

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

В.М. Пугач, Д.М. Рамазанов, О.О. Кшиванський, С.Б. Чернишенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Сучасна фізика високих енергій спрямована на дослідження фундаментальних властивостей сильно взаємодіючої матерії, зокрема в умовах високих баріонних густин та помірних температур. Одним із ключових інструментів таких досліджень є експеримент Compressed Baryonic Matter (CBM), що реалізується на базі Центру дослідження антипротонів та іонів FAIR у Дармштадті, Німеччина. Основною метою експерименту є дослідження фазової діаграми квантової хромодинаміки (КХД), включаючи пошук критичної точки фазового переходу, дослідження кварк-глюонної плазми та властивостей щільної ядерної матерії [1–3]. Експеримент CBM розрахований для досліджень при високих частотах взаємодії іонів пучка з ядрами мішені (до 10 МГц) і здатний реєструвати слабкі та рідкісні процеси генерації адронів з високою точністю [2]. Експеримент CBM буде використовувати пучки різноманітних важких та легких іонів, зокрема пучки іонів золота з енергією 2 - 11 GeV на нуклон. Реалізація таких досліджень потребує створення нових високоефективних детекторних систем. Висока густина подій, радіаційні навантаження та необхідність безтригерної обробки даних створюють додаткові технічні виклики та обмеження на систему [4].

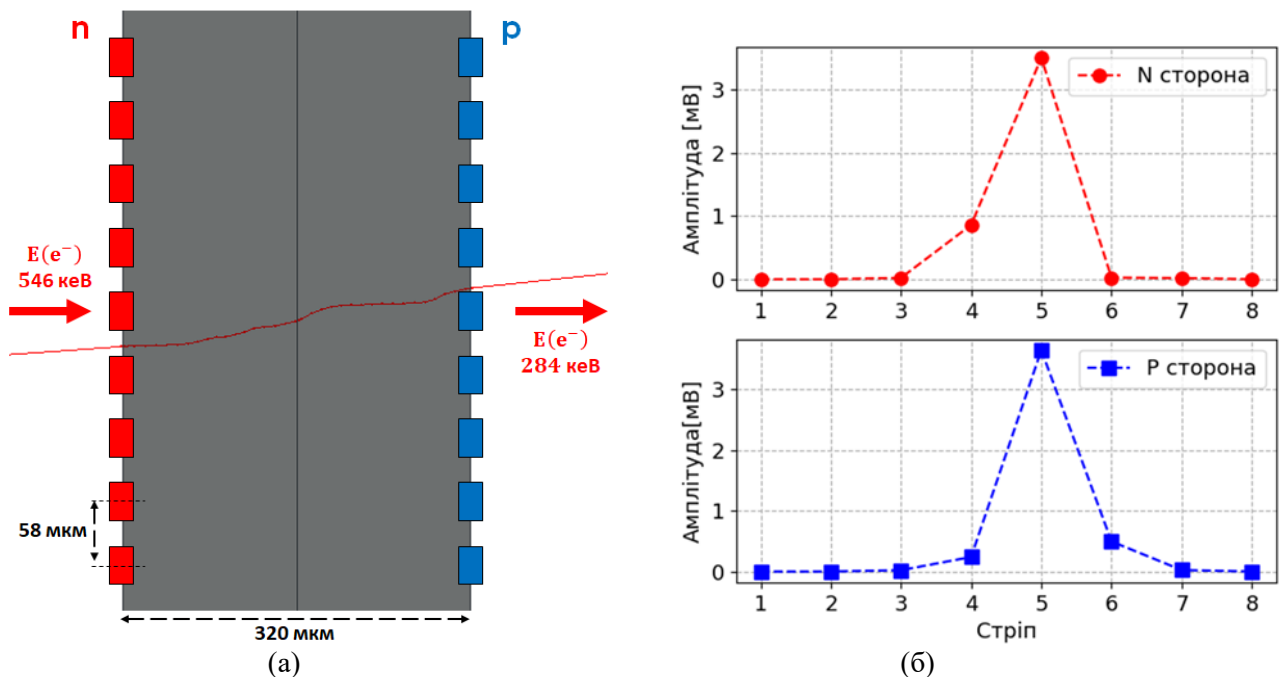


Рис. 1: (а) Allpix2 візуалізація взаємодії електрона, із початковою енергією 546 кеВ, із кремнієвим сенсором шириною 320 мкм, (б) симуляції вихідних сигналів LTspice аналога детекторного модуля КТС (кабелі 20 см, сенсор 2.2 см) для n та p.

Ключовим елементом детекторної системи СВМ є Кремнієва Трекерна Система (КТС) [5], яка забезпечує реконструкцію треків заряджених частинок (з ефективністю понад 95 % для заряджених частинок з імпульсом $p \geq 1$ GeV/c, похибка значення імпульсу 1.5% при $p \geq 1$ GeV/c). Основною функціональною одиницею КТС є детекторний модуль, що складається з двостороннього мікростріпового кремнієвого сенсора та передньої зчитувальної електроніки. Ефективність роботи цих модулів визначає якість реконструкції фізичних подій і, відповідно, достовірність отриманих фізичних результатів. В умовах високої інтенсивності іонних зіткнень особливого значення набуває проблема шумів, паразитних ефектів та деградації характеристик детекторів під впливом радіації. Це обумовлює необхідність створення точних моделей детекторних систем, здатних відтворювати повний ланцюг фізичних процесів — від генерації заряду в сенсорі до його обробки електронікою.

У представленій роботі було розроблено комплексний підхід до моделювання детекторних модулів КТС. Зокрема, створено електронний аналог модуля, що враховує процеси формування сигналу, транспорт носіїв заряду, вплив шумів і паразитних ємностей (рис. 1). Для цього використано сучасні методи чисельного моделювання, включаючи симуляції аналогової електроніки (LTSpice) та Монте-Карло моделювання взаємодії іонізуючого випромінювання з матеріалом сенсора (Geant4, Allpix2). Розроблена модель дозволяє досліджувати залежність характеристик детекторного модуля від параметрів електроніки та геометрії сенсора, що відкриває можливості для оптимізації дизайну. Отримані результати були використані для вдосконалення конструкції передньої зчитувальної електроніки та алгоритмів реконструкції подій.

Важливим аспектом експлуатації експерименту CBM є контроль радіаційних навантажень та стабільності пучка. У зв'язку з цим у роботі запропоновано прототип системи радіаційного моніторингу RMS-CBM, створений на основі технології металеві-фольгових детекторів. Принцип її роботи базується на вторинній електронній емісії при взаємодії заряджених частинок із поверхнею матеріалу. Для дослідження характеристик цієї системи також розроблено її електронний аналог (рис. 2), що дозволяє оцінити відгук, рівень шуму та вплив паразитних ефектів. Проведені симуляції показали можливість ефективного використання RMS-CBM для моніторингу радіаційних умов та положення пучка в експерименті. Це, у свою чергу, сприятиме підвищенню надійності роботи детекторів і продовженню їхнього ресурсу.

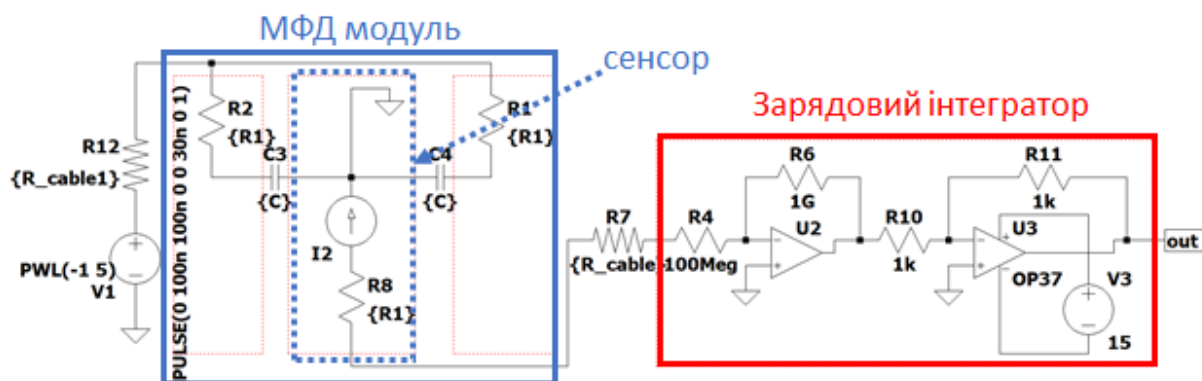


Рис. 2: LTSpice аналог прототипу RMS-CBM: металеві-фольговий детекторний модуль (блакитне), зарядовий інтегратор із входом через коаксіальний кабель R₇ (червоне).

Наукова новизна роботи полягає у створенні першої повноцінної електронної моделі детекторного модуля КТС, яка відтворює повний цикл реєстрації сигналу, а також у розробці моделі прототипу системи радіаційного моніторингу RMS-CBM. Запропонований підхід дозволяє проводити комплексний аналіз роботи детекторних систем і є універсальним інструментом для їх оптимізації. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для підвищення точності вимірювань, зниження рівня шумів та оптимізації конструкції детекторних модулів. Розроблені моделі можуть застосовуватися для тестування, калібрування та діагностики детекторів у процесі експлуатації. Виконане дослідження робить вагомий внесок у розвиток методів моделювання детекторних систем у фізиці високих енергій та створює науково-технічну основу для реалізації експерименту CBM і подальших досліджень властивостей щільної баріонної матерії.

1. FAIR Baseline Technical Report 2006.
2. B. Friman, C. Höhne, J. Knoll, S. Leupold, J. Randrup, R. Rapp, and P. Senger, "The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments," Lect. Notes Phys., vol. 814, pp. pp.1–980, 2011.
3. 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.
4. 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>.
5. [92] M. Teklishyn at all., 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>.

РЕЄСТРАЦІЙНА СТОРІНКА


Моніторинг функціональних характеристик Кремнієвої Трекерної Системи та області зіткнень ядер в експерименті CBM

В.М. Пугач, Д.М. Рамазанов, О.О. Кшиванський, С.Б. Чернишенко
Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

The monitoring of the functional characteristics of the Silicon Tracker System and the nuclear collision region in the CBM experiment

V.M. Pugach, D.M. Ramazanov, O.O. Kshyvanskyi, S.B. Chernyshenko
Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Назва дос-файлу з тезами	NE кшиванський 2026.docx
Формат доповіді (зайве видалити)	Усна секційна
Секція конференції (зайве видалити)	Експериментальна ядерна фізика

Час, хвилин (доповідь + відповіді на запитання)	15+5 хв.
Підписи авторів:	<p>В.М. Пугач</p> <p>Д.М. Рамазанов</p> <p>О.О. Кшиванський </p> <p>С.Б. Чернишенко</p>
Підтримую: Зав. відділу	

Дані про доповідача

Прізвище, ім'я та по-батькові. Посада, науковий ступінь. Місце роботи	Олександр Олександрович Кшиванський аспірант ВФВЕ ІЯД
---	---

E-mail	sashkoalexander@gmail.com
--------	--

Контактний(і) телефон(и)	+38-097-102-93-87
Побажання доповідача стосовно розташування доповіді у програмі (якщо є потреба) – оргкомітет намагатиметься задовольнити	