

**М. В. Пугач*, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. С. Ковальчук,
В. М. Пугач, М. А. Теклішин, С. Б. Чернишенко**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: mvpugach@gmail.com

СИСТЕМА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МОНОЛІТНИХ АКТИВНИХ МІКРОПІКСЕЛЬНИХ ДЕТЕКТОРІВ¹

Представлено систему оцінки якості мікропіксельних детекторів. Система включає лазерний скануючий мікросонд та установку для дослідження відгуку мікродетекторів на мінімально іонізуючі частинки. Результати валідації створеної системи свідчать про її придатність для оцінки якості новітніх монолітних активних піксельних сенсорів (МАПС), перспективних елементів трекових систем великої площі майбутніх експериментів з фізики високих енергій. Порівняння МАПС з двосторонніми мікростріповими детекторами експерименту Compressed Barionic Matter (CBM) (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт) свідчить про доцільність модернізації кремнієвої трекової системи експерименту із застосуванням МАПС.

Ключові слова: монолітні активні мікропіксельні детектори, гібридні мікропіксельні детектори, двосторонні мікростріпові детектори, оцінка якості мікродетекторів, експеримент CBM.

1. Вступ

Розвиток експериментальної фізики високих енергій на сучасних (Large Hadron Collider – LHC, Belle, Relativistic Heavy Ion Collider – RHIC) та майбутніх (High-Luminosity Large Hadron Collider – HL-LHC, Future Circular Collider – FCC, International Linear Collider – ILC, Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR) прискорювальних комплексах характеризується високими світностями та подальшим їхнім зростанням у найближчих десятиріччях. Це обумовлено прагненням пошуку та спостереження нових фізичних явищ, природа яких має рідкісне відображення в сучасних експериментальних методиках. Відповідні виклики до детекторів трекових систем нових експериментів стосуються просторової та часової роздільної здатності, однорідності відгуку сенсорних каналів, мінімізації чутливого та конструкційного матеріалу, довготривалого функціонування в умовах високих радіаційних навантажень, магнітних полів, температурних циклів нагрівання/охолодження тощо.

Фізико-технічні характеристики монолітних активних піксельних сенсорів (МАПС) визначили планування майбутніх трекових систем на їхній основі. Наприклад, усі експерименти на LHC у ЦЕРНі передбачають наступну модернізацію протягом 2026 - 2034 рр. з використанням МАПС в епоху HL-LHC, яка буде характеризуватися зро-

станням світності на 1 - 2 порядки. Характеристики існуючих та новітніх прототипів МАПС повною мірою виправдовують сподівання, що трекові системи на їхній основі забезпечать новий рівень прецизійних вимірювань у фізиці високих енергій. Але важливим кроком на цьому шляху є розробка практичних методик для оцінки їхньої якості.

У цій статті представлено систему оцінки якості МАПС, розроблену в ІЯД НАН України відповідно до проєкту EURIZON № 871072 в рамках Робочого пакету WP7-ДЕТЕС «Спільна розробка детекторних технологій». Виконання робіт триває за двома напрямками: «Розробка технологій CMOS (MAPS – monolithic active pixel sensors) для високошвидкісних трекерів» та «Інтеграція МАПС в експерименти з ядерної фізики та фізики високих енергій, а також в інші галузі науки».

Система базується на двох експериментальних методиках: «Лазерний мікросонд» та установки для вимірювань відгуку детекторів на мінімально іонізуючі частинки (МІЧ). Передбачається також використання методик на рентгенівському дифрактометрі та лазерному мас-спектрометрі. Характеристики МАПС будуть оцінюватись порівнюючи їх з властивостями мікропіксельних детекторів Tiberix [1] (ЦЕРН) та двосторонніх кремнієвих детекторів, розроблених за участі ІЯД НАН України для експерименту Compressed Baryonic Matter (CBM) (FAIR/GSI, Дармштадт) [2].

© М. В. Пугач, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. С. Ковальчук,
В. М. Пугач, М. А. Теклішин, С. Б. Чернишенко, 2023

¹ Доповідь на XXIX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 26 - 30 вересня 2022 р.

2. Фізико-технічні характеристики монолітних та гібридних мікропиксельних та мікстріпових детекторів

Оцінка якості базується на порівнянні вимірних характеристик МАПС з даними кремнієвих мікропиксельних та мікстріпових детекторів. Нижче представлено принцип дії цих трьох типів мікродетекторів.

2.1. МАПС

Визначальна особливість МАПС полягає в тому, що реєстрація частинки і формування відповідного сигналу відбуваються в монолітному кристалі кремнію. На рис. 1 представлено структуру та принцип дії МАПС [3, 4], чутливий шар та зчитувальна електроніка якого виготовлено на одній кремнієвій пластині (*p* – пластина).

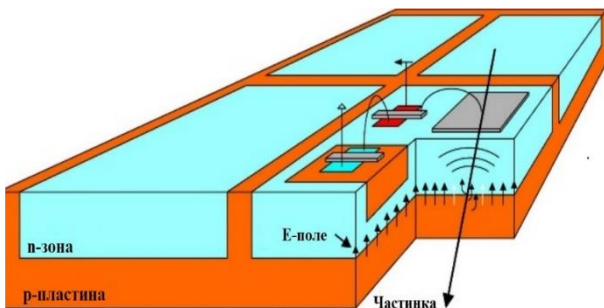


Рис. 1. Схематичне зображення структури та принципу дії МАПС. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

МІЧ (див. на рис. 1 «Частинка»), пронизуючи 50 мкм чутливого шару пікселя, утворює в ньому близько 4000 електрон-діркових пар. Оскільки вхід польового транзистора підсилювача зчитувального каналу (див. на рис. 1 «n-зона»); знаходиться поверх активної області всередині пікселя, вхідна ємність для нього дуже мала (~ 10 фФ). Це обумовлює надзвичайно низький рівень шуму (~ 10 е⁻) та відношення сигнал/шум порядку кількох сотень, забезпечуючи реєстрацію МІЧ з високою (понад 99 %) ефективністю. Крім того, спрощується інфраструктура, необхідна для довготривалої експлуатації детекторів МАПС в умовах високих радіаційних навантажень. Мала товщина МАПС дає змогу розробити трекові системи із низьким бюджетом матеріалу. Висока просторова роздільна здатність (кілька мікрон) у комбінації із часовою міткою сигналу близько 25 пс [5] ставлять ці детектори на перше місце для застосування в майбутніх експериментах [3 - 11] з фізики високих енергій. Перспективним є застосування МАПС в інших галузях науки за аналогією успішних випробувань детектора Timerix [12 - 17].

2.2. Мікропиксельні гібридні детектори Timerix

Серію мікропиксельних гібридних детекторів Timerix [1, 5] було створено в ЦЕРНі колаборацією MEDPIX. Високі показники їхніх властивостей зумовили широке застосування цих детекторів як у фізиці високих енергій, так і в інших галузях науки та техніки. Зокрема, за участі частини авторів даної статті Timerix було вперше застосовано як електронну фокальну площину (мас-спектрометрія [12], рентгенівська дифрактометрія [13]) для кінематично повних досліджень тричастинкових ядерних реакцій [14], для моніторингу пучків синхротронного випромінення [15] та важких іонів для розвитку просторово-фракціонованої радіаційної терапії [16, 17].

Конструктивно гібридний мікропиксельний детектор є матрицею з 256×256 p-n-діодів у вигляді пікселів з розміром 55×55 мкм² на кремнієвій пластині товщиною 300 мкм, сполучених за технологією “bump-bonding” із зчитувальною електронікою (окремий мікročіп відповідного розміру). Зчитування даних здійснюють за допомогою інтерфейсних модулів, таких як FitPix [18], який через USB інтерфейс передає дані до комп’ютера із частотою понад 100 Гц. Дослідження [19] показали, що даний тип детектора дає змогу реєструвати події у вигляді кластера пікселів, розмір якого залежить від типу частинки. Це явище використовується для ідентифікації типу частинки, що дає можливість суттєво знизити фон, наприклад, у дослідженнях ядерних реакцій з трьома альфа-частинками в кінцевому стані [14]. У 2022 р. в рамках 28 нм CMOS (TowerJazz) технології створено новий прототип детектора (PicoPix) для майбутньої модернізації (LS4, 2034 р.) вершинного детектора (LHCb VELO), який має часову роздільну здатність близько 30 пс. [5]. Подальший розвиток передбачає вирішення зростаючих вимог до характеристик детектора, що стосуються грануляції (розміри пікселів), підвищення, радіаційної стійкості до $5 \cdot 10^{16}$ 1 MeV n_{eqv}, см⁻², мінімізації споживаної потужності тощо.

Уперше було здійснено випробування методу «металевої моди» Timerix із використанням лише матриці зчитувальних мікропикселів [15 - 17]. Чутливою до опромінення (іони чи синхротронне випромінення) у цьому режимі є металева площадка, що є входом до мікročіп підсилювача. При бомбардуванні МІЧ з неї відбувається емісія вторинних електронів (ЕВЕ), для збору яких на відстані 3 мм розташовано металеву сітку під малою позитивною напругою (~ 20 В).

За аналогією триває розробка металевої моди МАПС з виключенням із їхньої конструкції кремнієвого чутливого шару. Натомість, поверх всієї

площини зчитувального чіпа на відстані близько 0,5 мм буде встановлено сітку колекторних електродів товщиною 1 мкм, виготовлених за технологією металевих мікροстріпових детекторів [20]. Позитивна напруга близько 5 В забезпечить майже повний збір електронів вторинної емісії (максимум енергетичного розподілу ЕВЕ близько 3 еВ). Такий детектор є структурою монолітного активного піксельного металевого сенсора (МетМАПС). Серед очікуваних переваг МетМАПС відзначимо спрощення виготовлення детектора за комерційною технологією із зменшенням його товщини, використовуючи низькоомний кремній. Це сприяє суттєвому підвищенню радіаційної стійкості, а також знижує собівартість детекторів. Робоча напруга низька і немає необхідності підвищувати її при накопиченні флюенсу зареєстрованих частинок. Відпадає необхідність охолодження детектора у зв'язку із відсутністю струму витоку. Надзвичайно низький рівень шуму ($10 e^-$) надає можливість реєстрації не лише потоків МІЧ, але і одиничних важких іонів за умови генерації ними понад 50 вторинних електронів. Такі виходи ЕВЕ спостерігалися в дослідженні з іонами ксенону. Можливе застосування МетМАПС – “in-situ” моніторинг важко-іонних пучків у радіаційній терапії.

2.3. Двосторонні мікροстріпові кремнієві детектори

Нижче представлено основні характеристики третього типу мікродетекторів, широко застосованих у сучасних експериментах з фізики високих енергій, двосторонніх мікροстріпових кремнієвих детекторів (ДМКД). Зокрема, представлено деякі деталі їхнього застосування в кремнієвій трековій системі (КТС) експерименту СВМ, також з огляду на пропонувану модернізацію, що включає заміну їх монолітними мікропіксельними детекторами.

Реєстрація зарядженої частинки, яка пронизує сенсор, відбувається інтегруванням заряду від електрон-діркових пар зчитувальною електронікою зі стріпів з обох сторін пластини високоомного кремнію. Зауважимо важливу деталь, що стосується значної кількості фейкових хітів при ортогональній конфігурації стріпів на p -стороні по відношенню до n -стороні. Для запобігання цьому ефекту, стріпи з p -стороні розташовують під певним стерео-кутом (у випадку СВМ детекторів: $\pm 7,5^\circ$ [21]). З іншого боку, це створює проблему через необхідність застосування технології подвійної металізації для сполучення коротких стріпів у кутах кремнієвої пластини.

Для виокремлення переваг МАПС порівняно з ДМКД розглянемо детальніше застосування ДМКД, на основі яких відбувається конструювання КТС [21] для експерименту СВМ на майбутньому прискорювальному комплексі

FAIR/GSI. Очікувані флюенси МІЧ на рівні 10^{13} і 10^{14} $1 \text{ MeV}_{\text{neq}} \text{ cm}^{-2}$ (на прискорювачі SIS 100) та 10^{14} і 10^{15} $1 \text{ MeV}_{\text{neq}} \text{ cm}^{-2}$ (на прискорювачі SIS 300) є достатніми для радіаційного ушкодження детекторів та відповідного зменшення ефективності збору заряду. Спричинене погіршення відношення сигналу до шуму негативно впливає на ефективність реконструкції треків заряджених частинок та визначення їхнього поперечного імпульсу. Суттєвою перевагою МАПС порівняно з ДМКД є прямий контакт чутливих до МІЧ пікселів до зчитувальних пікселів. У випадку ж ДМКД, зчитувальні мікропідсилювачі під'єднуються до стріпів спеціальними тонкими мікрокабелями, довжина яких 50 см. Це обумовлено необхідністю мінімізації матеріалу в акцептансі експерименту, конструюванням охолоджуючої інфраструктури та зменшенням радіаційних навантажень на периферії КТС. Для забезпечення функціонування КТС за умови накопичення флюенсу від МІЧ (зростання зворотного струму, падіння ефективності збору заряду) передбачено охолодження детекторних модулів та підняття напруги зміщення сенсорів до 500 В. Це спричиняє суттєве ускладнення необхідної інфраструктури КТС, яка складається з 876 двосторонніх кремнієвих мікροстріпових сенсорів (кожний має 1024 стріп з кожної сторони з кроком 58 мкм). Перед монтажем сенсорів у детекторні модулі оцінюють їхню глобальну якість (вимірювання IV-CV залежностей та перевірка цілісності стріпів на спеціально створеному пристрої). Подальша процедура оцінки якості включає вимірювання характеристик сигналу та шуму кремнієвих мікροстріпових модулів щодо відгуку на МІЧ (амплітудні спектри, співвідношення сигнал - шум, наведення на сусідні канали тощо). Для цього створено методику на основі системи ALIBAVA [22] із застосуванням мікрокабелю для сполучення стріпів та зчитувальної електроніки, яка буде детальніше представлена в наступному розділі.

3. Експериментальні методики для оцінки якості мікродетекторів

Представлена нижче система оцінки якості мікродетекторів розрахована на два рівні. Система першого рівня призначена для вимірювання функціональних характеристик мікродетекторів та оцінки їхньої придатності для трекових систем в експериментах з фізики високих енергій. Система другого рівня призначена для валідації застосування мікродетекторів в інших галузях науки.

Накопичений досвід із застосувань та характеристики мікропіксельних гібридних детекторів Тімеріх став основою для створення експериментальної методики для характеристики МАПС та

дослідження можливості їхнього застосування в різних галузях науки. Процедура оцінки якості включає вимірювання характеристик сигналу та шуму мікродетекторів щодо відгуку на МПЧ (амплітудні спектри, співвідношення сигнал-шум, наведення на сусідні канали тощо). Основні характеристики системи оцінки якості першого рівня включають ефективність відгуку на МПЧ, однорідність відгуку по площині детектора, відсутність електромагнітнонаведених сигналів, мінімальна частота примарних сигналів (ghost hits), радіаційна стійкість, здатність функціонувати при високих напругах та температурних циклах тощо.

3.1. Експериментальна методика «Лазерний скануючий мікросонд»

Лазерний мікросонд складається із власне лазера та знаряддя для фокусування лазерного пучка та прецизійного електромеханічного пристрою для сканування. Створений простий програмний пакет забезпечує автоматизоване сканування сфокусованого лазерного пучка по площі досліджуваного мікродетектора (ДД). Валідацію створеної методики проведено із застосуванням методу субмікронної просторової чутливості міжстріпового проміжку мікростріпових детекторів [23]. З цією метою сфокусований лазерний промінь (діаметр плями на поверхні сенсора 52 мкм) сканували з кроком 3 мкм між двома сусідніми стріпами p -сторони одного із прототипів кремнієвого мікростріпового детектора СВМ-06 з відкритим міжстріповим проміжком 58 мкм. Амплітуду сигналів на збігах з обох стріпів записували через аналогово-цифрові перетворювачі до системи накопичення та аналізу кореляційних даних на основі дискретних блоків електроніки для дослідження в ІЯД НАН України тричастинкових ядерних реакцій у кінематичноповних експериментах [14]. Система дає змогу накопичувати дані одночасно від восьми пар стріпів. Приклад результатів вимірювань такою системою представлено на рис. 2 у вигляді двовимірних розподілів амплітуд сигналів зареєстрованих подій. На цьому рисунку по горизонтальній та вертикальній осях відкладено амплітуди сигналів у сусідніх стріпах двостороннього мікростріпового детектора СВМ-06 при напрузі його повного збіднення 147 В. Як видно на рисунку, області локалізації подій (локуси) зміщуються при тримікронних (див. на рис. 2 написи «15», «18» та «21») переміщеннях лазерного променя: від правого нижнього краю (координати X/Y – 120/20), до середини двовимірного розподілу (координати X/Y – 70/70) та до лівого верхнього краю (координати X/Y – 20/120). При подальших переміщеннях лазерного променя амплітуда сигналів в обох каналах зменшується на відміну від очікуваної кореляції амплітуди згідно із принципом розподілу зібраних

зарядів у міжстріповому проміжку [23]. Це пояснюється співвідношенням розмірів лазерної плями (діаметр 52 мкм) та відстанню між стріпами (58 мкм). Більш детальне пояснення наведено нижче, оскільки це важливо для твердження про субмікронну чутливість [23] методики для оцінки просторових характеристик мікродетекторів.

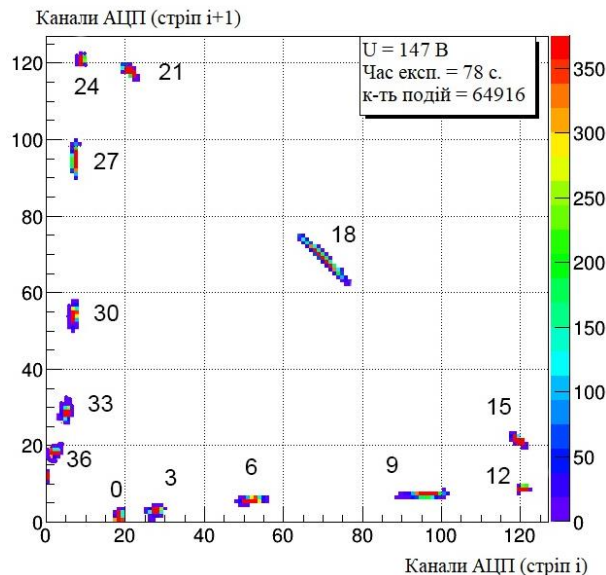


Рис. 2 Двовимірний розподіл амплітуд сигналів із сусідніх стріпів мікростріпового детектора при опроміненні міжстріпового проміжку імпульсами лазерного мікросонду при його переміщенні з кроком 3 мкм. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Почнемо з випадку, коли лазерна пляма знаходиться точно посередині міжстріпового проміжку. У цьому випадку кожний імпульс лазера утворює однакову кількість електрон-діркових пар по обидва боки від діаметральної лінії плями, паралельної до стріпів. Тому заряди, зібрані зарядово чутливою електронікою обох стріпів мають бути однаковими. Дійсно на рис. 2 цей випадок відповідає локусу подій у центрі 2Д гістограми (поруч з написом «18»), центр якого має координати X/Y – 70/70 у відносних одиницях (номер каналу АЦП), пропорційних амплітудам зібраних зарядів.

Перейдемо до випадку, коли лазерну пляму переміщено на 3 мкм ближче до першого стріпа (стріп i). Локус подій перемістився в нижній правий кут 2Д гістограми (поруч з написом «15») центр якого має координати X/Y - 120/20 (у одиницях АЦП).

Аналогічна процедура з переміщенням лазерної плями на 3 мкм від центрального положення, але в бік іншого стріпа (стріп $i + 1$) призводить до переміщення локусу подій у верхній лівий кут 2Д гістограми (поруч з написом «21»), центр якого має координати X/Y - 20/120 (у одиницях АЦП). Той факт, що сума амплітуд в усіх трьох випадках

однакова (140 одиниць АЦП) свідчить про повний збір зарядів у цих випадках, а отже можливість виконання лінійних інтерполяцій для визначення в абсолютних одиницях переміщення лазерної плями в межах 6 мкм. При цьому точність визначення центроїду розподілу подій (локусу) визначається статистикою накопичених даних і може сягати субмікронного рівня. Зазначимо, що дані на рис. 2 (64 016 подій) одержано за 78 с при частоті лазерних імпульсів близько 1 кГц. Ці вимірювання дають змогу відкалібрувати скануючий електро-механічний пристрій для дослідження просторової роздільної здатності МАПС та оцінки вірогідних наведень у сусідні (неопромінювані пікселі, а також однорідність їхніх відгуків при варіації яскравості лазерного променя.

Технічні параметри методики «Лазерний скануючий мікрозонд» дають можливість проводити дослідження, формуючи лазерні імпульси тривалістю 5 нс з частотою до 10 кГц. Діаметр сфокусованого променя на поверхні досліджуваного сенсора становить 20 - 100 мкм, точність визначення центра світлової плями близько 0,5 мкм.

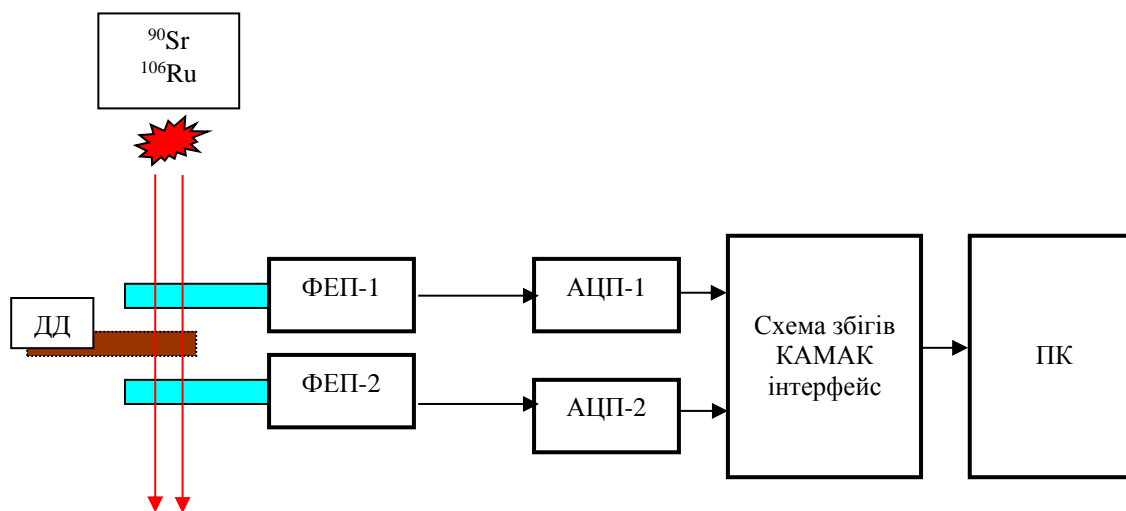


Рис. 3. Спрощена блок-схема методики для дослідження відгуку мікродетекторів на МІЧ. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

З використанням радіоактивних β -джерел ^{90}Sr (гранична енергія 2,3 MeV), або ^{106}Ru (3,5 MeV) необхідно так побудувати тригер, щоб із усього β -спектра були відібрані лише події для енергій, що перевищують 2,0 MeV. З цією метою в аналоговому тракті другого сцинтиляційного детектора встановлюється нижній поріг, що відповідає амплітуді сигналу 2,0 MeV. Методика забезпечує селекцію подій, спричинених МІЧ, при опроміненні ДД бета-частинками радіоактивного джерела або мюонами з космічних променів. ДД розташовується між двома пластмасовими сцинтиляторами (див. на рис. 3 позначено синім кольором), спалахи в яких реєструються швидкими (XP-1023) фотопомножувачами (ФЕП-1 та ФЕП-2).

3.2 Експериментальна методика «Імітатор МІЧ»

Необхідною характеристикою мікродетекторів трекових систем є їхній відгук на так звані МІЧ до і після опромінення до очікуваного флюенсу протягом тривалості експерименту. За визначенням МІЧ – це усі високоенергетичні заряджені частинки (протони з енергією понад 500 MeV, електрони при енергіях вище 2,0 MeV тощо). Втрати енергії МІЧ у чутливому шарі детектора залежать лише від його товщини. При тому, що можливою є втрата будь-якої енергії, від нульової до повної, ймовірність втрат швидко спадає в бік малих енергій і набагато повільніше в бік високих енергій (розподіл Ландау) та характеризується величиною найбільш імовірних втрат (НІВ). Наприклад, для кремнію товщиною 300 мкм НІВ становить величину близько 80 keV.

Нижче наведено основні параметри експериментальної методики, створеної для оцінки якості мікродетекторів стосовно їхнього відгуку на МІЧ. Спрощену блок-схему одного із варіантів методики імітації МІЧ представлено на рис. 3.

Співпадаючі (2 нс роздільний час) аналогові сигнали через аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП-1 та АЦП-2) записуються в пам'ять комп'ютера (ПК) для подальшого аналізу даних. Селекція МІЧ подій в області ДД, обмеженої розмірами сцинтиляторів, здійснюється відбором у спектрі ФЕП-1 низькоенергетичних, а в спектрі ФЕП-2 високоенергетичних сигналів.

На рис. 4 наведено фото основних елементів експериментальної методики для дослідження мікростріпових детекторів експерименту СВМ. У верхній частині – металевий контейнер з дочірньою платою вимірювальної системи ALIBAVA [22], сполученої мікрокабелем із досліджуваним мікростріповим детектором. У нижній частині –

металевий контейнер з розміщеним у ньому сенсором та зчитувальною платою ALIBAVA. ALIBAVA є портативною зчитувальною системою на основі мікроелектроніки, розробленої для експерименту ЛНСб. Сполучення із детектором здійснюється за допомогою двох 128-канальних мікрокабелів із кроком 116 мкм). Під цим контейнером розташовано тригерний пристрій у складі пластмасового сцинтилятора

та фотопомножувача в захисному корпусі. Ширина пластмасового сцинтилятора 1 см. Скануючи тригерний пристрій з кроком 1 см, отримується інформація про однорідність відгуку сенсора по його площі ($6,2 \times 6,2 \text{ см}^2$), а також про можливі наведення (наприклад через лінії вторинного металевого шару, які близько 50 разів перетинають площину детектора для сполучення кутових стріпів.

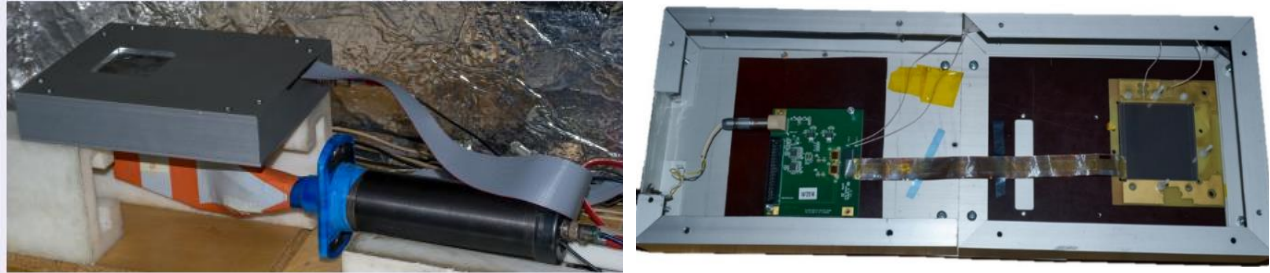


Рис. 4. Фото основних компонентів експериментальної методики для дослідження відгуку мікродетекторів на МІЧ. *Зліва* – контейнер із сенсором та дочірньою платою вимірювальної системи ALIBAVA [22]. Під контейнером – тригерний пристрій МІЧ (детальніше в тексті). *Справа* – контейнер із сенсором, сполученим мікрокабелем із дочірньою платою системи ALIBAVA. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

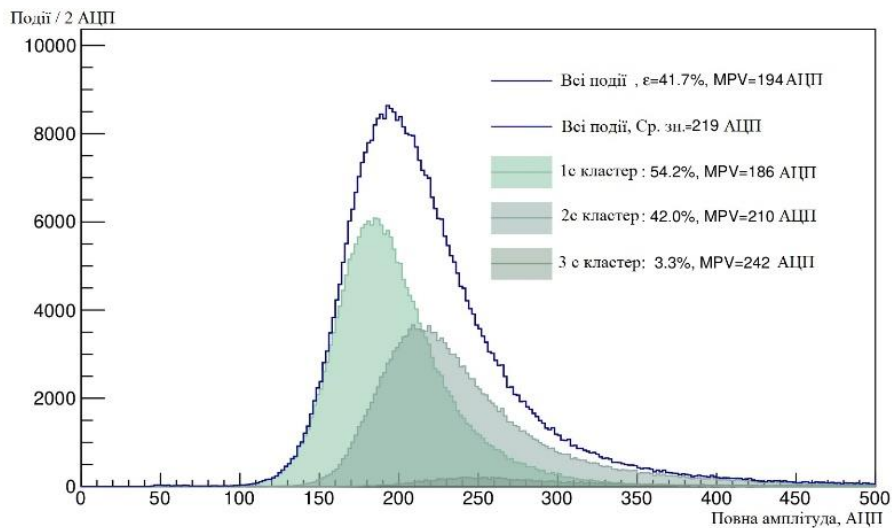


Рис. 5. Амплітудний розподіл сигналів мікροстріпового детектора, виміряний за описаною вище методикою, представленою на рис. 3 і 4. На вставці наводяться величини НІВ для одно-, дво- та тристріпових кластерів подій при реєстрації МІЧ.

На рис. 5 наведено амплітудний розподіл сигналів МІЧ, виміряний за описаною вище методикою, з неопроміненого мікροстріпового детектора СВМ-06. Програмне забезпечення дає змогу відбирати події при відгуках в одному, двох або трьох стріпах. На текстовій вставці рисунка наведено значення НІВ в АЦП одиницях.

Вирішальною характеристикою якості детекторного модуля є відношення сигнал/шум. Для неопроміненних сенсорів СВМ-06 це відношення становить 20 - 25 (залежно від довжини стріпів та мікрокабелів). Після опромінення до граничного значення флюенсу, очікуваного за час «життя»

експерименту (10 років) відношення сигнал/шум знижується до рівня 10, ще допустимого за феноменологічно встановленою величиною, при якій ефективність реконструкції хітів від МІЧ та ефективність реконструкції треків перевищує 95 %. Висока ефективність реконструкції хітів від МІЧ (95 %) є необхідною умовою трекінга експерименту СВМ. Деградація відношення сигнал/шум в опроміненних детекторах спричиняється втратою до 30 % сигнального заряду (захоплення електрон-діркових пар на радіаційних дефектах у кристалевій ґратці) та підвищення шуму за рахунок зростання струму витоку сенсора та зміни

типу провідності кремнію. Забезпечення функціонального стану сенсора потребує підвищення напруги зміщення (для покращення ефективності збору заряду до 500 В) та охолодження сенсора до 40°C для зменшення дробового шуму.

4. Висновки

Створено систему оцінки якості сучасних мікростріпових та мікропксельних детекторів, що включає експериментальні методики «Лазерний скануючий мікрозонд» та «Імітатор МІЧ». Система забезпечує вимірювання основних характеристик мікродетекторів (до та після опромінення) із просторовою роздільною здатністю близько 1 мкм та часовою роздільною здатністю близько

2 нс. Перспектива використання МАПС у майбутніх експериментах з високою світністю базується на кількох факторах їхніх переваг, які мають бути оцінені за результатами досліджень характеристик їхніх прототипів, у тому числі з використанням створеної системи.

Ці роботи виконуються за фінансової підтримки Програми Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій Horizon 2020 у рамках грантової угоди EURIZON № 871072, а також Цільової Програми НАН України «Участь у новітніх міжнародних проєктах з фізики високих енергій та ядерної фізики» та гранту Тьубінгенського університету ім. Еберхарда Карла (фонд 2208, PSP 3038012001).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. X. Llopart et al. Timepix4, a large area pixel detector readout chip which can be tiled on 4 sides providing sub-200 ps timestamp binning. *JINST* 17 (2022) C01044.
2. P. Senger, V. Friese (CBM Collaboration). CBM Progress Report 2021. GSI-2022-00599 (Darmstadt: GSI, 2022) 239 p.; J. Heuser et al. Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System. GSI Report 2013-4. GSI-2013-05499 (Darmstadt: GSI, 2013) 167 p.
3. H. Augustin et al. The MuPix high voltage monolithic active pixel sensor for the Mu3e experiment. *JINST* 10 (2015) C03044.
4. K. Arndt et al. Technical design of the phase I Mu3e experiment. *Nucl. Instrum. Meth. A* 1014 (2021) 165679.
5. LHCb Collaboration. Framework TDR for the LHCb Upgrade II: Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era: Technical Design Report. CERN-LHCC-2021-012. LHCb-TDR-023. (Geneva: CERN, 2012) 201 p.
6. F. Reidt. ALICE ITS2 – A Monolithic Active Pixel Sensor Based Inner Tracking System for ALICE CERN Detector Seminar, 21st October 2022.
7. R. O’Neil. HV-MAPS for the LHCb Upgrade-II Mighty Tracker. In: *The 31st International Workshop on Vertex Detectors 2022, Tateyama, Japan, 23 - 28 October 2022*.
8. I. Perić et al. High-Voltage CMOS Active Pixel Sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 56(8) (2021) 2488.
9. G.A. Rinella et al. First demonstration of in-beam performance of bent Monolithic Active Pixel Sensors. *Nucl. Instrum. Meth. A* 1028 (2022) 166280.
10. P. Klaus et al. (CBM Collaboration). Technical Design Report for the CBM: Micro-Vertex Detector (MVD) (GSI, Darmstadt, Germany, 2022) 157 p.; M. Deveaux et al. Observations on MIMOSIS-0, the first dedicated CPS prototype for the CBM MVD. *Nucl. Instrum. Meth. A* 958 (2020) 162653.
11. G. Contin et al. The STAR MAPS-based PiXeL detector. *Nucl. Instrum. Meth. A* 907 (2018) 60.
12. M. Campbell et al. Hybrid micropixel detector at the focal plane of the mass-spectrometer. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 10(4) (2009) 424.
13. М.В. Пугач та ін. Використання мікропксельного детектора TimePix для спостереження динаміки фазових переходів у металах. *Ядерна фізика та енергетика* 13(4) (2012) 382. / M.V. Pugach et al. Usage of the micropixel detector TimePix for observation of the dynamics of phase transitions in metals. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 13(4) (2012) 382. (Ukr)
14. M. Pugach et al. Micropixel TimePix Detectors for Kinematics Complete Studies of the Reaction $^{11}\text{B}(p, 3\alpha)$. *Annual Report - 2012 (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2013) p. 81*; C. Granja et al. Position-Sensitive Coincidence Detection of Nuclear Reaction Products with Two Timepix Detectors and Synchronized Readout. *Proceedings of Science POS (X LASNPA)* (2013) 043.
15. V. Pugatch et al. Metal micro-detector TimePix imaging synchrotron radiation beams at the ESRF Bio-Medical Beamline ID17. *Nucl. Instr. Meth. A* 682 (2012) 8.
16. V. Pugatch et al. Characterization of equipment for shaping and imaging hadron minibeams. *Nucl. Instrum. Meth. A* 872 (2017) 119.
17. V.M. Pugatch. Position Sensitive Micro-Strip and Micro-Pixel Detectors. *Nauka ta Innovatsiyi* 8(2) (2012) 26.
18. V. Kraus et al. FITPix – fast interface for Timepix pixel detectors. *JINST* 6 (2011) C01079.
19. J. Šolc et al. Monte Carlo modelling of pixel clusters in Timepix detectors using the MCNP code. *Physica Medica* 101 (2022) 79.
20. V.M. Pugatch et al. Plasma technologies for manufacturing of micro-strip metal detectors of ionizing radiation. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Physics* 13(1) (2007) 173.
21. A. Lymanets (CBM Collaboration). The Silicon Tracking System of the CBM Experiment at FAIR. *Ukr. J. Phys.* 64(7) (2019) 607.
22. *Alibava Systems. Instruments for Detection*.
23. V. Pugatch et al. Submicron position-sensitive detector. *Nucl. Instrum. Meth. B* 70(1-4) (1992) 574.

**M. V. Pugach*, V. M. Dobishuk, V. O. Kyva, O. S. Kovalchuk,
V. M. Pugatch, M. A. Teklishyn, S. B. Chernyshenko**

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

*Corresponding author: mvpugach@gmail.com

**QUALITY ASSESSMENT SYSTEM
FOR MONOLITHIC ACTIVE MICROPIXEL DETECTORS**

A system for quality assessment of micropixel detectors is presented. The system includes a laser scanning microprobe and a setup for studying the response of micro detectors to minimum ionizing particles. The results of the validation of the developed system indicate its suitability for assessing the quality of the latest monolithic active pixel sensors (MAPS), promising elements of large-area tracking systems for future high-energy physics experiments. Comparison of MAPS with the double-sided microstrip detectors of the CBM experiment (FAIR, Darmstadt) indicates the feasibility of the upgrade of its Silicon Tracking System using MAPS.

Keywords: monolithic active micropixel detectors, hybrid micropixel detectors, double-sided microstrip detectors, microdetector quality assessment, CBM experiment.

Надійшла/Received 29.12.2022