

О. О. Кшиванський^{1,*}, В. М. Пугач¹, М. А. Теклішин²¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна² Центр дослідження важких іонів імені Гельмгольца, Дармштадт, Німеччина*Відповідальний автор: kshyvanskyi.oleksandr@gmail.comДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГОВОГО ВІДГУКУ СЕНСОРІВ
КРЕМНІЄВОЇ ТРЕКЕРНОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ
ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТА LTspice^a

Розроблено методику симуляції функціонування аналогової електроніки детекторних модулів на основі двосторонніх мікростріпових кремнієвих сенсорів кремнієвої трекерної системи (КТС) експерименту СВМ (стиснута баріонна матерія – Compressed Baryonic Matter). Методика використовує симулятор аналогових електронних схем LTspice і надає можливість моделювання сигнального заряду та його розподілу між компонентами детектора, а також частотного відгуку детекторного модуля КТС. Результати симуляції свідчать про придатність цієї методики для валідації характеристик, оптимізації параметрів та покращення роботи модулів КТС, та можливість її використання для моніторингу КТС під час проведення експерименту СВМ.

Ключові слова: експеримент СВМ, кремнієва трекова система, двосторонні мікростріпові детектори, симуляція аналогової електроніки, оцінка якості детекторних модулів.

1. Вступ

Compressed Baryonic Matter (стиснута баріонна матерія – СВМ) – це експеримент наступного покоління із фіксованою мішенню та форвардною геометрією детектора, що буде проводитися в Центрі дослідження антипротонів та іонів (Дармштадт, Німеччина). Програма експерименту спрямована на дослідження фазової діаграми квантової хромодинаміки при високих баріонних густинах, що будуть досягнуті у релятивістських зіткненнях важких іонів, де очікується спостереження фазового переходу першого порядку від адронної до партонної матерії та хіральний фазовий перехід [1].

Детекторна система СВМ розроблена для вимірювання мультидиференційних поперечних перерізів генерації адронів та рідкісних частинок з високою точністю та статистикою, таких, як багатодивні гіперони, зачаровані частинки та векторні мезони, що розпадаються на лептонні пари. Для досягнення необхідної точності вимірювання будуть проводитися при частоті взаємодій пучка із мішенню від 100 кГц до 10 МГц [1]. Для цього необхідні детектори з часовою роздільною здатністю порядку 5 нс, нова концепція зчитування та аналізу даних, і високопродуктивний обчислювальний кластер для онлайн-вибору подій [2]. Ключовим трекерним детектором експерименту СВМ є кремнієва трекерна система (КТС) [3], розташо-

вана в апертурі надпровідного дипольного магніту [4]. КТС складається з 876 детекторних модулів на основі двосторонніх кремнієвих мікростріпових сенсорів. Якість роботи детекторних модулів КТС визначає загальну якість отриманих даних експериментом СВМ. Це потребує вичерпного дослідження та ретельних тестувань.

Детекторні модулі мають бути оптимізовані для реєстрації сигналів малої амплітуди, що вимагає мінімізації шуму, що виникає внаслідок паразитних ємностей між елементами кремнієвих сенсорів, надтонкими мікрокабелями, та іншими компонентами КТС [5]. Мінімізація шуму можлива через оптимізацію номінальних значень компонент аналогового електричного ланцюга детекторного модуля [6], через вичерпне дослідження характеристик джерел шуму та врахування їх у алгоритмах реконструкції фізичних подій [7] та використання методів симуляції аналогової електроніки для дослідження внутрішніх електричних залежностей між компонентами електричного ланцюга. Це сприятиме створенню еталонної моделі детекторного модуля з метою її використання під час експлуатації детектора СВМ для моніторингу стану та якості роботи детекторних модулів КТС [8].

Дослідження детекторних модулів КТС екстенсивно проводяться декількома робочими групами, включно із групами КТС у Дармштадті, Кракові та Києві.

© Автор(и), 2025

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

^a Представлено на XXXI Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 27 - 31 травня 2024 р.

Дослідження, представлене у цій статті, розвиває ідеї щодо створення електронної моделі детекторних модулів КТС [7] раніше запропоновані групою КТС, та зосереджене на використанні методів симуляції аналогової електроніки для валідації характеристик детекторних модулів КТС [8] та пошуку шляхів подальшого покращення якості їхньої роботи.

2. КТС експерименту CBM

КТС є головним трекером експерименту CBM (рис. 1). Його головним завданням є вимірювання імпульсів заряджених частинок з високою роздільною здатністю та реконструкція їх треків з ефективністю вище 95 % для значень імпульсів $p \geq 1$ GeV/c.

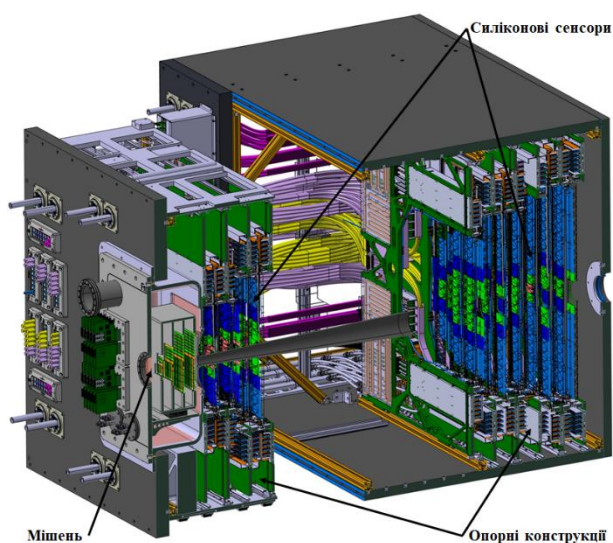


Рис. 1. Схематичне зображення перерізу КТС, розміщеної на опорних конструкціях. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Основні характеристики КТС:

- малий матеріальний бюджет для мінімізації багаторазового кулонівського розсіювання та утворення дельта-електронів і електронів конверсії;
- вимірювання до 1000 частинок на одне центральне зіткнення ядер золота з ядрами золотої мішені (Au + Au) у діапазоні енергій до 11 GeV на нуклон, за частот взаємодії до 10 МГц;
- радіаційно стійкі кремнієві сенсори, придатні для довготривалих вимірювань при високих радіаційних навантаженнях;
- високоточна роздільна здатність за імпульсом (1,5 % для $p \geq 1$ GeV/c);
- високоінтегрований об'єкт – обмежений фізичний доступ після інсталяції системи.

КТС складається з 876 детекторних модулів на основі двосторонніх кремнієвих мікстріпових сенсорів, розташованих у восьми трекерних стан-

ціях (див. рис. 1), що охоплюють апертуру за полярним кутом $2,5^\circ \leq \Theta \leq 25^\circ$ та розміщені всередині дипольного магніту на відстані 30 - 100 см від мішені [3]. Детекторні модулі встановлюються на легку опорну конструкцію із вуглецевого волокна [9], на периферії якої, поза межами фізичного аксептансу, розміщено зчитувальну електроніку детектора. Сигнали від сенсорів передаються на зчитувальну електроніку через надтонкі мікрокабелі на поліімідній основі [10] довжиною до 50 см.

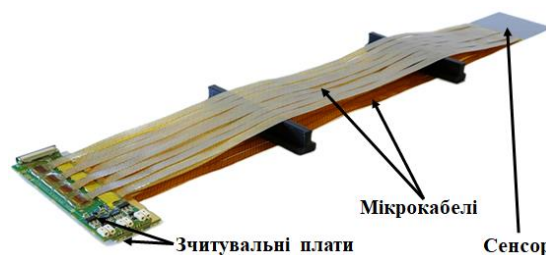


Рис. 2. Фото прототипу детекторного модуля КТС без екрануючого шару: кремнієвий мікстріповий двосторонній сенсор (довжина 62 мм), два набори із шістнадцяти мікрокабелів (довжина 50 см), для під'єднання кожної сторони сенсора до зчитувальної плати. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Детекторний модуль КТС (рис. 2) – функціональний будівельний блок КТС. Основні компоненти: двосторонній кремнієвий мікстріповий сенсор з шаром подвійної металізації, ширина 62 мм, довжини 22, 42, 62 та 124 мм, товщина 320 мкм, 1024 стріпи на кожній стороні, крок 58 мкм; дві плати (FEB) із вісьмома спеціально розробленими зчитувальними мікročіпами STS-XUTER (SMX) [11]; надтонкі алюміній-поліімідні мікрокабелі довжиною від 15 до 50 см, та товщиною 50 мкм [12].

3. Симуляції аналогових ланцюгів зчитувальних модулів КТС

Детекторний модуль КТС є складною системою із взаємозалежними електричними властивостями. За допомогою методів електронного моделювання створюється інструмент для його використання під час проведення експерименту CBM для моніторингу роботи та стану модулів КТС. Такий інструмент дасть змогу визначити чутливі місця в модулі, що потенційно можуть спричинити проблеми в роботі модулів КТС.

Розробку інструменту розпочато з найпростішої версії модуля КТС, поступово ускладнюючи конструкцію через додавання численних ефектів, характерних для реального модуля. Усі симуляції в цьому дослідженні проводилися за допомогою симулятора аналогових електронних схем LTspice [13].

У найбільш спрощеному випадку, для модуля КТС з одностороннім, одноканальним сенсором, еквівалентна схема складається з ключових елементів (рис. 3): сенсорний стріп, що включає кільце напруги зміщення, паразитну ємність до інших елементів модуля, металевий стріп, генератор сигналу, та ємність зв'язку; мікрокабель – довгий, надтонкий кабель, що використовується для транспортування слабких електричних сигналів між сенсором і платою із зчитувальною елект-

ронікою (FEB); SMX канал – попередній підсилювач заряду, швидкий та повільний формувачі для вимірювання часу та амплітуди сигналу відповідно; джерело високої напруги; контур зворотного зв'язку – частина модуля, що стабілізує заземлення SMX каналу і пригнічує шум від джерел напруги (діапазон частот 15 кГц - 1 МГц для повільного каналу зчитування, 15 кГц - 10 МГц для швидкого каналу зчитування) [8].

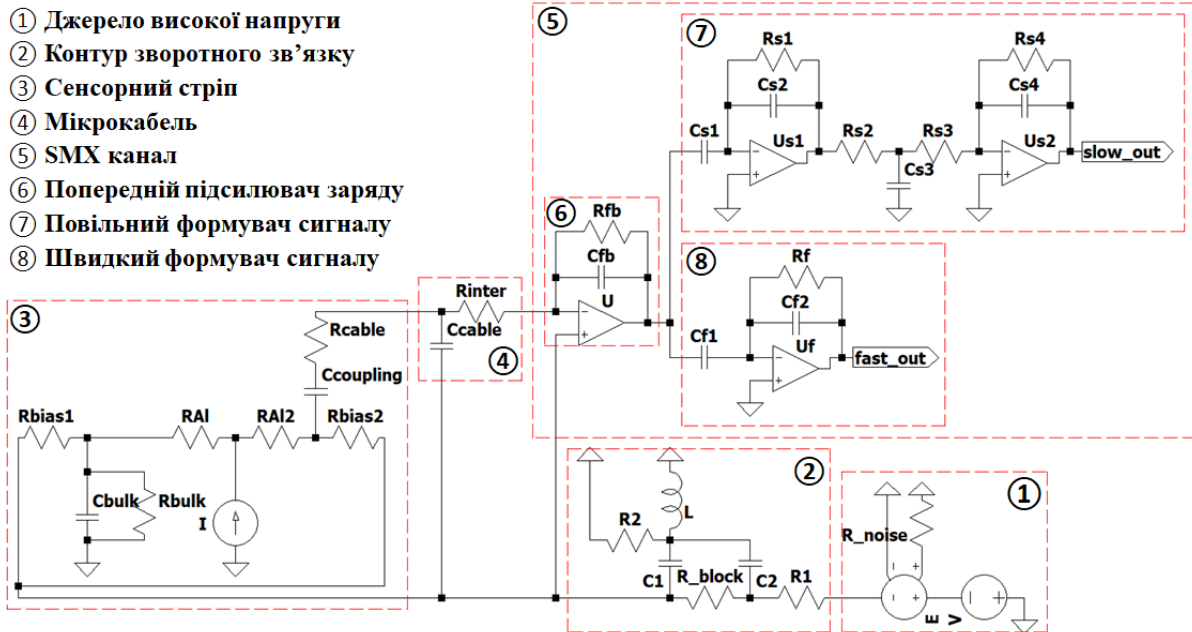


Рис. 3. Спрощена схема одностороннього, одноканального детекторного модуля КТС.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

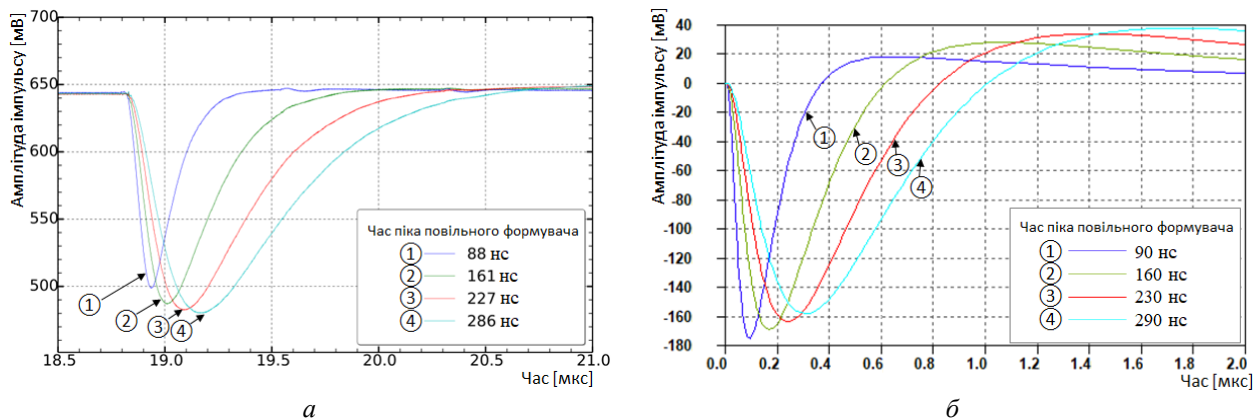


Рис. 4. Сигнал на виході повільного формувача, при інжектуючому заряді 4,5 фКл для різних часів формування сигналу, довжина сенсора 62 мм: а – виміряно в лабораторії КТС [15], б – результат LTspice симуляцій. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для оцінки якості результатів, отриманих використовуючи спрощену схему, було виконано порівняння форми сигналу, з використанням даних для залежності форми сигналу повільного формувача від часу піка [14]. Результати симуляцій форми сигналу (рис. 4) мають гарну узгодженість з вимірюваними даними для повільного формувача, з точки зору амплітуди сигналів та їхніх фронтів.

Також необхідно перевірити якість роботи зарядочутливих підсилювачів, через дослідження залежності рівня шуму від ємнісного навантаження (рис. 5). Симульований рівень шуму збігається з вимірюваним по порядку величин. У той же час симуляція не відтворює кількісно вимірної величини шуму. Максимальне значення розбіжності сягає 40 %. Аналогічно до вимірювання форми сигналу, різницю між вимірюваними та симу-

льованими даними можна пояснити використанням спрощених зарядочутливих підсилювачів у LTspice симуляціях.

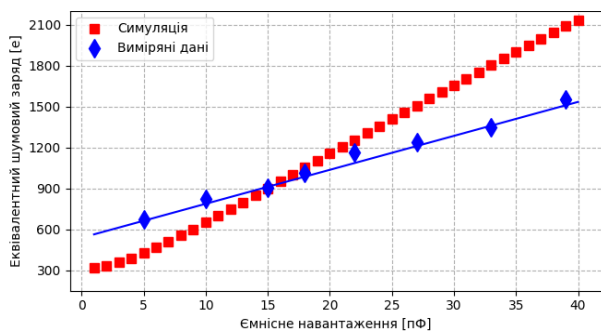


Рис. 5. Рівень шуму, виміряний на виході повільного формувача, як функція ємності навантаження: виміряно в лабораторії КТС (ромби) [15], результат LTspice симуляцій (квадрати). (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Після перевірки роботи одноканальної схеми, наступним кроком є реалізація схеми з кількома каналами для опису паразитних ефектів між каналами детекторного модуля. Для спрощення процесу створення великих схем та для забезпечення легкої параметризації численних параметрів, було створено три спеціальні електричні компоненти в бібліотеці LTspice, кожна з яких до цього була реалізована в явному вигляді (див. рис. 3): сенсорний стріп, мікрокабель, та канал SMX. Номінальні значення параметризовані як функція довжини стріпа або мікрокабелю. Використовуючи ці компоненти, було створено декілька моделей електричних ланцюгів з різною кількістю каналів, як показано на рис. 6.

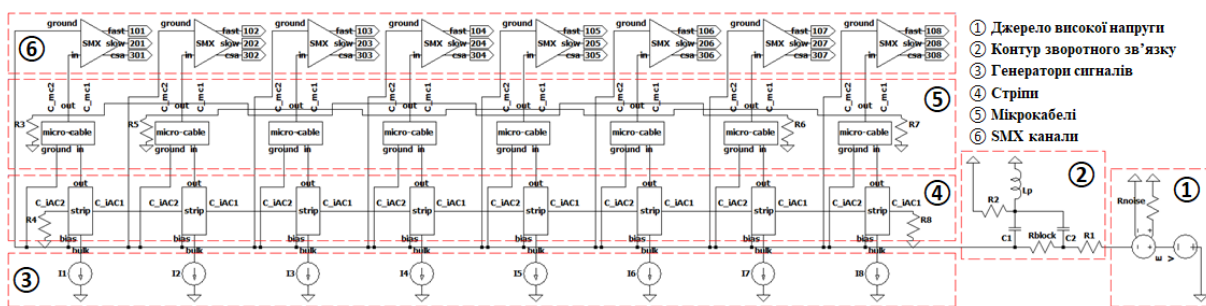


Рис. 6. Восьмиканальна схема одностороннього модуля КТС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Поширеним дефектом, що виникає під час виробництва мікrostріпових сенсорів, є від'єднання або іншим чином пошкоджені стріпи. Використовуючи багатоканальні схеми, було просимульовано вплив розриву ланцюга зчитування стріпа на розподіл інжектованого заряду між сусідніми каналами, з метою оцінки їхнього впливу на загальний результат роботи модуля.

Для імітації такого стріпа 5-й стріп було від'єднано від мікрокабелю, інша частина схеми незмінна. На від'єднаний стріп було інжектовано

заряд. Така ж процедура була виконана без від'єднання 5-го стріпа, з тим же значенням інжектованого заряду. Результати демонструють вплив на розподіл інжектованого заряду між сусідніми каналами (рис. 7, а і б). Такий розподіл можливо використовувати, як спосіб ідентифікації від'єднаних стріпів, через знаходження двох піків однакової амплітуди, розташованих по обидва боки каналу з дуже низькою або нульовою амплітудою сигналу.

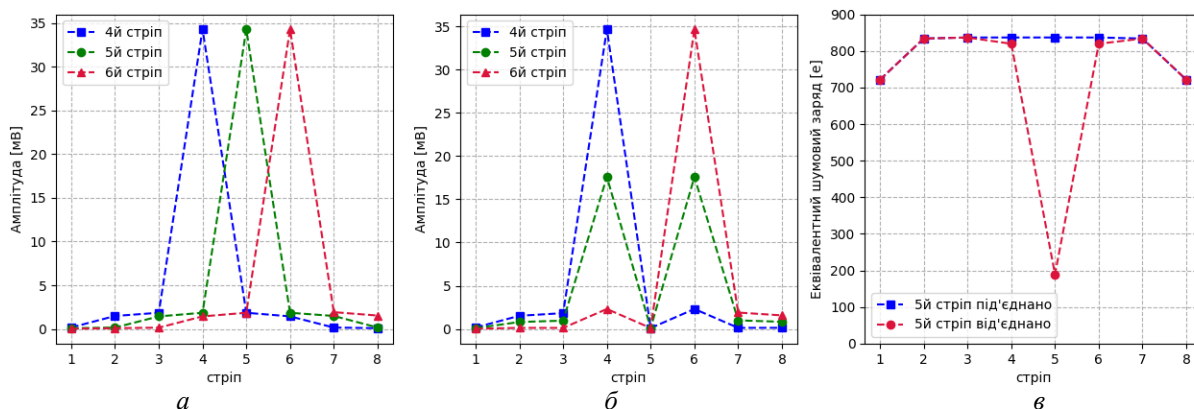


Рис. 7. Восьмиканальна схема одностороннього модуля КТС: а – усі стріпи під'єднано, заряд інjektується послідовно на 4-й, 5-й та 6-й стріпи; б – 5-й стріп від'єднано, заряд інjektується послідовно на 4-й, 5-й та 6-й стріпи; в – моделювання рівня шуму. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для дослідження впливу від'єданого стріпа на рівень шуму 5-й стріп було від'єднано, після чого було просимульовано спектральну густину шуму. Було спостережено значне зменшення рівня шуму для такого стріпа (див. рис. 7, в). Така поведінка може бути використана для ідентифікації дефектних каналів під час збірки модуля, тестування та експлуатації детектора СВМ. Також спостерігається помітне відхилення значень рівня шуму для двох крайніх каналів з обох сторін схеми від решти каналів (1, 2, 7 та 8). Відхилення спричинено іншим перерозподілом заряду на краях схеми внаслідок відсутності достатньої кількості сусідніх каналів порівняно з каналами, розташованими ближче до центра схеми, де кількість сусідів можна вважати однаковою.

Ці результати демонструють важливість врахування паразитних ефектів, та дають змогу оцінити приблизну кількість каналів, необхідних для адекватного опису роботи модуля КТС без симулювання повного модуля.

При симуляції такої системи, як модуль КТС, доцільно симулювати лише певну частину системи або, у нашому випадку, певну кількість каналів. Спроба відтворити повний модуль призведе до суттєвого збільшення часу виконання симуляції без помітного покращення результатів, оскільки, як було показано раніше, вплив одного каналу не поширюється далі ніж на два сусідні канали з обох боків. Таким чином, оптимальна кількість каналів, які повинні бути змодельовані для адекватного опису роботи модуля КТС, можна оцінити у межах від п'яти до восьми на кожену сторону сенсора. Однак, як також було попередньо продемонстровано, рівень шуму для модуля з усіма функціонуючими каналами не залишається однаковим для «граничних» каналів, розташованих на краях сенсора (див. рис. 7, в). Відсутність необхідної кількості сусідніх каналів для «граничних» каналів призводить до іншої величини паразитної ємності, що спричиняє різницю в рівні шуму порівняно з каналами, розташованими далі від краю сенсора. Рішення полягає в двох додаткових «буферних» каналах по обидва боки сенсора. Ці канали мають аналогічну конструкцію та номінальні значення параметрів, що й стандартні канали. «Буферні» канали використовуються лише для компенсації крайових ефектів електричної схеми.

Щоб належним чином симулювати модуль КТС, необхідно додати другу сторону сенсора (рис. 8), для відтворення паразитних ефектів між елементами його протилежних сторін, що значно впливають на рівень шуму та розподіл заряду між каналами. Першим кроком є додавання аналогічної багатоканальної схеми з джерелом високої

напруги та ланцюгом зворотного зв'язку, підключеним через додатковий індукційний елемент, що представляє собою кабель, який з'єднує дві сторони цієї схеми в реальному модулі. Крім того, усі раніше не заземлені (плаваючі) ділянки були замінені підключенням до опорних потенціалів V_{n_ref} та V_{p_ref} для n- та p-сторін відповідно, аналогічно до схеми заземлення, реалізованої в лабораторії STS [15]. Кожен канал підключено до індивідуального генератора сигналу.

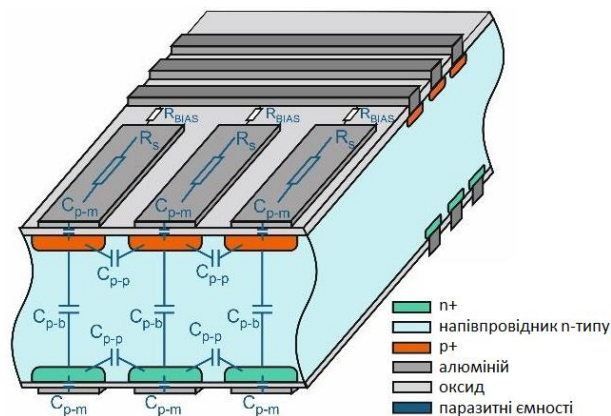


Рис. 8. Поперечний переріз та паразитні ємності двостороннього мікстростріпового сенсора [7]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Через те, що сторони p і n розташовані на відстані 320 мкм одна від одної, таке розміщення створює додаткові паразитні ефекти між елементами на протилежних сторонах сенсора. Найважливішим ефектом є «об'ємна» ємність [5] між двома пересічними металевими стріпами з протилежних сторін сенсора (див. рис. 8). Для компенсації цього ефекту до схеми двостороннього сенсора було додано нові електричні елементи, кожен з яких відтворює «об'ємну» ємність, між одним стріпом сторони n та всіма стріпами сторони p. Номінальні значення компонентів цих елементів параметризовані як функція довжини стріпа.

Схема двостороннього мікстростріпового детекторного модуля КТС симулює роботу восьми-канального сенсора (без врахування «буферних» каналів), з можливістю симуляції сигналу задетектованого заряду, спектральної густини шуму та частотного відгуку. Параметри схеми параметризовані як функції довжин стріпів або мікрокабелів для можливості симуляції детекторних модулів різних розмірів.

Результати моделювання демонструють, що друга сторона сенсора не створює додаткових ефектів, що істотно вплинули б на розподіл сигналу між компонентами сенсора. Основним впливом другої сторони є підвищення рівня шуму, що альтернативно може бути враховано множенням на певний коефіцієнт рівня шуму, отриманого при моделюванні одностороннього сенсора.

На першому етапі дослідження загальних характеристик детекторних модулів КТС здійснено симуляції за схемою одностороннього сенсора. У подальшому передбачається моделювання функціонування КТС з двосторонніми сенсорами для дослідження процесів обміну зарядом. Друга сторона може бути промодельована для дослідження процесів обміну зарядом між елементами протилежних сторін сенсора, ефектів подвійної металізації, та дослідження ефектів, пов'язаних зі змінами параметрів детекторного модуля внаслідок іонізаційного опромінення.

4. Висновки

Використовуючи методи електронних симуляцій аналогової електроніки, було розроблено інструмент для моделювання роботи детекторного модуля КТС експерименту CBM. Розроблений інструмент дає можливість покращити контроль якості модулів КТС через виявлення дефек-

тивних стріпів, покращення якості реконструкції задетектованих подій та може бути використаний як основа для системи моніторингу модулів КТС під час експлуатації детекторної системи CBM.

Можлива перспектива подальшого покращення якості симуляцій через відтворення операційних підсилювачів, розроблених робочою групою КТС, що використовуються у передніх зчитувальних платах FEB [8].

Результати цього дослідження корисні для розробки програмного забезпечення створюваного симулятора відгуку детекторів КТС.

Висловлюємо щирю подяку нашим колегам з робочої групи STS у GSI, та в AGH University of Science and Technology, за необхідну допомогу та підтримку, дискусію результатів та цінні ідеї, щодо подальших досліджень.

Частково ця робота виконується за фінансовою підтримкою проєкту EURIZON (Grant Agreement No. 871072. Grant #3014).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. T. Ablyazimov et al. Challenges in QCD matter physics – The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR. *Eur. Phys. J. A* **53** (2017) 60.
2. B. Friman et al. (Eds.) *The CBM Physics Book: Compressed Baryonic Matter in Laboratory Experiments*. Lecture Notes in Physics 814 (Springer, 2011).
3. The CBM Collaboration. J. Heuser et al. (Eds.) *Technical Design Report for the CBM. Silicon Tracking System (STS)*. GSI Report 2013-4 (Darmstadt, GSI, 2013) 175 p.
4. The CBM Collaboration. *Technical Design Report for the CBM. Superconducting Dipole Magnet* (Darmstadt, GSI, 2013) 87 p.
5. 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).
6. I. Sorokin. Characterization of Silicon Microstrip Sensors, Front-End Electronics, and Prototype Tracking Detectors for the CBM Experiment at FAIR. PhD Thesis (Frankfurt am Main, Johann Wolfgang Goethe University in Frankfurt am Main, 2013) 181 p.
7. H. Malygina. Hit Reconstruction for the Silicon Tracking System of the CBM Experiment. PhD Thesis (Frankfurt am Main, Johann Wolfgang Goethe University in Frankfurt am Main, 2018) 162 p.
8. W. Zubrzycka. Low Noise Integrated Circuits for Radiation Imaging with High-Speed Digital Interface
9. I. Selyuzhenkov, A. Toia (Eds.). *CBM Progress Report 2016* (Darmstadt: GSI, 2017) 223 p.
10. C. Simons. STS Module and Ladder EDR: Questions and Answers. Technical report. FAIR/GSI CBM, 2020.
11. K. Kasinski, R. Szczygiel, W. Zabolotny. Back-end and interface implementation of the STS-XYTER2 prototype ASIC for the CBM experiment. *J. Instrum.* **11** (2016) C11018.
12. М.А. Проценко. Технологія виробництва детекторних модулів радіаційного випромінювання. Дис. ... канд. техн. наук (Харків, Харківський національний університет радіоелектроніки, 2017). / М.А. Protsenko. The Technology for the Production of Radiation Detector Modules. Thesis for the degree of Candidate of Techn. Sciences (Kharkiv, Kharkiv National University of Radioelectronics, 2017).
13. D. Biolek, M. Di Ventra, Y.V. Pershin. Reliable SPICE simulations of memristors, memcapacitors and meminductors. *Radioengineering* **22**(4) (2013) 945.
14. R. Rodríguez et al. Functional characterization of modules for the Silicon Tracking System of the CBM experiment. *Nucl. Instrum. Methods A* **1058** (2024) 168813.
15. 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.

O. O. Kshyvanskyi^{1,*}, V. M. Pugatch¹, M. A. Teklishyn²

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research, Darmstadt, Germany*

*Corresponding author: kshyvanskyi.oleksandr@gmail.com

**STUDY OF THE ANALOG RESPONSE OF THE SILICON TRACKING SYSTEM SENSORS
OF THE CBM EXPERIMENT USING THE LTspice PACKAGE**

A method for simulating the functioning of analog electronics of detector modules based on double-sided microstrip silicon sensors of the Silicon Tracking System (STS) of the CBM experiment has been developed. The method uses the LTspice analog electronic circuit simulator. It provides the ability to simulate the signal charge and its distribution between the detector components, as well as the frequency response of the STS detector module. The simulation results indicate the suitability of this method for validating the characteristics, optimizing the parameters, and improving the operation of the STS modules, and the possibility of using it for monitoring the STS during the operation of the CBM experiment.

Keywords: CBM experiment, Silicon Tracking System, double-sided microstrip detectors, analog electronics simulation, quality assessment of detector modules.

Надійшла / Received 31.12.2024