідніми пікселями або стріпами. Після збору заряду на електродах відбувається моделювання електроніки зчитування. У випадку моделювання детекторного модуля КТС, на цьому етапі, отримані дані використовуються для опису характеристик зареєстрованого сигналу та подальшого моделювання роботи аналогової електроніки використовуючи LTspice модель.

2.2.2 Геометрія сенсора

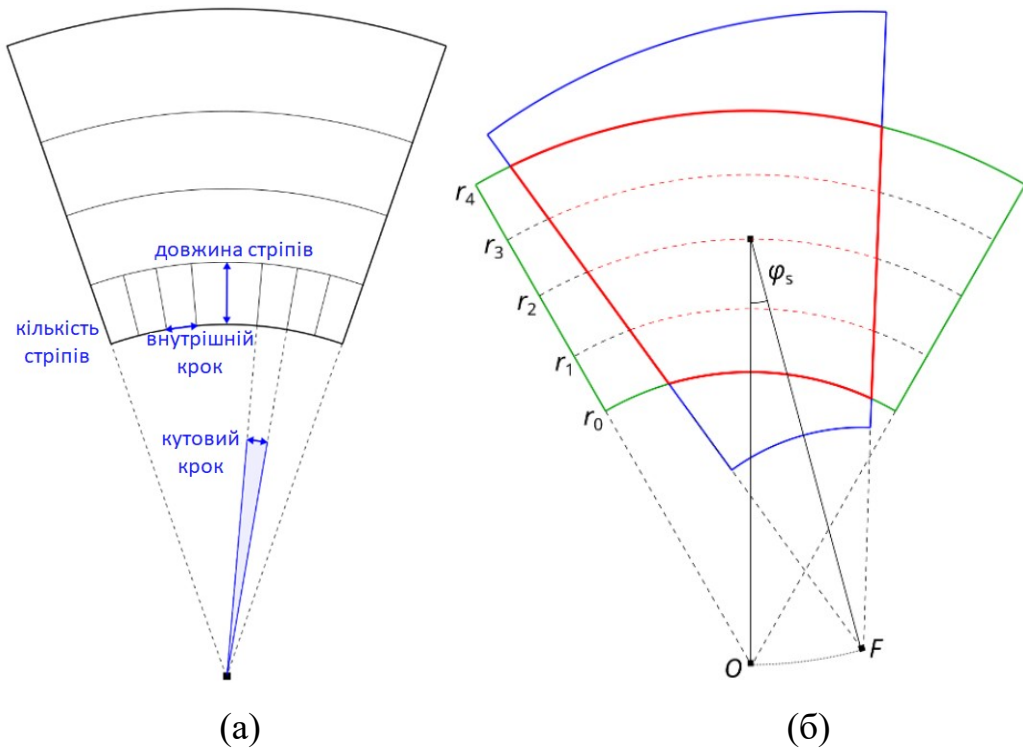


Рис. 2.23 Приклади моделі радіального стріпового сенсора: (а) односторонній сенсор; (б) двосторонній сенсор із кутом нахилу між сторонами φ_s .

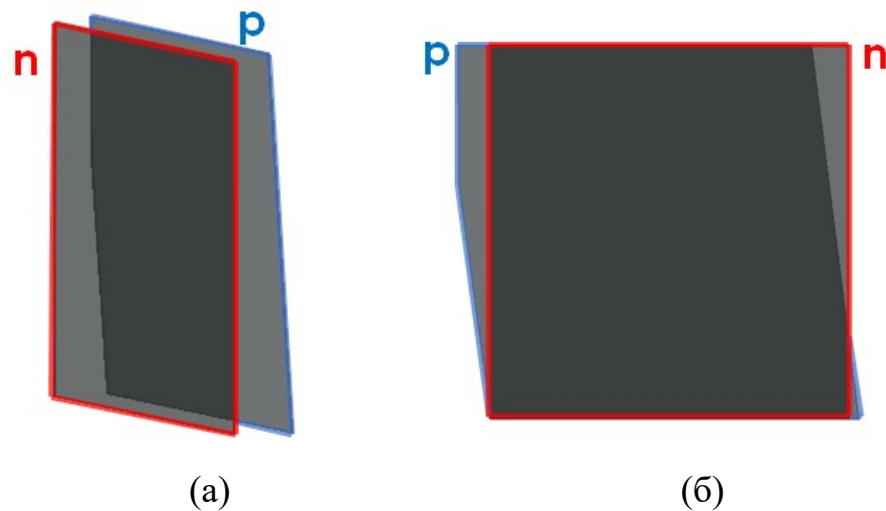


Рис. 2.24 Просторова візуалізація 62×62 мм² кремнієвого стріпового сенсора, змодельованого за допомогою Allpix²: (а) n та p сторони рознесені для демонстрації конструкції; (б) вигляд сенсора спереду.

Allpix² дозволяє моделювати різні геометрії сенсорів: прямокутні та шестикутні піксельні сітки та радіальні стріпові канали. Однак, Allpix² не

передбачає окремої моделі для прямокутних стріпових сенсорів. Це обмеження можливо обійти використовуючи модель двостороннього радіального стріпового сенсора (рис. 2.23), задавши близьке до нуля значення кутового кроку. При такому кутовому кроці, стріпи сенсора можна наближено вважати паралельними. Інші параметри, необхідні для генерації геометрії сенсора: кількість стріпів на кожній стороні – 1024, довжина стріпів – 62 мм (для n сторони), крок між стріпами – 58 мкм, кут між n та p сторонами – 7.5° , товщина сенсора – 320 мкм. На рисунку 2.24 зображено дві сторони такого сенсора окремо (а) та його вигляд спереду (б).

2.2.3 Іонізуюче випромінювання. Розподіл утворених зарядів

Для відтворення ланцюга реєстрації подій, наступним кроком є симуляція взаємодії іонізуючого випромінювання із кремнієвим сенсором. Для цього необхідно визначитися із джерелом такого випромінювання.

Під час проведення експерименту СВМ у p -Au та Au-Au зіткненнях передбачається утворення великої кількості різноманітних типів іонізуючих частинок (іони, фотони, електрони, адрони тощо) із широким діапазоном можливих енергій. За таких умов, виокремити певне еталонне джерело, для оцінки якості роботи детекторних модулів неможливо. Необхідно використовувати гарно досліджене джерело.

Джерелом іонізуючого випромінювання, що використовуються при тестуванні детекторних модулів КТС в лабораторії КТС є β -активний ^{90}Sr [61] із максимальною енергією електронів $E_{\text{кін}} = 546$ кеВ. Оскільки при моделюванні роботи детекторних модулів КТС нас цікавлять процеси зарядообміну та обробки сигналу, що відбуваються у швидкій зчитувальній електроніці при реєстрації одиничних подій, потреби у генерації повного β -спектру немає, оскільки це вимагає значної статистики, що значно ускладнить аналіз для одиничних подій. З огляду на це, джерелом іонізуючого випромінювання були обрані електрони із енергією 546 кеВ. Місце генерації та напрям руху електронів генеруються випадковим чином для збереження

випадковості в утворенні зарядів у сенсорі та їх розподілі між стріпами. Електрони та сенсор знаходяться у вакуумі для уникнення небажаних процесів, що виникають при взаємодії іонізуючого випромінювання із повітрям.

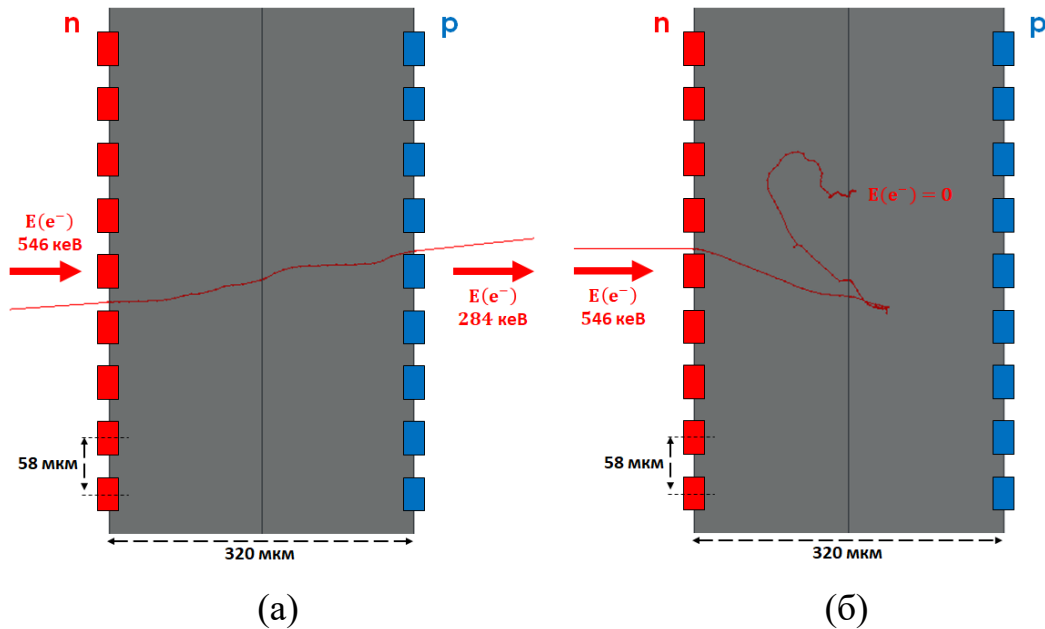


Рис. 2.25 Візуалізація двох випадків взаємодії електрона, із початковою енергією 546 кеВ, із кремнієвим сенсором шириною 320 мкм (а) наскрізний проліт (б) повне поглинання електрона.

На рисунку 2.25 зображено візуалізацію для двох випадків симуляції взаємодії електрона (546 кеВ) із кремнієвим сенсором, виконаних Allpix²: втрата електроном частини енергії при наскрізному прольоті через сенсор (рис. 2.25.а) та повне поглинення електрону (рис. 2.25.б).

Вихідними даними отриманими після виконання такої симуляції за допомогою Allpix² є ряд характеристик носіїв заряду, утворених при взаємодії електрону, що налітає, із кремнієвим сенсором. Приклад – координати утворених носіїв заряду (рис. 2.26.а,б, рис. 2.27 а б) та час їх утворення (рис. 2.26.в,г, рис. 2.27.в,г). Варто відзначити, що наслідком використання моделі геометрії двостороннього стріпового сенсора в Allpix² є розбиття сенсора на дві умовні половини – р та n, що впливає лише на формат запису даних і не

перешкоджає процесам транспортування, дифузії та рекомбінації носії заряду між сторонами.

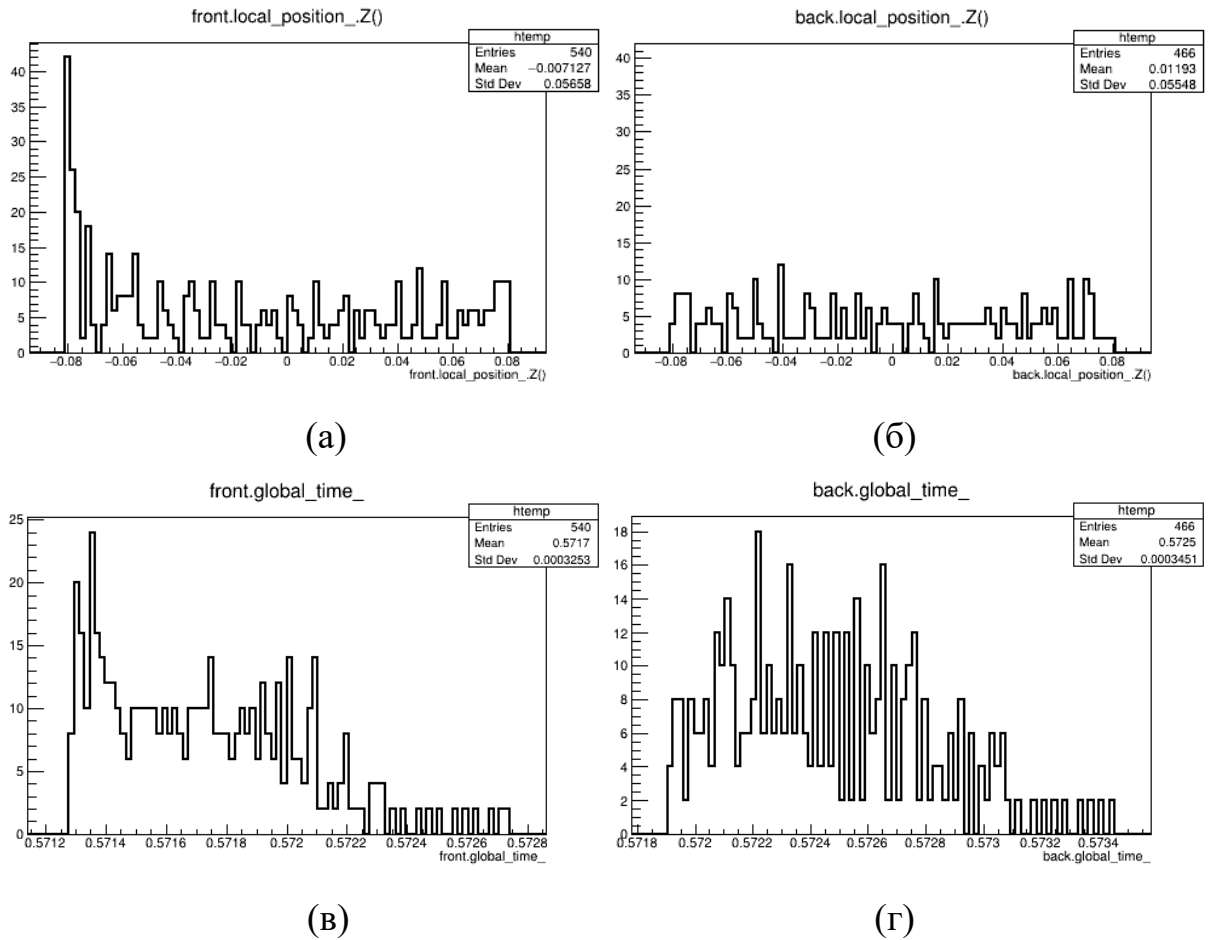


Рис. 2.26 Наскрізний проліт електрону через сенсор: (а) координати утворення носіїв заряду та (в) час їх утворення для п сторони, (б) координати утворення носіїв заряду та (г) час їх утворення для р сторони.

Важливими даними для подальших LTspice симуляцій обробки сигналу, є кількість носіїв заряду зареєстрованих кожним стріпом сенсора. Для STS-ХУТЕР час інтегрування у повільному каналі становить 90–280 нс [54]. Час збору носіїв заряду, утворених на протилежному електроді, дорівнює 8 нс для електронів і 22 нс для дірок (за напруги зміщення 100 В та товщини сенсора 320 мкм) [76]. Таким чином, для детекторних модулів КТС час інтегрування перевищує сигналу час збору. Отже, в цьому випадку, розподілом зареєстрованого заряду в часі можна знехтувати, і натомість вважати, що весь

заряд утворений в кремнієвому сенсорі приходить на відповідні стріпи одночасно.

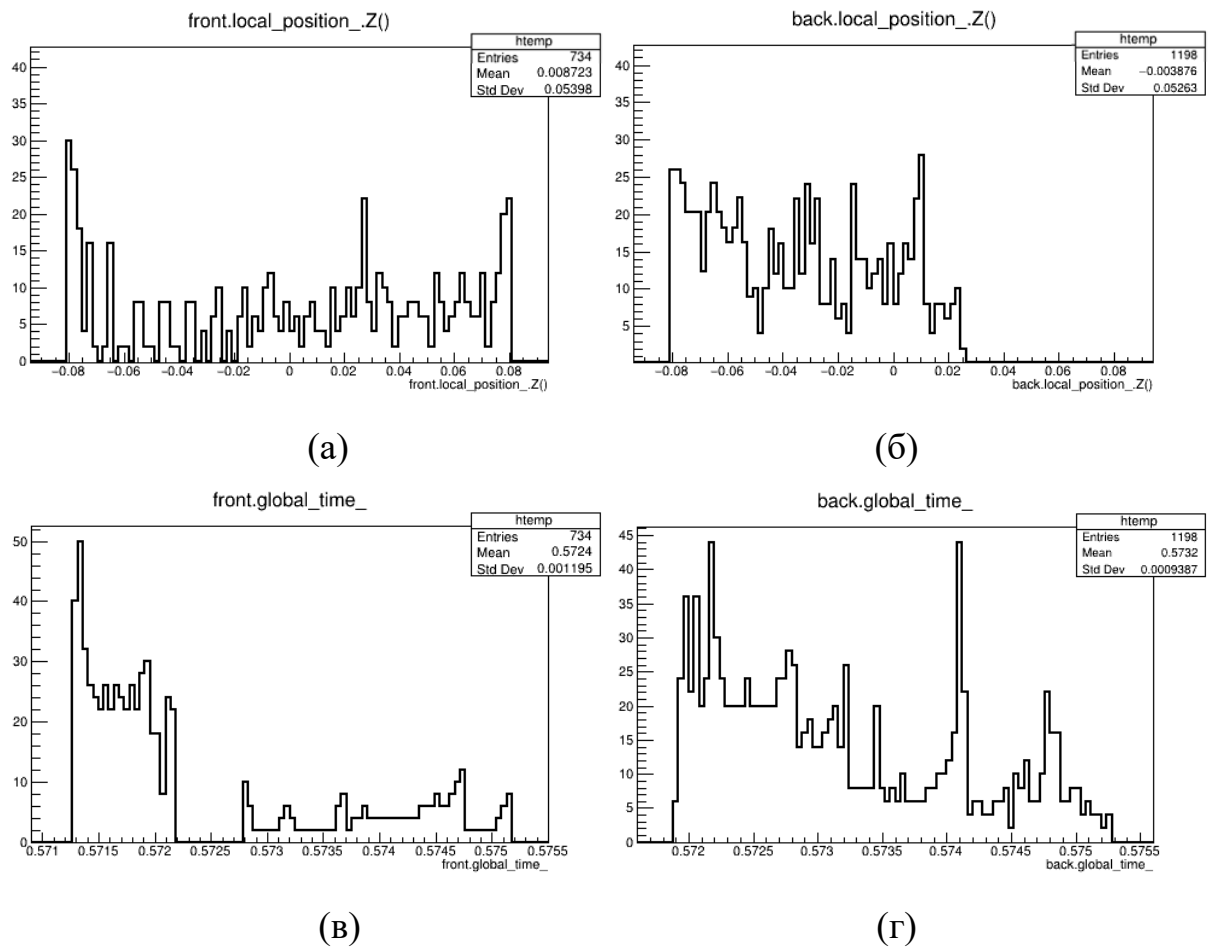


Рис. 2.27 Повне поглинання електрону: (а) координати утворення носіїв заряду та (в) час їх утворення для n сторони, (б) координати утворення носіїв заряду та (г) час їх утворення для p сторони.

На рисунку 2.28 зображено симуляції вихідних сигналів центрального детекторного модуля КТС (кабелі 20 см, сенсор 2.2 см) із двостороннім сенсором (8 стріпів на кожній стороні) для обох раніше описаних випадків взаємодії електрону із сенсором – наскрізний проліт (рис. 2.28.а) та повне поглинання (рис. 2.28.б). Значення величини вхідного сигналу для кожного каналу використовувалося із отриманих результатів Allpix² симуляцій.

Для обох випадків, результати демонструють чіткі піки для каналів, що отримали більшість утвореного заряду.

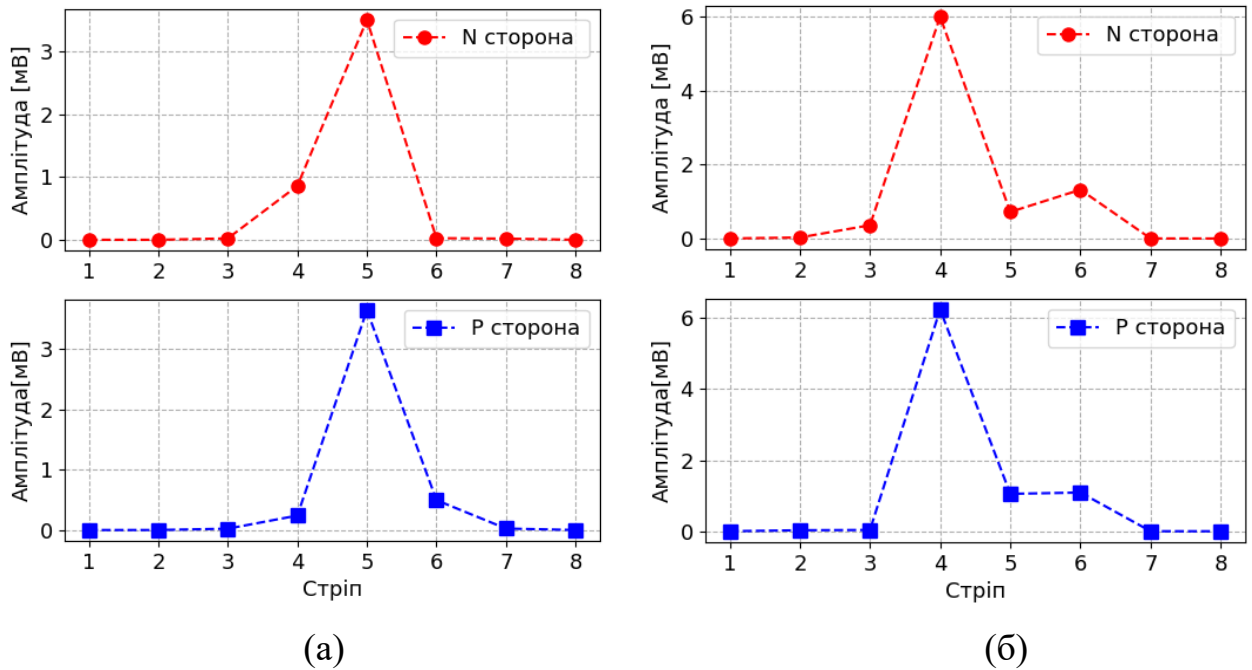


Рис. 2.28 Симуляції LTspice вихідних сигналів детекторного модуля КТС (кабелі 20 см, сенсор 2.2 см) для (а) наскрізного прольоту, (б) повного поглинання електрона із енергією 546 кеВ.

Для випадку наскрізного прольоту, на n стороні заряд був зібраний 4-м та 5-ми стріпами та 4-м, 5-м та 6-м стріпами на р стороні, що гарно демонструє майже прямолінійний рух електрона через об'єм сенсора вздовж осі z із мінімальним відхиленням по осі x та зміщенням приблизно на 70 мкм по осі y. Оскільки крок між стріпами складає 58 мкм, можливо очікувати розподілу переважної частини утворених носіїв заряду між двома або трьома найближчими стріпами, що і було отримано.

Для випадку повного поглинання, на n стороні заряд був зібраний 3-м, 4-м, 5-м та 6-м стріпами та 4-м, 5-м та 6-м стріпами. Такий розподіл демонструє ширший розподіл заряду із вищими амплітудами, у порівнянні із наскрізним прольотом. В цьому випадку розподіл відповідає довшому шляху електрона усередині об'єму сенсора та більшій втраченій енергії.

Загалом, результати застосування Allpix² для моделювання взаємодії іонізуючого випромінювання із двостороннім кремнієвим стріповим сенсором, утворення носіїв заряду та їх розподілу між стріпами із подальшим

використанням отриманих розподілів для симуляції вихідного сигналу детекторного модуля КТС, продемонстрували грану узгодженість із очікуваними результатами. Також, параметри сенсора та іонізуючого випромінювання у Allpix² можуть бути модифіковані для моделювання інших видів іонізуючого випромінювання (інші частинки, енергії, частоти взаємодії тощо) та детекторних модулів із іншими характеристиками сенсорів (розміри, кількість стріпів, напруга зміщення тощо).

2.2.4 Висновки

Симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС були виконані із метою отримання даних про зареєстровані частинки, їх координати та час, кількість утворених носіїв заряду, їх координати, час утворення та їх подальший дрейф до відповідних стріпів сенсора.

Завдяки методам, що застосовує спеціалізований програмний фреймворк Allpix², для кожного каналу LTspice схеми детекторного модуля КТС, можливо отримати розподіл утвореного заряду у часі, що ним реєструється. Ці розподіли є необхідними вхідними даними для подальших симуляцій аналогової електроніки модулів КТС.

Використаний підхід має значну перевагу над аналітичними методами, використаними у попередніх ітераціях симуляцій модулів КТС, оскільки вони явно симулюють весь шлях іонізуючих частинок через кремнієвий сенсор із урахуванням всіх можливих процесів, тоді як аналітичні методи спираються на спрощені підходи шляхом використання наближень та нехтуючи певними процесами.

Розроблений алгоритм дозволяє відтворювати взаємодії будь-якого іонізуючого випромінювання (електрони, фотони, альфа частинки, іони тощо) та всі подальші фізичні події (дрейф, розсіяння тощо) із будь-якою варіацією детекторного модуля КТС (розмір сенсора, положення та кількість стріпів,

напруга живлення стріпів тощо). Всі параметри симуляцій (для сенсора та випромінювання) можуть бути наперед задані користувачем.

2.3 Висновки до розділу 2

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікаціях [92, 95, 96].

Описано процес розробки програмного аналога детекторного модуля КТС, вибір симулятора аналогової електроніки, розробка спрощеної принципової схеми модуля, її тестування, розбудова схеми програмного аналогу із розширенням до багатоканальної та двосторонньої схеми із врахуванням важливих для рівня шуму та обробки сигналу ефектами.

Наведено приклади практичних результатів отриманих за допомогою розробленої симуляції, симуляції взаємодії іонізуючого випромінювання із сенсором детекторного модуля КТС із метою генерації вхідних даних для програмного аналога, приклад функціонування повного ланцюга подій.

Розроблені симуляції продемонстрували гарну узгодженість із фізично вимірними результатами та, передбачивши можливі недоліки схеми та допомогли удосконалити дизайн детекторного модуля КТС шляхом виявлення потенційних проблем при їх експлуатації та дослідження впливу ряду параметрів на їх критично важливі характеристики – рівень шуму, розподіл заряду між зчитувальними каналами та вихідні сигнали.

Розділ 3. Прототип Системи Радіаційного Моніторингу для експерименту CBM

3.1 Мотивація розробки Системи Радіаційного Моніторингу

Моніторинг радіаційних навантажень та положення пучка є важливою технічною частиною будь-якого сучасного експерименту з дослідження фізики важких іонів. Високі радіаційні навантаження є небезпекою, як для обслуговуючого персоналу так і для чутливої електроніки та інших частин детекторної системи. Надійний контроль положення пучка забезпечує досягнення максимально можливої кількості подій при його взаємодії із мішенню та упереджує його вихід за межі апертури, що може призвести до його руйнації та значних пошкоджень частин детекторної системи.

Експеримент CBM, як і всі сучасні експерименти такого гатунку, реалізує моніторинг цих параметрів окремо у кожній детекторній системі (STS, RICH тощо). З огляду на подальшу можливість апгрейду детектора у майбутньому, було запропоновано розроблення спеціалізованої системи радіаційного моніторингу, яка б виконувала моніторинг радіаційних навантажень та положення пучка детекторної системи CBM для покращення операційних умов, контролю стану та збільшення часу життя детекторної системи.

3.1.1 Радіаційні навантаження в експерименті CBM

Радіаційні навантаження, контроль пучка та матеріальний бюджет

Експеримент CBM належить до експериментів нового покоління, спрямованих на вивчення властивостей сильно взаємодіючої речовини за умов надвисоких густин [97]. Детекторна система CBM реалізована у вигляді форвардного спектрометра, який оснащений швидкодійними та радіаційно стійкими підсистемами. Наукова програма експерименту передбачає отримання експериментальних даних із високою статистичною точністю. Досягнення такої точності можливе лише за умови надвисокої частоти ядерних взаємодій між пучком іонів прискорювача SIS-100 та ядрами мішені

до 10 МГц [30]. Експеримент буде проводитися при кінетичних енергіях пучків важких іонів до 11 GeV на нуклон та для протонів до 29 GeV [30, 98]. Зазначені умови експлуатації зумовлюють підвищені вимоги до швидкодії та радіаційної стійкості детекторів, а також до систем моніторингу параметрів пучка і контролю радіаційних навантажень [18]. Проведені дослідження підтвердили, що рівень радіаційної стійкості елементів детектора CBM щонайменше вдвічі перевищує прогнозовані значення загального потоку за весь період експлуатації [56, 57, 99]. Зокрема, для КТС в умовах роботи прискорювача SIS300 загальний потік для внутрішніх сенсорів оцінюється на рівні 10^{14} 1 MeV n_{eq} . Розраховано, що після опромінення до вдвічі більшого рівня, ефективність збору заряду знижується на 15-20%. За таких умов виникає необхідність точного та надійного контролю радіаційних навантажень для захисту чутливих елементів детектора CBM.

Контроль положення пучка заряджених частинок є одним із ключових технологічних елементів сучасних експериментів під час досліджень фізики важких іонів. У складних експериментальних установках, де прискорені іони взаємодіють із мішенями або зустрічними пучками, точність позиціонування та стабільність траєкторії пучка безпосередньо впливають на ефективність реєстрації подій, якість отриманих даних та достовірність подальшого аналізу даних. Навіть незначні відхилення траєкторії можуть призвести до нерівномірного опромінення мішені, зменшення ефективної світності експерименту та збільшення систематичних похибок у вимірюваннях. Це особливо критично в експериментах з важкими іонами, де досліджуються рідкісні процеси та складні колективні явища, пов'язані з утворенням гарячої та щільної ядерної матерії. Крім того, точний контроль положення пучка має важливе значення для захисту обладнання експериментальних установок. Неправильне позиціонування пучка може призвести до локального перевантаження елементів мішені або детекторів, що здатне спричинити їх пошкодження або деградацію характеристик.

Переваги запровадження системи радіаційного моніторингу

За таких умов, вирішального значення набуває впровадження надійної та комплексної системи моніторингу, що охоплює вимірювання й аналіз основних характеристик пучка. Це дозволяє забезпечити ефективний контроль радіаційного навантаження на компоненти детекторної системи, що, у свою чергу, сприяє подовженню терміну їх експлуатації та підвищенню достовірності та якості експериментальних даних. Водночас безперервний моніторинг просторової стабільності пучка іонів відкриває можливості для детального дослідження еліптичних потоків вторинних частинок, які розглядаються як важливі сигнатури утворення кварк-глюонної плазми у процесах ядро-ядерних зіткнень [100].

Однією з головних переваг ефективного контролю положення пучка є підвищення стабільності експериментальних умов. Стабільний пучок забезпечує однорідну взаємодію з мішенню та оптимальні геометричні умови для роботи детекторних систем. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню статистичної точності вимірювань і зменшенню впливу систематичних ефектів, що є критично важливим для дослідження властивостей щільної баріонної матерії. Системи моніторингу та швидкого реагування дозволяють оперативно виявляти відхилення та запобігати аварійним ситуаціям. Контроль положення пучка заряджених частинок відіграє фундаментальну роль у забезпеченні високої точності, стабільності та безпеки експериментів з фізики важких іонів. Його ефективна реалізація сприяє отриманню надійних експериментальних даних, що є необхідною передумовою для поглибленого розуміння властивостей сильно взаємодіючої матерії в екстремальних умовах.

Одним із сучасних експериментів, де було імплементовано та активно використовують таку систему є експеримент LHCb у CERN.

3.1.2 Експеримент LHCb. RMS-R3

Головною метою експерименту LHCb є пошук нової фізики шляхом проведення високоточних вимірювань у секторі важких кварків СМ. Особлива

увага приділяється дослідженню процесів із порушенням CP-симетрії в системах В-мезонів, оскільки саме такі ефекти є чутливими індикаторами можливих відхилень від передбачень теорії. Важливим теоретичним підґрунтям цих досліджень є унітарність матриці Кабіббо–Кобаяші–Маскави (ККМ), яка накладає строгі співвідношення між значеннями її елементів [101]. Фізична програма експерименту LHCb охоплює напрями фізики важких ароматів (зокрема b та c кварків), аспекти електрослабкої взаємодії та квантової хромодинаміки. До переліку ключових досліджень належать:

- Дослідження еволюції системи “матерія–антиматерія”, включно із пошуком і точним вимірюванням ефектів порушення CP-симетрії, що має фундаментальне значення для розуміння причин баріонної асиметрії у Всесвіті,
- Дослідження властивостей розпадів В-мезонів, зокрема процесів із випромінюванням фотонів у кінцевому стані,
- Дослідження прямої та зворотної асиметрій у розпаді $B_d \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$. Такі процеси заборонені в СМ та реалізуються лише через петльові (радіаційні) та коробкові діаграми Фейнмана, що робить їх особливо чутливими до ефектів за межами СМ,
- Визначення коефіцієнта розгалуження розпаду $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$, який є надзвичайно рідкісним та чутливим до внесків нової фізики,
- Вимірювання фази CP-порушення у розпаді $B_s \rightarrow J/\psi \phi$, що виникає внаслідок інтерференції між процесами з та без осциляцій мезона. Ця величина характеризується малою теоретичною невизначеністю, що підвищує її значущість як тесту нової фізики.

Детекторна система LHCb

Детектор експерименту LHCb є форвардним спектрометром загального призначення. Він розташований у точці взаємодії IP8 та оптимізований для проведення досліджень у діапазоні псевдорapidі $2 < \eta < 5$ [102]. Компоненти

модернізованої версії детектора наведено на рисунку 3.1 [103]. Проведена модернізація експерименту суттєво розширила його можливості, зокрема забезпечила можливість проведення досліджень як у колайдерному режимі так і у режимі фіксованої мішені [104]. У модернізованій конфігурації експеримент дозволяє вивчати ядерно-ядерні зіткнення у широкому енергетичному діапазоні – від 0.1 TeV у режимі фіксованої мішені до 14 TeV у колайдерному режимі при миттєвій світності до $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

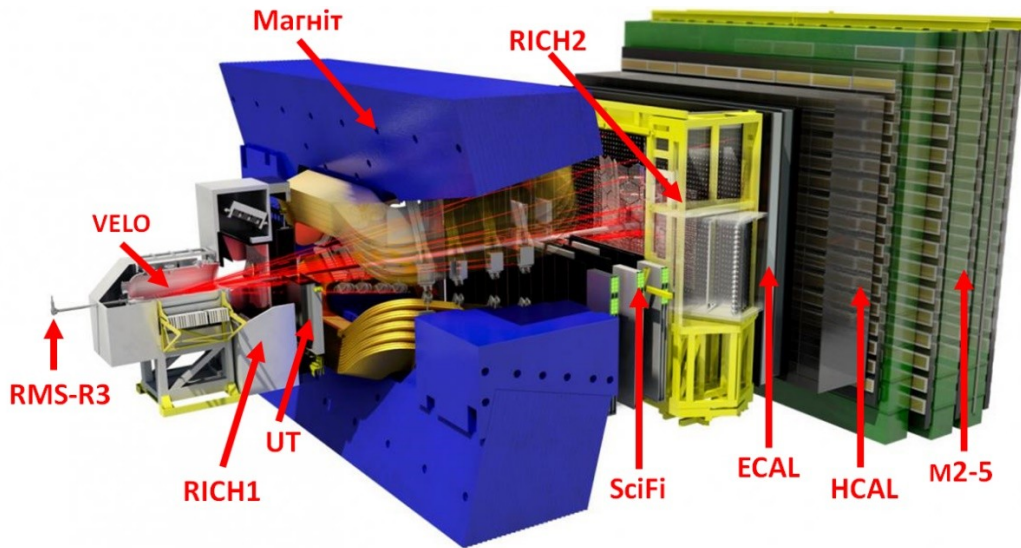


Рис. 3.1 Схематичне зображення детектора LHCb [105] модернізованого для серії фізичних вимірювань Run-3. Системи контролю світності на безпеки експерименту встановлено біля області зіткнення пучків (на рисунку ліворуч), включно із RMS-R3.

Система трекінгу частинок побудована на основі багатокomпонентної детекторної структури, що забезпечує точну реконструкцію траєкторій у широкому діапазоні кінематичних параметрів.

Вершинний трекер (VELO) є ключовим елементом детектора LHCb, призначеним для реконструкції треків, що утворюються в області зіткнення пучків (IP). Інформація з VELO використовується алгоритмами реконструкції LHCb і використовується для відбору подій. VELO базується на піксельних гібридних кремнієвих сенсорах. Ключові вимоги до детектора включають

мінімізацію матеріального бюджету та підвищення радіаційної стійкості для роботи в умовах збільшеної частоти подій і значних доз опромінення.

В експерименті LHCb під час Run 2 було реалізовано режим фіксованої мішені використовуючи внутрішню газову мішень. Для ін'єкції легкого інертного газу у вакуумну камеру VELO застосовується система вимірювання перекриття з газом (System for Measuring Overlap with Gas - SMOG) [107].

Дипольний магніт спектрометра забезпечує формування вертикального магнітного поля з індукцією до 4 Тл. Конструктивно магніт складається з двох ідентичних сідлоподібних котушок. Детальний опис конструкції наведено у роботах [108-110].

Кремнієвий мікростріповий детектор Upstream Tracker (UT). Він розміщений між RICH1 та дипольним магнітом. UT забезпечуючи оперативне визначення імпульсу та заряду треків для заряджених частинок. Інформація з UT , разом із даними VELO, дозволяє на початковому етапі здійснювати швидку реконструкцію треків для їх подальшого узгодження з вимірюваннями у SciFi Tracker [111]. До основних вимог, що висувуються до UT, належать забезпечення високої радіаційної стійкості та мінімізація матеріального бюджету.

Сцинтиляційний волоконний трекер (SciFi Tracker) [111] призначений для трекінгу заряджених частинок і визначення їхнього імпульсу після проходження магніту. До основних вимог щодо SciFi Tracker належать обмеження матеріального бюджету та забезпечення радіаційної стійкості.

Детектор черенковського випромінювання (Ring Imaging Cherenkov - RICH) забезпечує ефективну ідентифікацію заряджених адронів у діапазоні імпульсів 2.6-100 ГеВ/с, що є ключовим фактором для зменшення комбінаторного фону.

Калориметрична система LHCb включає електромагнітний (ECAL) [112, 113] та адронний (HCAL) [114, 115] калориметри, призначені для ідентифікації та вимірювання енергії електронів, фотонів і адронів.

Мюонний детектор складається з чотирьох станцій, оснащених 1104-ма пропорційними камерами із сумарною площею близько 385 м². Станції M2–M5 розташовані послідовно та чергуються із залізними поглиначами, що забезпечують ефективну фільтрацію низькоенергетичних частинок [116-118].

Вакуумний іонопровід разом з його опорною конструкцією було оптимізовано для зменшення фонового навантаження на сусідні детекторні системи [119, 120].

Система радіаційного моніторингу RMS-R3

Для забезпечення високоточних даних під час третьої серії фізичних вимірювань (Run-3, 2022-2025 рр.) детектор LHCb мав підтримувати стабільні умови експерименту. Цього досягли завдяки спеціалізованим швидкодіючим системам моніторингу, зокрема - RMS-R3, що здійснює моніторинг ядерних взаємодій та фону в області IP-8. Система RMS-R3, розроблена, виготовлена, протестована та встановлена дослідниками Інституту ядерних досліджень НАН України, забезпечує спостереження миттєвої світності експерименту при значеннях до $1.5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [121]. Система RMS-R3 складається і з чотирьох детекторних модулів, що працюють використовуючи принцип металевих фольгових детекторів (МФД) [121], в основі принципу роботи яких лежить явище вторинної електронної емісії (ВЕЕ). Модулі змонтовані симетрично навколо іонопроводу, перпендикулярній до осі пучка, на відстані 220 см від точки взаємодії LHCb IP8. Асиметрія їхнього відгуку дозволяє оцінювати світність експерименту [122].

Вторинна Електронна Емісія

Явище ВЕЕ полягає у виході електронів із поверхні твердого тіла унаслідок бомбардування частинками (електронами, іонами, фотонами тощо). Енергія, передана від падаючих частинок електронам у приповерхневих шарах [123], призводить до їх збудження та руху всередині тіла з подальшою взаємодією з атомами та іншими електронами. Якщо збуджені електрони

мають достатню енергію для подолання поверхневого бар'єру, вони виходять із матеріалу як вторинні електрони. Вимірювання позитивного заряду утвореного в сенсорі є основою принципу роботи МФД. Емісія вторинних електронів визначається висотою потенційного бар'єру поверхні. У тонких плівках ВЕЕ спостерігається з поверхні, що бомбардується (рис. 3.2.а) та з протилежної поверхні (рис. 3.2.б).

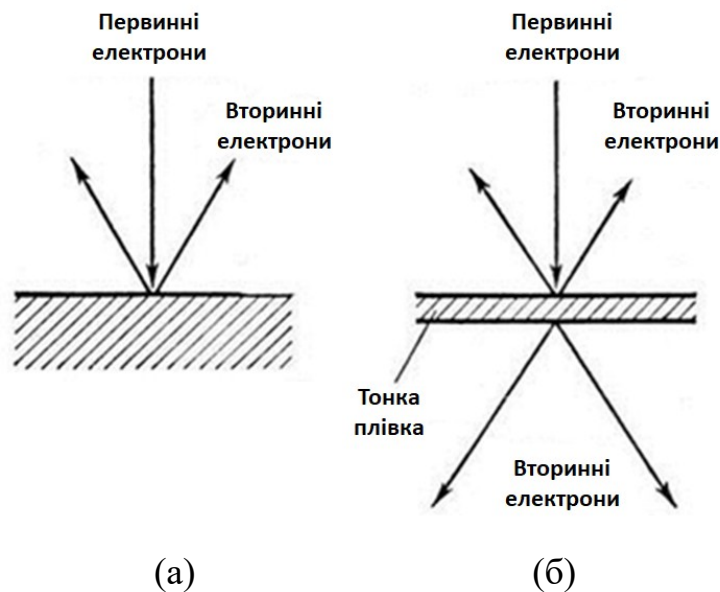


Рис. 3.2 Вторинна електронна емісія на віддзеркалення (а) та наскрізний проліт (б) через тонку плівку (товщина порядку ~ 10 нм).



Рис. 3.3 Енергетичний розподіл вторинних електронів [124, 125]. I – пік пружно розсіяних електронів, II – спектр непружно розсіяних електронів, III – вторинні електрони [123].

Вторинні електрони мають енергії від кількох еВ до значень, близьких до енергії налітаючої частинки (рис. 3.3). Основний внесок у спектр енергій

становлять електрони з енергіями 1-5 еВ [126], що випромінюються з поверхневих шарів металевої фольги товщиною у декілька десятків мікрометрів [127]. Ключовою характеристикою вторинної електронної емісії є коефіцієнт ВЕЕ:

$$\sigma = i_{Bm}/i_n \quad (3.1)$$

де i_{Bm} , i_n - струми вторинних та первинних електронів. Коефіцієнти пружного та непружного розсіяних електронів та емісії вторинних електронів:

$$r = i_r/i_n \quad (3.2)$$

$$\eta = i_\eta/i_n \quad (3.3)$$

$$\delta = i_\delta/i_n \quad (3.4)$$

де i_n , i_r , i_η , i_δ – струми первинних електронів, пружно відбитих, непружно розсіяних та вторинних електронів. Отже, струм вторинних електронів:

$$i_{Bm} = i_r + i_\eta + i_\delta \quad (3.5)$$

Коефіцієнти σ , r , η та δ залежать від імпульсу первинних електронів та від хімічного складу, методу виготовлення та стану поверхні фольги.

Металево-Фольгові Детектори

ВЕЕ є основою принципу роботи МФД: пучок заряджених частинок або фотонів, проходячи через тонку металеву фольгу, спричинює ВЕЕ, що формує додатній заряд на металевій фользі – сенсорі, який реєструється високочутливим зарядовим інтегратором (ВЗІ), підключеним до сенсора (рис. 3.4).

Як було зауважено вище, у явищі ВЕЕ ключову роль відіграє тонкий поверхневий шар металу товщиною 10-50 нм. Це дозволяє створювати надтонкі детектори з мінімальною кількістю матеріалу. Прикладаючи напругу у десятки вольт можливо зібрати практично всі вторинні електрони, оскільки їх основна частка має енергією в декілька еВ. Використовуючи заздалегідь відомі коефіцієнти ВЕЕ для різних частинок, можливо визначати їхній потік через одиницю площі за одиницю часу.

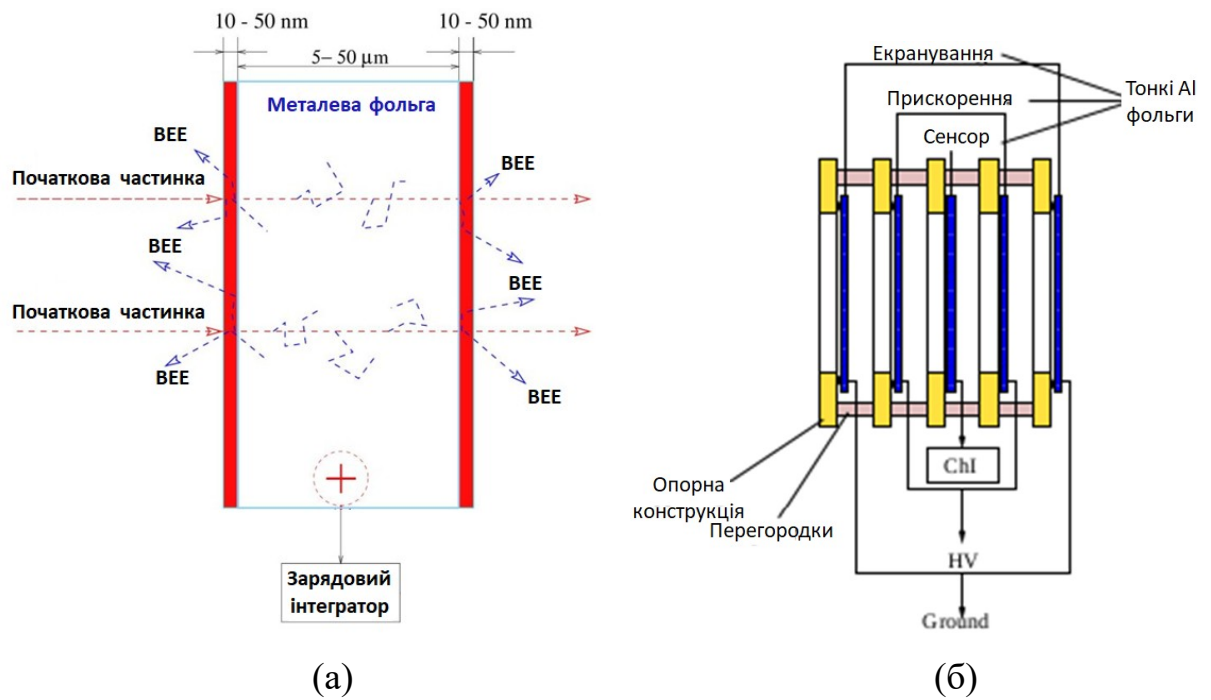


Рис. 3.4 (а) Схема ВЕЕ на поверхневому шарі фольгового сенсора (10-20 нм). Заряджені частинки, що бомбардують поверхні, викликають ВЕЕ, після чого накопичений заряд збирається зарядовим інтегратором; (б) схематичне зображення метало-фольгового детектора: дві заземлені екрануючі фольги, дві прискорювальні фольги та центральна фольга (сенсор).

Система RMS-R3

Для забезпечення надійного та безпечного функціонування експерименту LHCb було розроблено систему RMS-R3, яка надає інформацію про допустимі умови зіткнень пучків ВАК. Система RMS-R3 та її попередник RMS LHCb [128], базується на технології МФД:

- Металеві фольги товщиною до 50 мкм закріплюють на ізолюючих несучих рамках (рис. 3.4.б),
- Дві внутрішні прискорювальні фольги і дві зовнішні заземлені екрануючі фольги закривають сенсор та стабілізують вихід ВЕЕ,
- Прискорювальні фольги, підключені до позитивної напруги, збирають вторинні електрони, а зовнішні фольги захищають систему від електромагнітних наводок.

Зібраний сенсором позитивний заряд вимірюється за допомогою ВЗІ [129, 130], який перетворює вхідний заряд у послідовність вихідних імпульсів. Частота сигналів пропорційна потоку заряджених частинок, що проходять через площину фольг, включаючи внесок як пучків частинок так і фону. Амплітуда відгуку детекторів відображає миттєву світність експерименту, а спостережувані асиметрії відгуку дозволяють моніторувати стабільність пучку (про метод асиметрій далі).

Основними перевагами МФД, що зумовили їх застосування для системи радіаційного моніторингу внутрішнього трекера експерименту LHCb та модернізації такої системи за умов підвищеної світності, є висока радіаційна толерантність, малий об'єм матеріалів, простота виготовлення у будь-якій формі та розмірі, низька робоча напруга, тривала експлуатація з мінімальним обслуговуванням та їх низька вартість [131].

Метод асиметрій

Розташування модулів детекторів RMS-R3 у детекторні LHCb було обрано для можливості застосування методу асиметрій [132] (рис. 3.5.а), що дозволяє обчислювати відгуки пар протилежних детекторів ("верхній-нижній" та "правий-лівий"). Асиметрії відгуків визначаються як:

$$a_{ij} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (3.6)$$

де R_i та R_j – частоти відгуків сенсорів i та j відповідно, що відповідають парам протилежних детекторних модулів. Асиметрії для "правого-лівого" та "верхнього-нижнього" детекторів позначено як $\alpha_{horizontal}$ та $\alpha_{vertical}$ відповідно. Такий метод характеризується високою точністю та забезпечує розрізнення різних режимів проведення експерименту – від ін'єкції пучків до їх скидання. Він дозволяє фіксувати зміщення локалізації фізичних подій зареєстрованих сенсорами на рівні до 10^{-3} одиниць асиметрії (рис. 3.6).

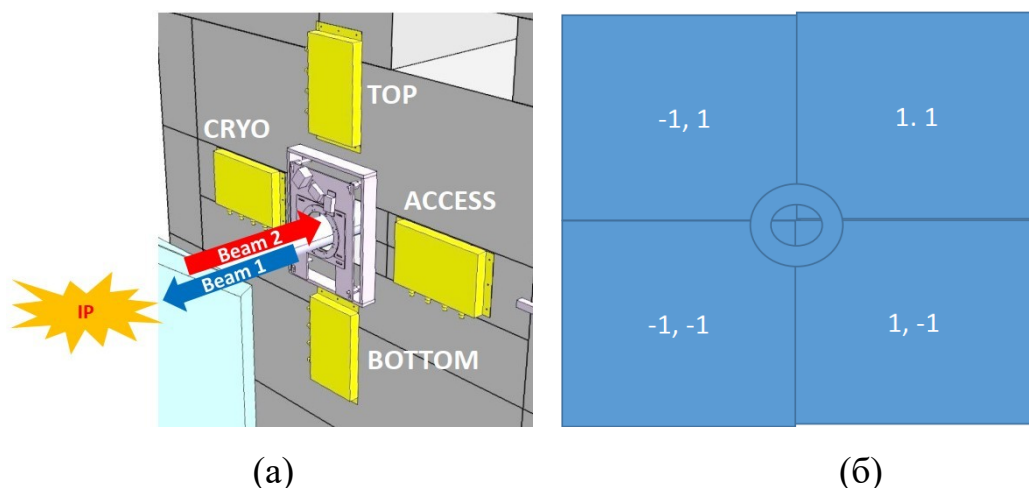


Рис. 3.5 (а) розташування детекторних модулів RMS-R3 навколо іонопроводу. Область зіткнення пучків знаходиться на відстані приблизно 2.2 м; (б) за методом асиметрій, площину XY умовно розділено на 4 сектори (від -1 до 1). Локуси асиметрій мають центроїду (0;0). Зміщення позиції локусу свідчить про зміщення області взаємодії пучків.

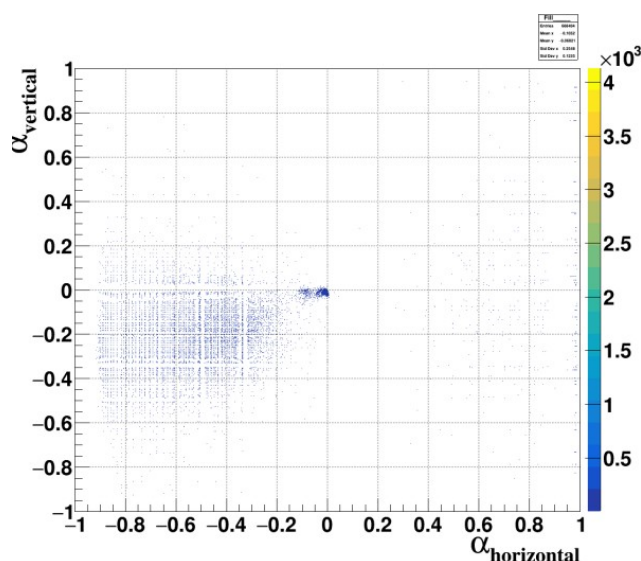


Рис. 3.6 Локалізація фізичних подій зареєстрованих RMS-R3 на площині асиметрій відгуку пар протилежних сенсорів.

Зчитувальна система RMS-R3

Система зчитування характеризується високою чутливістю та радіаційною стійкістю. Основним її елементом є зарядовий інтегратор (ЗІ), розроблений в ІЯД НАН України (м. Київ) у співпраці з науковцями MPIfK (м. Хайдельберг). Основні характеристики ЗІ наведено в [133]: чутливість

становить 1 кГц/пА вхідного струму, діапазон інтегрування – від 10 фА до 4 нА (що відповідає 10 Гц – 4 МГц), флуктуації вихідного сигналу не перевищують кількох Гц, час інтегрування – 1 с, радіаційна стійкість – 2–3 кРад. Як лічильник частоти використовується мікроконтролерна плата STM32F407CGT6 Discovery [134]. Загалом система зчитування включає зарядові інтегратори, лічильники частоти та плату VLDB [135]. Вихідна частота ЗІ є пропорційною потоку заряджених частинок, що проходять через сенсор.

3.1.3 Детектори LHCb та CBM

Основною вимогою до детекторної системи LHCb є висока точність відтворення траєкторій частинок та реконструкції вторинних вершин, що необхідно для дослідження CP-порушення. Вершинний детектор розташований на відстані лише кількох міліметрів від пучка, що накладає суворі вимоги до радіаційних навантажень для стабільності роботи сенсорів. В експерименті CBM планується досягнення частоти подій до 10 МГц, що також накладає суворі вимоги до радіаційних навантажень та матеріального бюджету детекторних систем.

Для LHCb необхідна точність вимірювання імпульсу частинок на рівні 0.4-1% у широкому діапазоні енергій до 200 Гев/с, що досягається за рахунок поєднання кремнієвих детекторів. У CBM трекінг також базується на системах з використанням кремнієвих сенсорів (КТС), де досягається роздільна здатність імпульсу з похибкою $< 2\%$ для частинок з імпульсом > 1 Гев/с. Таким чином, обидва експерименти вимагають високоточної просторової роздільної здатності.

Детектори LHCb працюють у середовищі протон-протонних зіткнень при високій світності, що призводить до значних доз іонізуючого випромінювання та вимог до радіаційної стійкості (до 10^{14} частинок/см² на рік для VELO). У CBM також будуть присутні великі потоки частинок, хоча утворюватимуться нижчі енергії, але вони матимуть значно вищу частоту подій, що призведе до

значних радіаційних навантажень. Додатково, CBM досліджуватиме значно слабші сигнали, отже рівень шуму, що виникає внаслідок фону та процесів в зчитувальній електроніці має бути зведений до мінімуму.

У межах експерименту LHCb система RMS-R3 має значну роль для моніторингу радіаційного фону та контролю положення пучка.

Виходячи із принципової подібності детекторних систем експериментів LHCb та CBM, радіаційних навантажень та подібних вимог до якості отриманих даних, було запропоновано розробити систему радіаційного моніторингу для експерименту CBM на основі RMS-R3 – RMS-CBM. Така система може забезпечити моніторинг радіаційних навантажень та положення пучка детекторної системи CBM для покращення операційних умов експерименту, контролю стану та збільшення часу життя детекторної системи.

3.1.4 Прототип RMS-CBM

Запропонована концепція системи радіаційного моніторингу RMS-CBM базується на конструктивних та функціональних рішеннях, реалізованих у системі RMS-R3 експерименту LHCb [105]. Вибір саме цієї архітектури обумовлений низкою принципових подібностей між експериментами LHCb та CBM. Зокрема, через подібність геометричної конфігурації детекторних систем, близькі типи фізичних процесів (зіткнення прискореного пучка з мішенню), схожі умови розміщення систем радіаційного моніторингу - на відстані порядку 1-2 м від точки взаємодії (рис. 3.7.а) та обмеження на матеріальний бюджет детекторних систем, що вимагає мінімізації внеску додаткових елементів у загальну масу та розміри системи.

Конструкція RMS-CBM концептуально відтворює багат шарову структуру RMS-R3 (рис. 3.7.а,б). В її основі лежить сенсорний елемент у вигляді металевої фольги, який виконує функцію чутливого шару, що безпосередньо взаємодіє з іонізуючим випромінюванням. З обох боків сенсора розташовано прискорювальні-колекторні металеві фольги, призначені для формування електричного поля та ефективного збору заряджених частинок,

зокрема електронів, емітованих із поверхні сенсорного шару під дією радіації. Зовнішні шари конструкції утворені екрануючими металевими фольгами, які виконують функцію електромагнітного захисту та стабілізації робочих умов системи. Сенсор підключається до високочутливого інтегратора заряду за допомогою коаксіального кабелю, що забезпечує мінімізацію втрат сигналу та зниження впливу електричних наводок. Прискорювальні шари, у свою чергу, під'єднані до джерела напруги. Екрануючі шари заземлюються, що забезпечує додаткове пригнічення шумів і підвищення точності вимірювань.

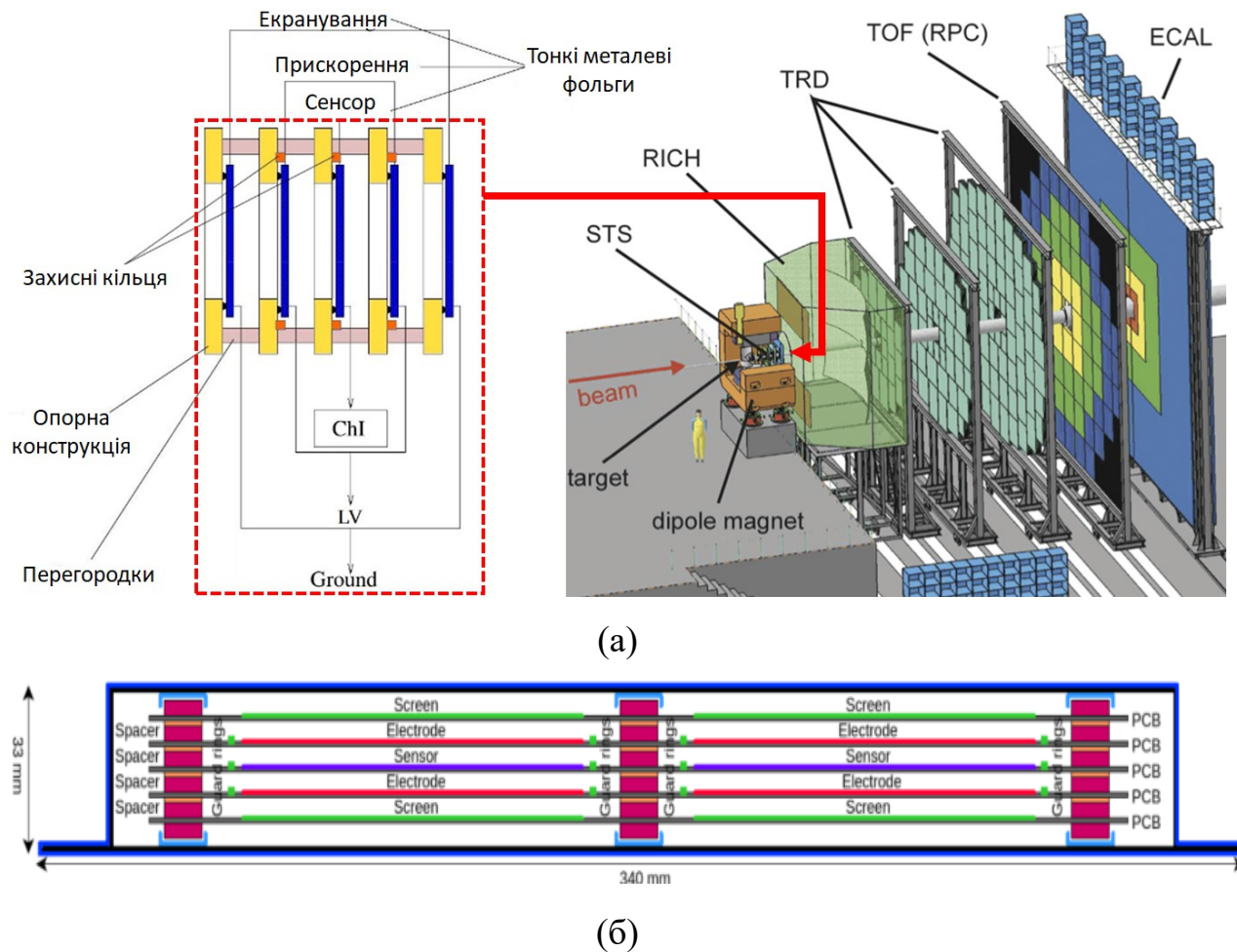


Рис. 3.7 (а) схематичне зображення конструкції прототипу RMS-CBM та його запропонованого місця інсталяції у детекторній системі CBM; (б) діаграма детекторного модуля RMS-CBM із двома металеві-фольговими сенсорами.

Подібно до підходу, реалізованого в експерименті LHCb, пропонується використання конфігурації детекторної системи, що складається з чотирьох

пар модулів, розміщених симетрично відносно іонопроводу в горизонтальній та вертикальній площинах (рис. 3.7.б). Така геометрія обрана з урахуванням мінімізації впливу на функціонування інших підсистем детектора. Для кількісного підтвердження цього припущення планується проведення детальних Монте-Карло симуляцій впливу системи RMS-CBM на роботу інших детекторних підсистем.

Виготовлений прототип RMS-CBM має наступні технічні характеристики:

- Аналоговий сигнал, сформований сенсором, піддається лінійному перетворенню за допомогою зарядового інтегратора у вихідну частоту. Подальше вимірювання цієї частоти здійснюється за допомогою лічильників, реалізованих на базі мікроконтролерних платформ STM32F4-Discovery. Такий підхід дозволяє забезпечити високу точність та стабільність вимірювань у широкому динамічному діапазоні,
- Система працює при відносно низькій напрузі живлення (24 В),
- Ключовим елементом є чутливий інтегратор заряду, який включає універсальний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), розроблений в ІЯД. Характеристики інтегратора забезпечують високу чутливість на рівні 10 фА, що відповідає зміні вихідної частоти приблизно на 2 Гц, при цьому робочий діапазон вхідного струму охоплює інтервал від 1 фА до 20 нА. Це дозволяє ефективно реєструвати як надслабкі так і відносно інтенсивні сигнали,
- Лічильник частоти реалізований із використанням двох 32-бітних програмованих таймерів, що забезпечує достатню розрядність і точність для обробки сигналів у реальному часі.

У якості зчитувальної електроніки використовується ЗІ на основі інтегратора, що використовувався для RMS-R3 [136]. Зазначений ЗІ належить

до перетворювачів типу “заряд–частота”, створених для задач ядерної фізики [137].

Для досягнення максимальної продуктивності RMS-CBM необхідним етапом є проведення детального моделювання її функціонування. Якісна симуляція роботи детекторних систем виступає ключовим інструментом для глибшого розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час їх експлуатації. Це, своєю чергою, створює основу для вибору оптимальної конструкції установки, а також забезпечує отримання надійних і відтворюваних фізичних результатів. Додатково, моделювання дозволяє оцінити вплив різних параметрів системи, мінімізувати експериментальні похибки та підвищити ефективність подальших експериментальних досліджень.

3.2 Симуляції прототипу RMS-CBM

Моделювання детекторних систем є фундаментальною передумовою для забезпечення наукової достовірності експериментальних результатів у сучасній фізиці високих енергій. Такі симуляції дозволяють не лише відтворювати фізичні процеси, що відбуваються в детекторі, але й глибоко аналізувати його поведінку за різних умов експлуатації.

Детальне моделювання є ключовим інструментом для всебічного розуміння характеристик детектора, включаючи його ефективність, просторову та часову роздільну здатність, а також чутливість до різних типів частинок. Відсутність адекватної комп’ютерної моделі може призвести до систематичних похибок, які суттєво впливають на інтерпретацію експериментальних даних. Вони дозволяють виконувати порівняння між експериментальними даними та теоретичними передбаченнями, а також оцінювати вплив різних джерел шуму та похибок. Важливо зазначити, що спеціалізований алгоритм симуляції відгуку детектора – моделі відгуку детектора, що моделює перетворення фізичних сигналів у цифрову форму, є

невід’ємною складовою програмного забезпечення всіх провідних експериментів у галузі фізики елементарних частинок. Такі експерименти включають, зокрема, LHCb, ATLAS, CDF II, PAMELA та інші.

Розробка аналогічного алгоритму для системи RMS-CBM є критично важливим етапом у процесі створення прототипу детектора і дозволить досягти низки важливих цілей. По-перше, це надасть можливість виявлення потенційних конструктивних недоліків ще на ранніх стадіях розробки. Зокрема, вплив електронного шуму може суттєво обмежувати чутливість системи, що потребує своєчасної оптимізації параметрів електроніки. По-друге, симуляція відкриває широкі можливості для оптимізації конструкції детектора. Це включає вибір оптимальної геометрії сенсорів, що визначає ефективність реєстрації частинок, а також параметрів електронних схем, які впливають на точність та стабільність вимірювань. По-третє, застосування симуляцій дозволяє провести кількісну валідацію очікуваних характеристик детектора, що є необхідним для підтвердження відповідності технічних рішень поставленим науковим задачам. Нарешті, розробка та впровадження такого алгоритму забезпечить відповідність детектора вимогам експерименту CBM, включаючи необхідні показники точності, швидкодії та надійності.

Усі симуляції в межах даного дослідження виконувалися із застосуванням симулятора LTspice, який широко використовується для аналізу аналогових електронних схем. Зазначений симулятор уже продемонстрував свою ефективність при моделюванні детекторних модулів КТС експерименту CBM [95], що підтверджує його придатність для вирішення подібних задач у даному дослідженні.

3.2.1 Принципова схема RMS-CBM

Прототип RMS-CBM складається з двох основних компонент, що мають бути відтворені: металеві-фольговий детектор (рис. 3.8) та зарядовий інтегратор (рис. 3.9). При їх відтворенні, необхідно враховувати:

- Стандартні електронні компоненти, що входять до складу зчитувальної електроніки,
- Додаткові джерела шуму та опору, що присутні у фізичному прототипі,
- Додаткових елементів, що не присутні у фізичному приладі, але описують наявні ефекти, що виникають у складних електричних ланцюгах (антени, паразитні ємності тощо).

Металево-фольговий детектор не містить електричних компонент, окрім джерела напруги. Однак, для нього має місце ряд особливостей, що мають бути відтворені:

- Центральна фольга (сенсор), у такому представленні, є джерелом сигналу в схемі. Для імітації заряду, що реєструється сенсором, її було під'єднано джерело струму. З іншого боку, джерело струму було заземлено, для уникнення нейтралізації зарядів. Величина заряду, що подається та його розподіл в часі визначаються користувачем,
- Екрануючі фольги використовуються виключно для захисту системи. Оскільки вони не під'єднані до джерела напруги та відокремлені від сенсора прискорювальними фольгами, отже мають незначний вплив на якість роботи електроніки з точки зору паразитних ефектів та індукованого шуму,
- Через свою конструкцію, прискорювальні фольги (що під'єднані до джерела напруги), разом із сенсором, утворюють два конденсатори.

Для відтворення цих ефектів, LTspice аналог МФД був представлений наступним чином (рис. 3.8.б):

- Металеві фольги сенсора та прискорювальних шарів представлено через резистори R_1 , R_2 , R_8 . Номінали резисторів визначені фізичними розмірами фольг,

- Прискорювальні шари було під'єднано до джерела напруги V_1 через кабель з малим опором R_{12} ,
- Паразитні ємності між сенсором та прискорювальними фольгами враховані через використання конденсаторів C_3 та C_4 , ємність яких визначено, як ємності плоских конденсаторів,
- Схема має вихід із сенсора для підключення до інтегратора.

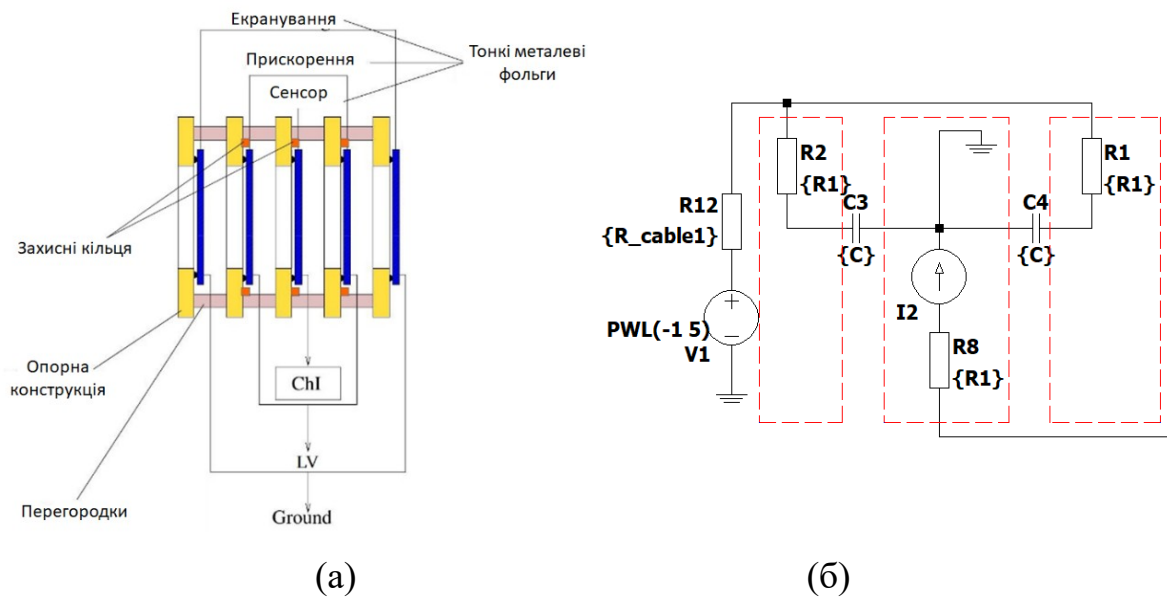


Рис. 3.8 (а) Діаграма металево-фольгового детектора, що використовується у прототипі RMS-CBM, (б) LTspice аналог металево-фольгового детектора.

Окрім ідентифікації потенційних джерел паразитних ефектів, необхідно визначити бажаний ступінь точності, що очікується від симуляції. Зазвичай, на етапі створення прототипу такої системи, немає необхідності точного відтворення результатів реального приладу, відтворення характеристик системи з умовною похибкою відносно результатів вимірювання до 10% на початковому етапі можна вважати задовільним, оскільки ведеться загальна перевірка поведінки прототипу.

За такого підходу складні інтегратори заряду можуть бути замінені на простіші із близькими параметрами, коаксіальні кабелі на резистори з малим опором, деякими елементами можна знехтувати залежно від їх функції у ланцюзі та від бажаної точності результатів. З наближенням до фінальної

версії прототипу системи, спрощені елементи аналога замінюються на більш близькі до реального приладу, зменшуючи значення похибки до задовільної величини. Такий підхід дозволяє створити відносно простий програмний аналог системи, що значно спрощує аналіз складної електроніки та процесів, що у них перебігають, зменшує час виконання симуляції та, за необхідності, залишає можливість подальшого удосконалення.

Використовуючи описаний підхід, було розроблено спрощений LTspice аналог зарядового інтегратора, що складається з двох каскадів інвертуючих зарядочутливих підсилювачів (рис. 3.9).

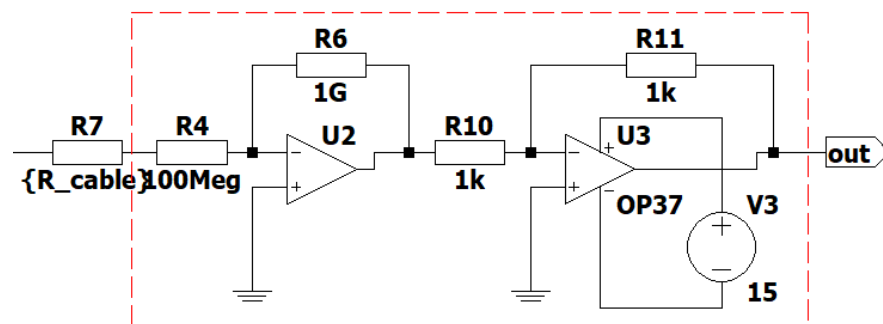


Рис. 3.9 Принципова схема програмного аналогу зарядового інтегратора RMS-CBM із входом через коаксіальний кабель R_7 .

3.2.2 Результати

Використовуючи розроблений програмний аналог RMS-CBM було виконано симуляції зареєстрованого сигналу та його обробки інтегратором (рис. 3.10.а) та спектральної густини шуму на виході з інтегратора (рис. 3.10.б).

Для сигналу результати демонструють очікуване підсилення з подвійною інвертацією, що гарно відображає типову картину спостережувану при реєстрації швидких короткочасних сигналів.

Симуляція спектральної густини шуму на виході з інтегратора демонструє рівень шуму порядку ~ 1000 [ке], точне значення має бути визначено після повної реалізації електричного ланцюга. Отримане значення шуму є задовільним, оскільки типові значення рівня шуму для чутливих детекторних систем СВМ не перевищує 1000 [е].

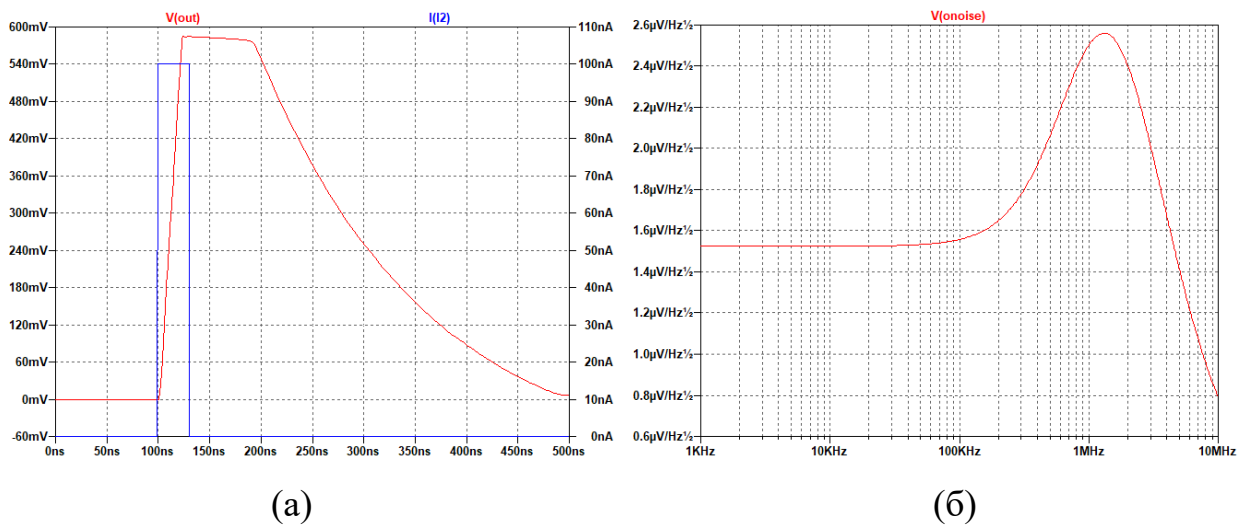


Рис. 3.10 Результати LTspice симуляцій: (а) зареєстрованого заряду – вхідний імпульс (блакитне) та сигнал на виході з інтегратора заряду (червоне); (б) спектральної густини шуму на виході з інтегратора.

3.2.3 Висновки до розділу 3

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікації [138].

Виконані електронні симуляції прототипу системи радіаційного моніторингу RMS-CBM демонструють переконливі ознаки спроможності запропонованої системи до надійної роботи в складі детекторної системи експерименту CBM.

Рівень шуму системи на рівні біля 1 000 електронів в декілька разів нижче від очікуваного мінімального сигналу від потоків заряджених частинок з області взаємодії пучка іонів SIS100 з ядрами золота фіксованої мішені експерименту CBM.

Висновки

В дисертаційній роботі розв'язано актуальні науково-технічні проблеми, що полягають у розробці методів та засобів моделювання функціонування детекторних модулів кремнієвої трекерної системи та прототипу системи радіаційного моніторингу RMS-SBM для експерименту SBM, спрямованих на підвищення якості реєстрації та відтворення фізичних процесів та моніторингу області зіткнень пучка із мішенню за умов високих радіаційних навантажень та великих частот подій:

1. Проаналізовано сучасний стан експериментальних досліджень у фізиці важких іонів та обґрунтовано необхідність створення високоточних моделей відгуку детекторних систем для експерименту SBM. Показано, що за умов високих частот взаємодій (до 10 МГц) та значних радіаційних навантажень, ключовим фактором успішного функціонування детекторів є розуміння процесів формування та обробки сигналу в детекторних модулях та ефектів, що погіршують ефективність їх роботи.
2. Розроблено першу комплексну модель відгуку детекторного модуля КТС, що відтворює повну послідовність фізичних процесів – від генерації заряду в сенсорі до формування вихідного сигналу зчитувальною електронікою. Розроблена модель дозволяє досліджувати вплив параметрів компонент модулів та паразитних ефектів на характеристики сигналу та рівень шуму, що є критичним для їх ефективної роботи. Показано, що врахування взаємодії між зчитувальними каналами, паразитних ємностей та впливу зовнішнього середовища є критично важливим для адекватного відтворення характеристик детекторних модулів.
3. Розроблено новий метод симуляції реєстрації частинок детекторним модулем КТС, який використовує поєднання моделювання аналогової електроніки та Монте-Карло симуляцій взаємодії іонізуючого

випромінювання із сенсором. У порівнянні зі старим аналітичним підходом, це дозволило краще відтворювати відгук детекторного модуля та дослідити процеси формування сигналу.

4. Виконано валідацію розроблених моделей шляхом порівняння результатів симуляцій із низкою результатів вимірювань проведених в лабораторії КТС. Продемонстровано узгодженість результатів моделювання із фізичними вимірюваннями в очікуваних межах та можливість їх використання для аналізу та оптимізації параметрів детекторних модулів.
5. Отримані результати дозволили визначити основні фактори, що впливають на рівень шуму та якість вихідного сигналу, зокрема параметри контуру зворотного зв'язку, паразитні ємності та геометричні характеристики сенсора. На основі цього запропоновано підходи до оптимізації дизайну зчитувальної електроніки детекторних модулів та реконструкції треків за наявності пошкоджених зчитувальних каналів.
6. Обґрунтовано необхідність створення системи радіаційного моніторингу для експерименту CBM та запропоновано концепцію RMS-CBM на основі системи RMS-R3 експерименту LHCb. Показано, що така система є необхідною для контролю радіаційних навантажень та стабільності пучка, що безпосередньо впливає на якість даних та ресурс детектора.
7. Розроблено перший програмний аналог прототипу детекторного модуля RMS-CBM та виконано його моделювання. Досліджено характеристики відгуку, рівень шуму та вплив паразитних ефектів на роботу системи. Отримані результати свідчать про низький рівень шуму та стабільний відгук прототипу на рівні, необхідному для використання у складі детекторної системи CBM.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості підвищення ефективності роботи кремнієвої трекерної системи експерименту

СВМ, покращення якості реконструкції треків частинок та забезпечення надійного контролю радіаційних умов, що є необхідним для реалізації фізичної програми досліджень. Розроблені моделі можуть бути використані як інструмент для оптимізації параметрів детекторних систем на етапі проєктування та у якості еталону під час проведення експерименту для контролю їх функціонування та якості отриманих даних.

Таким чином, у дисертаційній роботі розроблено комплекс методів і моделей, що забезпечують глибоке розуміння процесів у детекторних модулях КТС та системі радіаційного моніторингу та створюють підґрунтя для подальшого розвитку та оптимізації детекторних систем експерименту СВМ.

ПОДЯКА

Автор дисертації висловлює щиру вдячність науковцям з Інституту ядерних досліджень НАН України та Центр дослідження важких іонів імені Гельмгольца (GSI), з якими співпрацював під час виконання цього наукового дослідження у період 2022-2026 рр, чия допомога та підтримка зробили можливим його успішне виконання.

Велика подяка науковому керівнику, Пугачу Валерію Михайловичу, за плідне та ефективне керівництво, за цінні поради та коментарі, контроль виконання роботи та допомогу в підготовці наукових публікацій.

Висловлюю глибоку вдячність колегам з ІЯД НАН України: Чернишенку Сергію Борисовичу, Добішуку Василю Миколайовичу, Рамазанову Дмитру Миколайовичу, Обіход Тетяні Вікторівні, Киві Володимирі Олексійовичу, Охріменку Олександрі Юрійовичу та Давидовському Володимирі Володимировичу за їхню допомогу, підтримку та співпрацю.

Висловлюється глибока вдячність членам робочої групи КТС експерименту CBM, що мали значний вплив для реалізації цього дослідження, за їх допомогу, поради та підтримку: Максиму Теклішину (Maksym Teklishyn), Альберіці Тоїа (Alberica Toia) та Адріану Родрігезу (Adrian Rodriguez).

Ця робота стала можливою завдяки плідній співпраці між Інститутом ядерних досліджень НАН України та GSI, що дозволило досягти вагомих результатів у розробці детекторних технологій для новітніх досліджень.

Список використаних джерел

- [1] W. Cottingham and D. A. Greenwood, *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. Cambridge University Press; 2nd edition, 2017
- [2] K. Aoki, Z. Hioki, R. Kawabe, M. Konuma, and T. Muta, “Electroweak Theory: Framework of On-Shell Renormalization and Study of Higher-Order Effects,” *Progress of Theoretical Physics Supplement*, vol. 73, pp. 1–226, 02 1982.
- [3] L. McLerran, “Quarkyonic Matter and the Revised Phase Diagram of QCD,” *Nuclear Physics A*, vol. 830, 11 2009.
- [4] CERN, “The United States at the LHC. The Standard Model and beyond,” 2019. <http://united-states.cern/physics/standard-model-and-beyond>.
- [5] R. Rapp and H. van Hees, “Thermal dileptons as fireball thermometer and chronometer,” *Physics Letters B*, vol. 753, pp. 586–590, 2016.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ALICE Collaboration, “ J/ψ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” 06 2016.
- [9] 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.
- [10] Elia, Domenico, “Strangeness production in ALICE,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 455, p. 012005, 08 2013.
- [11] P. M. Hohler and R. Rapp, “Is ρ -meson melting compatible with chiral restoration?” *Physics Letters B*, vol. 731, pp. 103–109, Apr. 2014.

- [12] J. Schukraft, “QM2017: Status and Key open Questions in Ultra-Relativistic Heavy-Ion Physics,” Nuclear Physics A, vol. 967, pp. 1–10, 2017.
- [13] M. Hanauske and et al, “Concluding Remarks: Connecting Relativistic Heavy Ion Collisions and Neutron Star Mergers by the Equation of State of Dense Hadron- and Quark Matter as signalled by Gravitational Waves,” J. Phys. Conf, vol. 878, p. 012031, 2017.
- [14] A. D. Falco (NA60+). The Physics program of the NA60+ experiment at the CERN SPS. CPOD2021.
https://indico.cern.ch/event/985460/contributions/4264615/attachments/2211234/3742919/adf_cpod.pdf.
- [15] K. Fukushima and T. Hatsuda, “The phase diagram of dense QCD,” Reports on Progress in Physics, vol. 74, no. 1, p. 014001, Jan. 2011.
- [16] H. Heiselberg and M. Hjorth-Jensen, “Phases of dense matter in neutron stars,” Phys. Rep., vol. 328, pp. 237–327, May 2000.
- [17] G. Baym, T. Hatsuda, and T. Takatsuka, “From hadrons to quarks in neutron stars: A review,” Reports on Progress in Physics, vol. 81, 02 2018.
- [18] Friman, Bengt and Höhne, Claudia and Knoll, Jorn and Leupold, Stefan and Randrup, Jorgen and Rapp, Ralf and Senger, Peter, “The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments,” Lect. Notes Phys., vol. 814, pp. pp.1–980, 2011.
- [19] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M Ransom, M. S. E. Roberts, and J. W. T. Hessels, “A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay,” Nature, vol. 467, pp. 1081–3, 10 2010.
- [20] D. Logoteta and I. Bombaci, “Constraints on Microscopic and Phenomenological Equations of State of Dense Matter from GW170817,” Universe, vol. 5, p. 204, 09 2019.
- [21] L. Adamczyk and et al., “Beam-energy dependence of directed flow of Λ , anti- Λ , $K^\pm$, K^0 , and ϕ in Au + Au collisions,” Phys. Rev. Lett., vol. 120, p. 062301, Feb 2018.

- [22] Grosse-Oetringhaus, Jan, “The Future of High-Energy Heavy-Ion Facilities,” Nuclear Physics A, vol. 982, pp. 170–176, 02 2019.
- [23] Mohanty, B. and the STAR Collaboration, “STAR experiment results from the beam energy scan program at the RHIC,” Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, vol. 38, no. 12, p. 124023, 2011.
- [24] Yang, Qian, “The STAR BES-II and Forward Rapidity Physics and Upgrades,” Nuclear Physics A, vol. 982, pp. 951–954, 02 2019.
- [25] P. Senger, “The heavy-ion program of the future FAIR facility,” in Journal of Physics Conference Series, ser. Journal of Physics Conference Series, vol. 798, Jan. 2017, p. 012062.
- [26] T. Galatyuk. Future facilities for high μ B physics. Nuclear Physics A. XXVII International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter, 982:163–169, 2019.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947418304172>.
- [27] “CBM – Compressed Baryonic Matter experiment.” <http://www.fair-center.eu/for-users/experiments/nuclear-matter-physics/cbm/introduction.html>.
- [28] “FAIR – Baseline Technical Report 2006.” [http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications FAIR/FAIR BTR 1.pdf](http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications%20FAIR/FAIR%20BTR%201.pdf).
- [29] W. Henning, “FAIR - An International Accelerator Facility for Research with Ions and Antiprotons,” 06 2005.
- [30] T. Ablyazimov and et al., “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.
- [31] M. Aggarwal, and the STAR Collaboration, “An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement,” ArXiv e-prints, july 2010.
- [32] I. C. Arsene and et al., “Dynamical phase trajectories for relativistic nuclear collisions,” Physical Review C, vol. 75, p. 034902, 03 2007.

- [33] J. Chen, J. Deng, and L. Labun, “Baryon susceptibilities, non-Gaussian moments, and the QCD critical point,” *PhysRevD*, vol. 92, p. 054019, Sept. 2015.
- [34] A. Malakhov and A. Shabunov, Technical Design Report for the CBM Superconducting Dipole Magnet. Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2013. <http://repository.gsi.de/record/109025>.
- [35] M. Koziel, S. Amar-Youcef, N. Bialas, M. Deveaux, and et al., “The prototype of the Micro Vertex Detector of the CBM Experiment,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 732, pp. 515–518, 2013. Vienna Conference on Instrumentation 2013.
- [36] P. Klaus, M. Wiebusch, S. Amar-Youcef, M. Deveaux, M. Koziel, J. Michel, B. Milanovic, C. Müntz, T. Tischler, and J. Stroth, “Prototyping the read-out chain of the cbm microvertex detector,” *Journal of Instrumentation*, vol. 11, pp. C03046–C03046, 03 2016.
- [37] S. Chattopadhyay, Y. P. Viyogi, P. Senger, W. Müller, and C. Schmidt, Technical Design Report for the CBM : Muon Chambers (MuCh). Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2015. <http://repository.gsi.de/record/161297>.
- [38] J. Adamczewski-Musch and et al., “The CBM RICH detector,” *Journal of Instrumentation*, vol. 11, p. C05016, May 2016.
- [39] J. Adamczewski-Musch and et al., “The CBM RICH project,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 845, pp. 434–438, Feb. 2017.
- [40] N. Herrmann and et al., Technical Design Report for the CBM Time-of-Flight System (TOF). Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2014.
- [41] F. Guber and I. Selyuzhenkov, Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD). Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2015. <http://repository.gsi.de/record/109059>.

- [42] I. Kisel, I. Kulakov, and M. Zyzak, “Standalone First Level Event Selection Package for the CBM Experiment,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, pp. 3703–3708, Oct. 2013.
- [43] J. Heuser, W. Müller, V. Pugatch, P. Senger, C. J. Schmidt, C. Sturm, and U. Frankenfeld, Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS). Darmstadt: The CBM Collaboration. GSI, 2013. <http://repository.gsi.de/record/54798>.
- [44] I. Selyuzhenkov and A. Toia, CBM Progress Report 2016. Darmstadt: GSI, 2017. <http://repository.gsi.de/record/201318>.
- [45] H. Spieler, *Semiconductor Detector Systems. Series on Semiconductor Science and Technology*, OUP Oxford, 2005. <https://books.google.de/books?id=MUMb3y37yqYC>.
- [46] I. Tymchuk, V. Borshchov, M. Protsenko, et al. (CBM). Status report on micro-cable production for the Silicon Tracking System. CBM Progress Report 2021, (CBM-PR-2021):24, 2022.
- [47] K. Kasinski, R. Szczygiel, P. Otfinowski, et al. (CBM). Testing and diagnostic features of the STS/MUCH-XYTER2 ASIC. CBM Progress Report 2016, pages 36–37, 2017. <http://repository.gsi.de/record/201318>.
- [48] K. Kasinski, R. Kleczek, and R. Szczygiel. Front-end readout electronics considerations for Silicon Tracking System and Muon Chamber. *JINST*, 11(02):C02024, 2016. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/02/C02024>.
- [49] A. R. Rodriguez, The CBM Silicon Tracking System front-end electronics, from bare ASIC to detector characterization, commissioning and performance. PhD thesis, Johann Wolfgang Goethe-Universit at in Frankfurt am Main, 2019.
- [50] 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.
- [51] P. Rodriguez Perez, “The LHCb Vertex Locator performance and Vertex Locator upgrade,” *JINST*, vol. 7, p. C12008, 2012.

- [52] M. Friedl, et. all, “The Belle II Silicon Vertex Detector,” *Physics Procedia*, vol. 37, pp. 867–873, 12 2012.
- [53] A. Lymanets. Development of prototype components for the Silicon Tracking System of the CBM Experiment at FAIR. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 2013. <https://repository.gsi.de/record/53954>.
- [54] I. Sorokin. Characterization of silicon microstrip sensors, front-end electronics, and prototype tracking detectors for the CBM experiment at FAIR. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 2014. <https://repository.gsi.de/record/97618>.
- [55] M. Singla. The Silicon Tracking System of the CBM experiment at FAIR : development of microstrip sensors and signal transmission lines for a low-mass, low-noise system. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurt am Main, 2014. <https://repository.gsi.de/record/97533>.
- [56] P. Larionov. Systematic irradiation studies and Quality Assurance of silicon strip sensors for the CBM Silicon Tracking System. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 2016.
- [57] V. Friese, C. Sturm, and A. Toia, CBM Progress Report 2015. Darmstadt: GSI, 2016. <http://repository.gsi.de/record/186952>.
- [58] K. Kasinski, R. Szczygiel, W. Zabolotny, J. Lehnert, C. Schmidt, and W. Müller, “A protocol for hit & control synchronous transfer for the front-end electronics at the cbm experiment,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 835, 08 2016.
- [59] V. Friese and et al., “The high-rate data challenge: computing for the cbm experiment,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 898, p. 112003, 10 2017.
- [60] J. Lehnert, W. Müller, and C. Schmidt, “The GBT-based readout concept for the Silicon Tracking System of the CBM experiment,” p. 96622S, 09 2015. *Proceedings of IEEE-SPIE Joint Symposium Wilga 2015*.

- [61] Garces, Dairon Rodriquez. "The Silicon Tracking System of the E16 experiment at J-PARC: Characterization, Beam commissioning, and implications for the CBM series production", GSI-2026-00245, Johann Wolfgang Goethe-Universitat, 2026.
- [62] J. Lehnert and et al., "GBT based readout in the CBM experiment," *Journal of Instrumentation*, vol. 12, pp. 225–235, 2017.
- [63] P.-A. Loizeau, D. Emscheran, J. Lehnert, W. F. J. Müller, and J. Yang, "The prototype readout chain for CBM using the AFCK board and its software components," p. 96622X, 09 2015. *Proceedings of IEEE-SPIE Joint Symposium Wilga 2015*.
- [64] N. Harnew, "The physics performance of LHCb," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 408, pp. 137–145, Feb. 1998.
- [65] R. Aaij, A. Affolder, K. Akiba, M. Alexander, and et al., "Performance of the LHCb Vertex Locator," *Journal of Instrumentation*, vol. 9, p. P09007, Sep. 2014.
- [66] M. Jeong and M. D. Hammig, "The Atomistic Simulation of Thermal Diffusion and Coulomb Drift in Semiconductor Detectors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, pp. 1364–1371, Jun. 2009.
- [67] M. A. Parker, "The ATLAS detector for the LHC," in *American Institute of Physics Conference Series*, ser. American Institute of Physics Conference Series, vol. 272, Feb. 1992, pp. 1837–1841.
- [68] The ATLAS Collaboration, "Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker," *Journal of Instrumentation*, vol. 9, p. P08009, Aug. 2014.
- [69] T. Aaltonen, S. Behari, A. Boveia, B. Brau, and et al., "Operational experience, improvements, and performance of the CDF Run II silicon vertex detector," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 729, pp. 153–181, Nov. 2013.
- [70] "Resolution of the Layer00 Silicon Detector for Various Configurations." [Online]. Available: <http://hep.ph.liv.ac.uk/cdf/sidesign/sidesign.html>

- [71] H. Bichsel, “Inelastic electronic collision cross sections for Monte Carlo calculations,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 52, pp. 136–139, Dec. 1990.
- [72] E. Belau, R. Klanner, G. Lutz, E. Neugebauer, and et al., “Charge collection in silicon strip detectors,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 214, pp. 253–260, Sep. 1983.
- [73] M. Pearce, “The status of the PAMELA experiment,” *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, vol. 113, pp. 314–321, 2002.
- [74] O. Adriani, G. Barbarino, G. Bazilevskaya, R. Bellotti, and et al., “The PAMELA Mission: Heralding a new era in precision cosmic ray physics,” *Physics Reports*, vol. 544, no. 4, pp. 323 – 370, 2014, The PAMELA Mission: Heralding a new era in precision cosmic ray physics . [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157314002087>
- [75] S. Straulino, O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, and et al., “Spatial resolution of double-sided silicon microstrip detectors for the PAMELA apparatus,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 556, pp. 100–114, Jan. 2006.
- [76] H. Malygina, Hit reconstruction for the Silicon Tracking System of the CBM experiment. PhD thesis, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, 2018.
- [77] H. Malygina, “Detector inefficiency study,” 2015, CBM-STs Workgroup Meeting. [Online]. Available: <https://indico.gsi.de/event/3886/>
- [78] “STs performance simulation for different sensor thickness,” 2017, CBM-STs Workgroup Meeting. [Online]. Available: <https://indico.gsi.de/event/6265/>
- [79] Johann M. Heuser, The high count-rate self-triggering silicon tracking system of the CBM experiment at FAIR: Design, series assembly, upgrade options, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* 1066 (2024) 169620, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2024.169620>.

- [80] M. Brigida, C. Favuzzi, P. Fusco, F. Gargano, and et al., “A new Monte Carlo code for full simulation of silicon strip detectors,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 533, pp. 322–343, Nov. 2004.
- [81] I. Panasenko. Development of Electrical Quality Assurance Procedures and Methods for the Silicon Tracking System of the CBM Experiment. PhD Thesis (Tübingen, University of Tübingen, 2023).
- [82] LTspice XVII (x64). [Online; accessed 4-September-2021], <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
- [83] E. Barberis et al. Capacitances in silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:90–95, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91414-1](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(94)91414-1).
- [84] E. Barberis et al. Analysis of capacitance measurements on silicon microstrip detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 41:785–790, 1994. <http://dx.doi.org/10.1109/23.322807>.
- [85] K. Kasinski, W. Zubrzycka, and R. Szczygiel (CBM). Towards STS-XYTERv2.1, a new STS/MUCH prototype readout chip. *CBM Progress Report 2017*, page 30, 2018. <http://dx.doi.org/10.15120/GSI-2018-00485>.
- [86] R. Rodríguez et al. Functional characterization of modules for the Silicon Tracking System of the CBM experiment. *Nucl. Instrum. Methods A* 1058 (2024) 168813.
- [87] O.M. Rodríguez. Characterization and commissioning of the front-end electronics for the Silicon Tracking System of the CBM experiment. PhD Thesis (Frankfurt am Main, Johann Wolfgang Goethe University in Frankfurt am Main, 2023) 137 p.
- [88] I. Panasenko and et al., “CBM Progress Report 2016: Microcable quality assurance: capacitance measurements,” 03 2017. <http://repository.gsi.de/record/201318>.
- [89] Panasenko and et al., “CBM Progress Report 2016: Sensor quality assurance: capacitance measurements,” 03 2017. <http://repository.gsi.de/record/201318>.

- [90] CBM STS collaboration, “Production Readiness Review for the Silicon Sensors of the CBM Silicon Tracking System,” tech. rep., FAIR/GSI CBM, 2019.
- [91] CBM STS collaboration, “STS Module and Ladder EDR: Questions and Answers,” tech. rep., FAIR/GSI CBM, 2020.
- [92] M. Teklishyn et al., Minimal material, maximum coverage: Silicon Tracking System for high-occupancy conditions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1080, 2025, 170714, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170714>.
- [93] R. Brun, F. Bruyant, F. Carminati, S. Giani, M. Maire, A. McPherson, G. Patrick, and L. Urban, “GEANT Detector Description and Simulation Tool,” 1994.
- [94] S. Spannagel, et. al., Allpix2: A modular simulation framework for silicon detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 901, 2018, Pages 164-172, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.020>.
- [95] О.О. Кшиванський, В.М. Пугач, М.А. Теклішин. Дослідження аналогового відгуку сенсорів кремнієвої трекерної системи експерименту CBM за допомогою пакета LTspice. Ядерна Фізика та Енергетика, 26(2) (2025), 193-199. <https://doi.org/10.15407/jnpae2025.02.193>
- [96] O. Kshyvanskyi, M. Teklishyn et al. CBM Progress Report 2023: Simulation of the analogue response of STS modules using LTSpice. GSI-2024-00765 (2024), 35. (URL: <https://repository.gsi.de/record/352779>)
- [97] Agarwal K. The compressed baryonic matter (CBM) experiment at FAIR – physics, status and prospects. / K. Agarwal. // IOP Publishing. - 2023- 98(3).
- [98] Senger, P. Probing the equation of state of dense nuclear matter by heavy ion collision experiments/ Senger, P. //Symmetry. - 2024 - 16(9) – 1162 c.

- [99] M. Singla, P. Larionov, T. Balog, J. Heuser, H. Malygina, I. Momot, I. Sorokin, and C. Sturm, “Radiation tolerance studies of neutron irradiated double sided silicon microstrip detectors,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 824, pp. 462–464, Jul. 2016.
- [100] Collaboration, A. (2022). Elliptic flow of charged particles at midrapidity relative to the spectator plane in Pb-Pb and Xe-Xe collisions. *ArXiv*. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.127453>
- [101] Adeva B. et al. Roadmap for selected key measurements of LHCb //arXiv preprint arXiv:0912.4179. – 2009.
- [102] LHCb Collaboration. LHCb detector performance //International Journal of Modern Physics A. – 2015. – T. 30. – №. 07. – C. 1530022.
- [103] LHCb Collaboration et al. The LHCb upgrade I //Journal of Instrumentation. 19(05):P05065 (2024) 1-211.
- [104] LHCb Collaboration. LHCb SMOG Upgrade. Technical Design Report. CERN-LHCC-2019-005 (Geneva, CERN, 2019).
- [105] LHCb Collaboration. Framework TDR for the LHCb upgrade: Technical Design Report. CERN/LHCC 2012-007 (Geneva, CERN, 2012) 62 p.
- [106] C. Barschel, Precision luminosity measurement at LHCb with beam-gas imaging,
- [107] LHCb Collaboration, LHCb magnet: Technical Design Report //CERN-LHCC-2000-007. LHCb-TDR-1, CERN, Geneva, 2000.
- [108] J. Andre et al., Status of the LHCb magnet system //IEEE Trans. Appl. Supercond.12 (2002) 366.
- [109] J. Andre et al., Status of the LHCb dipole magnet //IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 509.
- [110] LHCb collaboration, LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report //CERN-LHCC-388 2014-001, 2014.
- [111] LHCb high energy physics experiment and extrapolation to the case of space-based experiments, PhD thesis, Bucharest, Polytechnic Inst., 2020, Presented

- 24 Sep LHCb collaboration, LHCb calorimeters: Technical Design Report, CERN-LHCC-2000-036, CERN, Geneva, 2000.
- [112] S. Barsuk et al., Design and construction of electromagnetic calorimeter for LHCb experiment, LHCb-2000-043, CERN, Geneva, 2000.
- [113] R. Djeliadine, O. Iouchtchenko, and V. F. Obraztsov, LHCb hadron trigger and HCAL cell size and length optimization, LHCb-99-035, CERN, Geneva, 1999.
- [114] C. Abell'an Beteta et al., Calibration and performance of the LHCb calorimeters in Run 1 and 2 at the LHC, CERN-LHCb-DP-2020-001, CERN, 2020.
- [115] LHCb collaboration, LHCb muon system: Technical Design Report, CERN-LHCC- 2001-010, CERN, Geneva, 2001.
- [116] LHCb collaboration, LHCb: Addendum to the muon system Technical Design Report, CERN-LHCC-2003-002, CERN, Geneva, 2003.
- [117] LHCb collaboration, LHCb: Second addendum to the muon system Technical Design Report, CERN-LHCC-2005-012, CERN, Geneva, 2005.
- [118] LHCb collaboration, A. A. Alves Jr. et al., The LHCb detector at the LHC //JINST 3 (2008) S08005.
- [119] LHCb collaboration, LHCb reoptimized detector design and performance: Technical Design Report //CERN-LHCC-2003-030, CERN, Geneva, 2003
- [120] V. Pugatch et al. Metal foil detectors and their applications. Nucl. Instr. Meth. A 535(1-2) (2004) 566.
- [121] S.B. Chernyshenko et al. RMS-R3 – the system for monitoring the region of interactions and background at the LHCb experiment (CERN). Nucl. Phys. At. Energy 24(2) (2023) 148.
- [122] Bruining H. Physics and Applications of Secondary Electron Emission: Pergamon Science Series: Electronics and Waves—a Series of Monographs. – Elsevier, 2016.

- [123] E. Budberg; Characteristic energy losses of electrons scattered from incandescent solids. Proc. Roy. Soc. Lond., A127, 111.
- [124] E. Rudberg; Inelastic scattering of electrons from metals. Phys. Rev., 45, 764
- [125] Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. Ст, Емісійна електроніка, М., 1966;
Брюїнінг Р., Фізика і вживання вторинної електронної емісії, пер. (переведення) з англ.(англійський), М., 1958;
- [126] Браун С. Елементарні процеси в плазмі газового розряду, М., 1961;
Гавічев Д. А. [і ін.], Дослідження резонансного високочастотного розряду в схрещених полях, «Журнал технічної фізики», 1965, т. 35, с.813.
- [127] M. Agari et al. Radiation Monitoring System for the LHCb Inner Tracker. LHCb Note 2007-062. 15 p. 7.
- [128] N. M. Tkach та V. A. Kyva, «The linear six-decade integrating converter charge-to-frequency», Nucl. Phys. At. Energy, т. 2, № 4, с. 72—75, 2001. url: http://jnpr.kinr.kiev.ua/02.2/Articles%5C_PDF/jnpr-2001-02-2-072.pdf
- [129] E.J. Sternglass Phys.Rev. 108 (1957) 1
- [130] Okhrimenko, O (Kiev, INR) ; Iakovenko, V (Kiev, INR) ; Pugatch, V (Kyiv, INR) ; Alessio, F (CERN) ; Corti, G (CERN). - The Radiation Monitoring System for the LHCb Inner Tracker. In: Conf. Proc. C111010 (2011) pp.WEPMU024
- [131] Okhrimenko O. Y. Advanced radiation monitoring system for the LHCb inner tracker: beam position control. – 2007.
- [132] Ковальчук О. С., - Металеві мікро-детектори потоків іонізуючого випромінювання, Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 2019, - http://www.kinr.kiev.ua/Theses/Kovalchuk/Thesis_Kovalchuk.pdf
- [133] STMicroelectronics, «Reference manual RM0090. STM32F405/415, STM32F407/41 STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced Arm-based 32-bit MCUs», тех. звіт., Overview and documentation relevant for the STM32F407/ 417 microcontroller series

<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>.

- [134] Martin Lesma, Raul (CERN; Madrid, CIEMAT) ; Alessio, F (CERN) ; Barbosa,J (CERN) ; Baron,S (CERN) ; Caplan,C (CERN ; Rio de Janeiro, CBPF) ; Leitaο,P (CERN); Pecoraro,C (EPFL-IPEQ, Lausanne); Porret,D (CERN); Wyllie,K (CERN),- The Versatile Link Demo Board (VLDB) – Specifications 1.02, January 25, 2017. - <https://cds.cern.ch/record/2275133>
- [135] В.М. Пугач, В.Л. Перевертайло, О.А. Федорович та інш., Мікростріпові Металеві Детектори, Ядерна Фізика та Енергетика, 1 (117) (2006) 95- 101
- [136] Pugatch V.M., Mykhailenko O.V. et al., Micro-strip Metal Detector for the Beam Profile Monitoring. Nucl. Instr. Meth. 2007, Vol. 581, No. 1-2, p. 531-534.
- [137] V.M. Pugatch, V.L. Perevertaylo, O.A. Fedorovich, A.G. Borisenko et al., Plasma technologies for manufacturing of microstrip metal detectors of ionizing radiation. Problems of Atomic Science and Technology. 2007, # 1. Series: Plasma Physics (13), p. 173-175
- [138] О.О. Кшиванський, В.М. Пугач. Симуляція прототипу системи радіаційного моніторингу для експерименту CBM. Наука і техніка сьогодні, 13(54) (2025), 2744-2754. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-2744-2754](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-2744-2754)

Додаток А

Список публікацій здобувача освіти за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. О.О. Кшиванський, В.М. Пугач. Симуляція прототипу системи радіаційного моніторингу для експерименту СВМ. Наука і техніка сьогодні, 13(54) (2025), 2744-2754. (Категорія Б, [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-2744-2754](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-2744-2754), фахове видання України. Внесок здобувача: відповідальний автор, розглянуто перспективи використання системи радіаційного моніторингу для експерименту СВМ, розроблено програмний аналог прототипу RMS-SVM, виконано симуляції реєстрації сигналу та рівня шуму).
2. М. Teklishyn, ..., О. Kshyvanskyi et al. Minimal material, maximum coverage: Silicon Tracking System for high-occupancy conditions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1080, 2025, 170714. (Q2, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170714>, SCOPUS, WoS. Внесок здобувача: виконано дослідження поведінки залежності рівня шуму детекторного модуля КТС від параметрів контуру зворотного зв'язку, оптимізовано дизайн передньої зчитувальної плати).
3. О.О. Кшиванський, В.М. Пугач, М.А. Теклішин. Дослідження аналогового відгуку сенсорів кремнієвої трекерної системи експерименту СВМ за допомогою пакета LTspice. Ядерна Фізика та Енергетика, 26(2) (2025), 193-199. (Q3, <https://doi.org/10.15407/jnpae2025.02.193>, фахове видання України, SCOPUS. Внесок здобувача: відповідальний автор, розроблено програмні аналоги варіацій детекторного модуля КТС, результати

тестування перевірено використовуючи відповідні вимірювання характеристик виконані в лабораторії КТС).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. O. Kshyvanskyi et al. STS powering and grounding circuits optimization. 41st CBM Collaboration Meeting. Presentation. Mixed conference. Darmstadt, Germany, March 2023.
2. O. Kshyvanskyi et al. Understanding the response of the STS: Simulations of the analog electronics of the STS module. Highlight talk. Mixed conference. Bucharest, Romania, September 2023.
3. М. Теклішин, О. Кшиванський. Оцінка прототипів детекторних модулів для кремнієвої трекерної системи CBM. Моделювання аналогової електроніки. XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 вересня 2023 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. – 248 с. – с. 63. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/index.html. Eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/book%20of%20abstracts_2023.pdf
4. O. Kshyvanskyi et al. Understanding, modeling and implementing the analogue response of the silicon tracking system of the CBM experiment at GSI/FAIR. High Energy Physics Theoretical and Experimental Challenges 2025. Video conference. Kyiv, Ukraine, January 2025. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/2/contributions/>
5. О. Кшиванський та ін. Симуляції детектування та обробки сигналу детекторними модулями кремнієвої трекерної системи (КТС) Експерименту CBM. XXXII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26–30 травня 2025 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2025. – 209 с. – с. 73. URL:

<https://indico.kinr.kyiv.ua/event/4/overview>.

Eprint:

<https://indico.kinr.kyiv.ua/event/4/book-of-abstracts.pdf>

6. O. Kshyvanskyi et al. Simulation of the radiation monitoring system prototype for the CBM experiment. High Energy Physics Theoretical and Experimental Challenges 2026. Video conference. Kyiv, Ukraine, January 2026. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/5/overview>
7. О. Кшиванський та ін. Моніторинг функціональних характеристик кремнієвої трекерної системи та області зіткнень ядер в експерименті CBM. XXXIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 травня 2025 року (відеоконференція)). – Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2026. URL: <https://indico.kinr.kyiv.ua/event/13/>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. O. Kshyvanskyi, M. Teklishyn. CBM Progress Report 2023: Simulation of the analogue response of STS modules using LTSpice. GSI-2024-00765 (2024), 35. (URL: <https://dx.doi.org/10.15120/GSI-2024-00765>)

Наукові праці, в складі колаборації LHCb (CERN)

1. Лауреат премії 2025 р. “BREAKTHROUGH IN FUNDAMENTAL PHYSICS” (Certificate attached): <https://cernbox.cern.ch/pdf-viewer/public/FYr1d3cHuJ51UIf/Oleksandr%20Kshyvanskyi.pdf> <https://breakthroughprize.org/Laureates/1/L3995>
2. Співавтор 97 публікацій в наукових виданнях квартилів Q1, Q2: <https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Kshyvanskyi-2/publications>
3. Індекс Гірша становить 12 за даними ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Oleksandr-Kshyvanskyi-2>

Додаток Б

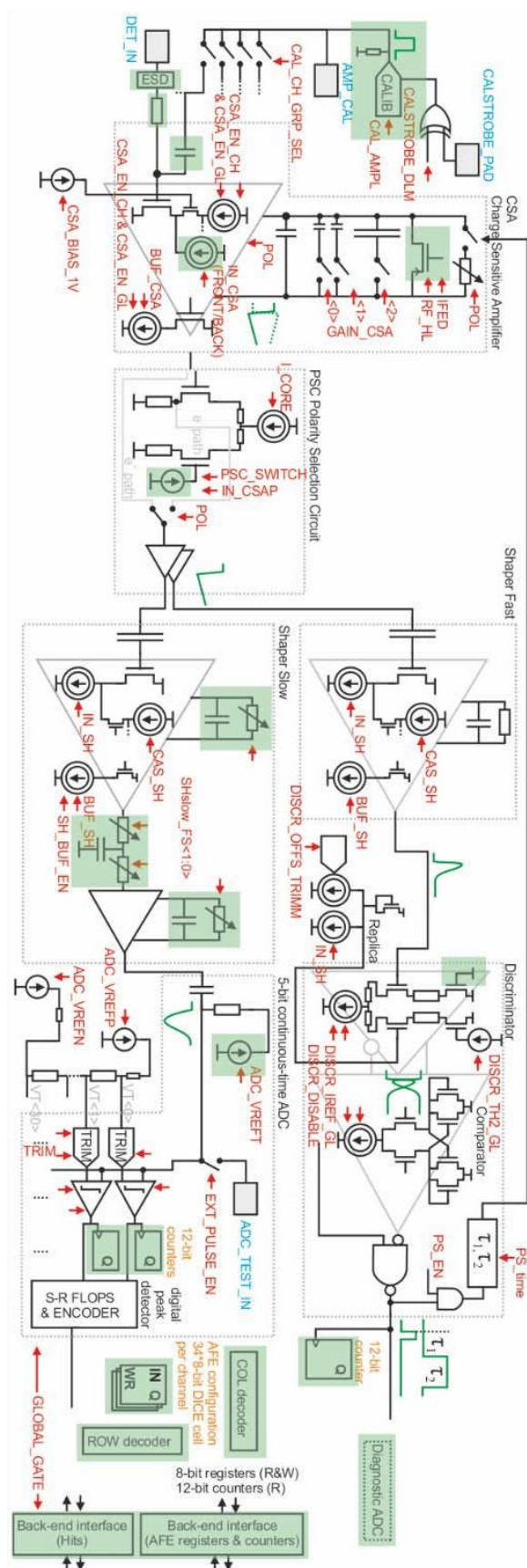


Рис. Б1 Діаграма чіпу STS-XYTERv2.0 [85].

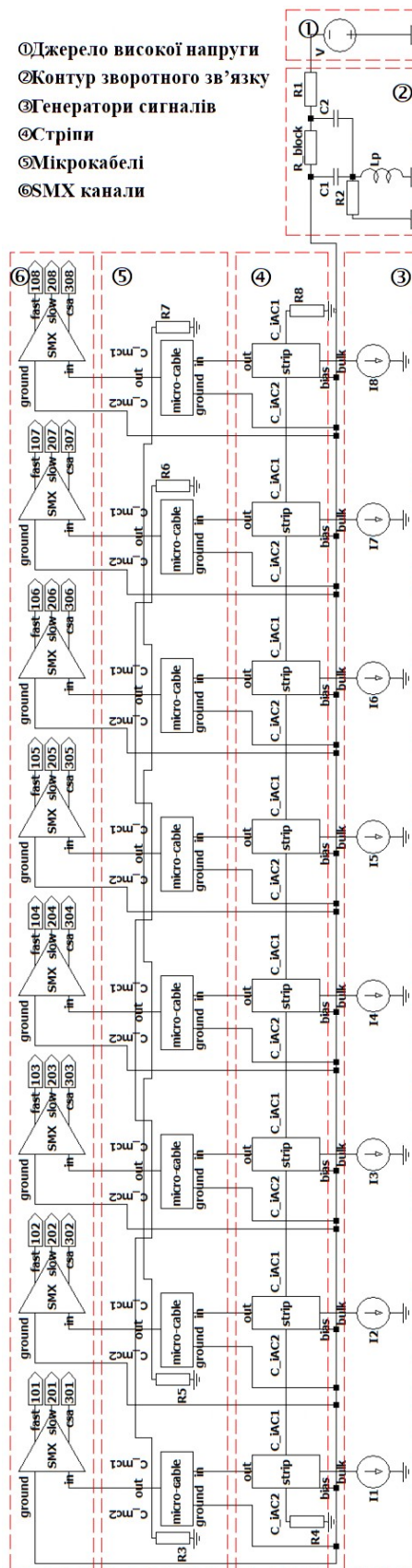
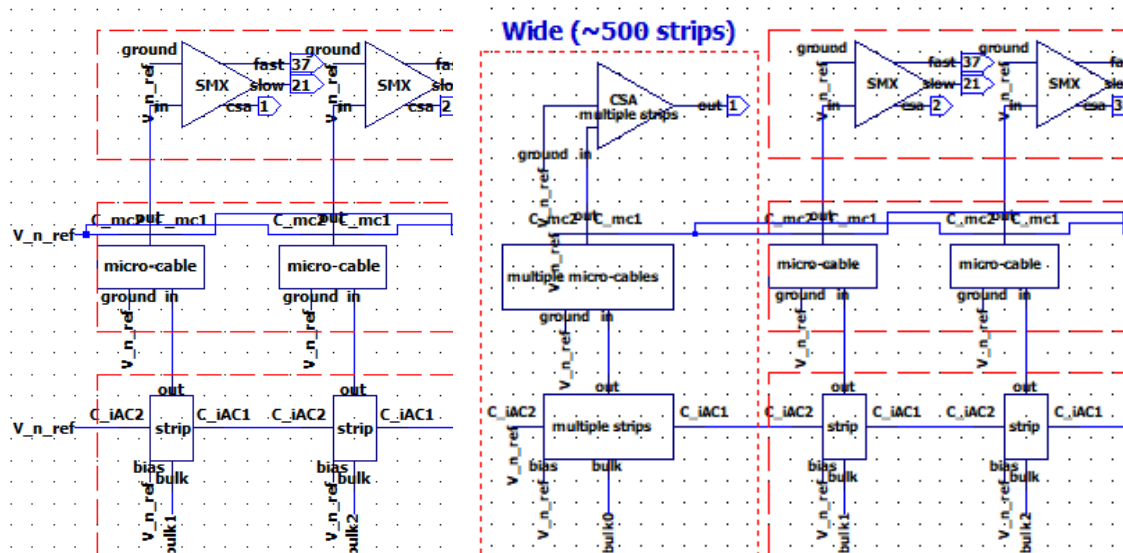
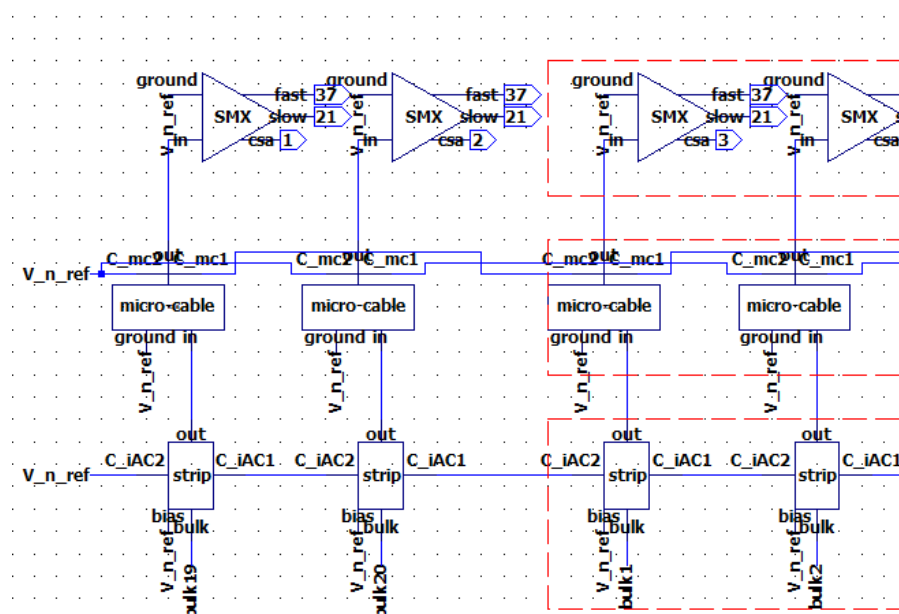


Рис. Б2 Приклад LTspice моделі багатоканального, одностороннього модуля КТС. Наведений приклад демонструє 8-ми каналну схему одностороннього модуля КТС.



(а)

(б)



(в)

Рис. БЗ (а) стандартна принципова схема; (б) комбінація додаткових елементів з великою ємністю та низьким опором («широкий» канал); (в) два додаткові компенсаційні канали (два додаткових стандартних канали).

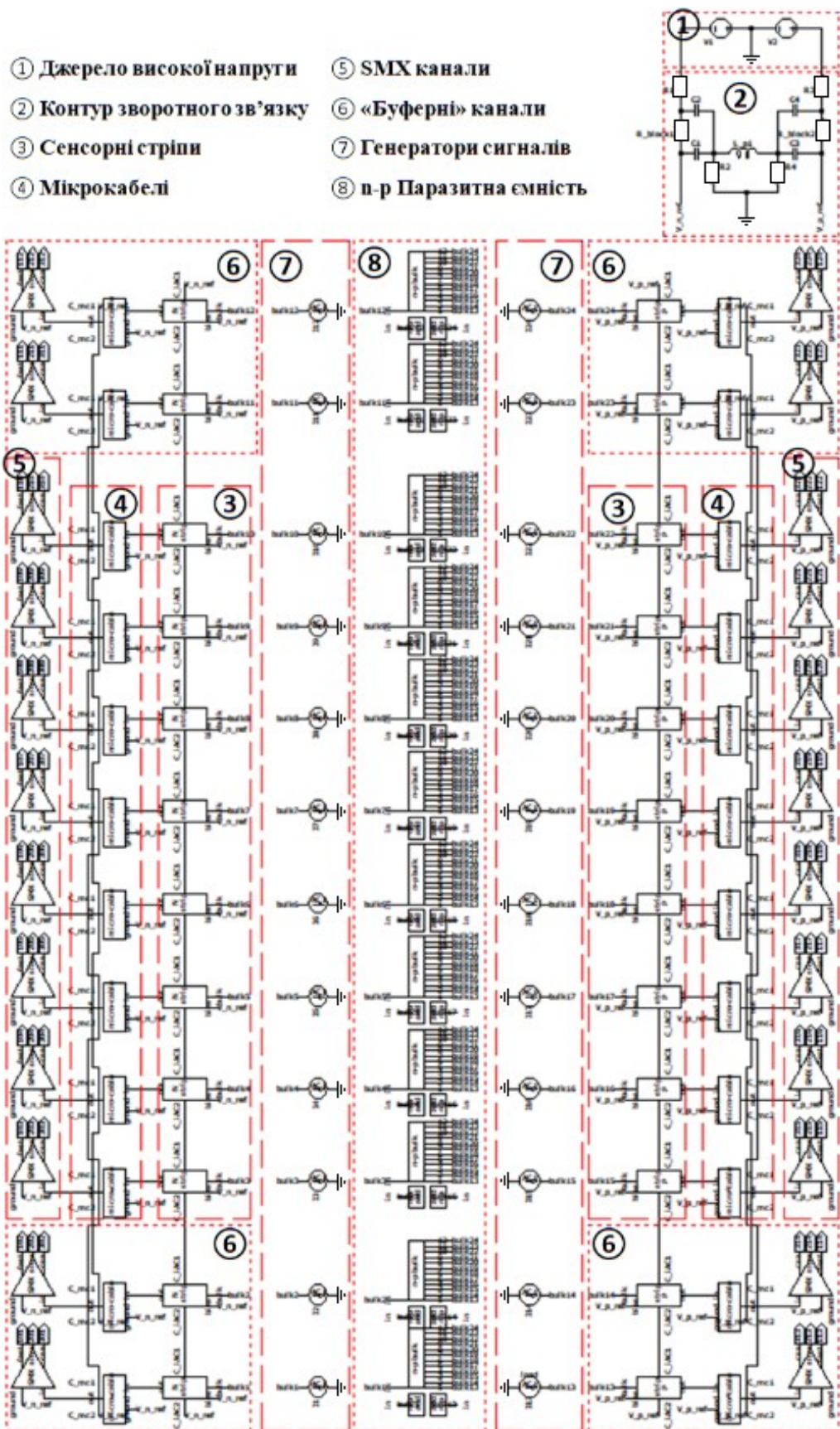


Рис. Б4 Схема використана для симуляцій двостороннього, восьми канального, стріпового детекторного модуля КТС (8 каналів на сторону).