

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Ковальчук Олексій Сергійович

УДК:539.1.073:539.1.074:621.3.049.7

**МЕТАЛЕВІ МІКРОДЕТЕКТОРИ
ПОТОКІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЕННЯ**

01.04.16 – Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України, м. Київ

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Пугач Валерій Михайлович,
завідувач відділу фізики високих енергій
Інституту ядерних досліджень НАН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Борщов В'ячеслав Миколайович,
перший заступник директора, головний конструктор
ООО «Світлодіодні технології України»

доктор фізико-математичних наук, доцент
Аушев Володимир Єгорович,
доцент кафедри ядерної фізики Київського
національного університет імені Тараса Шевченка

Захист відбудеться **18 квітня 2019 р. о 14:45** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03680, м. Київ, пр. Науки 47.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03680, м.Київ, пр. Науки 47.

Автореферат розісланий **14 березня 2019 р.**

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.167.01
кандидат фізико-математичних наук

 Хоменков В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Діагностика пучка є важливою складовою будь-якого прискорювача. В сучасних експериментах у фізиці високих енергій потоки частинок досягають надзвичайно великих значень. Збільшення інтенсивностей та енергій призводить до збільшення радіаційних навантажень на детекторні системи. Як відомо кремнієві, сцинтиляційні та інші детекторні системи, що використовуються у більшості експериментів мають обмежену радіаційну стійкість, а при надто великих радіаційних потоках втрачають свої робочі характеристики. Крім того, головною вимогою проведення фізичних дослідів, є те що, вимірювальний прилад не повинен спотворювати вимірювальну величину. На сьогоднішній день більшість детекторних систем не відповідають цьому твердженню. При цьому вимоги до детекторних систем щодо прецизійності вимірювань лише збільшуються. Таким чином, можна сформулювати. Розробки детекторів для моніторингу потоків іонізуючого випромінювання ведуться у різних напрямках. Одним з напрямків є розвиток детекторів, основаних на явищі вторинної електронної емісії. Особливості ВЕЕ дозволяють створювати конструкційно прості надійні детекторні системи для моніторингу потоків заряджених частинок та рентгенівського випромінювання. До такого типу детекторів відносяться металеві мікро-детектори представлені у даній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана у відділі фізики високих енергій Інституту ядерних досліджень НАН України як складова частина наукових тем, в яких автор був відповідальним виконавцем:

- НДР “Розробка металевих мікро-стріпових детекторів для мас-спектрометрів” 2007-2009 (ДР № 0107U005372)
- CNCP project No. P396 "Microstrip Metal Detectors" (2010-2011)
- НДР “Розробка позиційно-чутливих мікро-детекторів для дослідження за допомогою дифракції рентгенівських променів швидкоплинних процесів” 2013 (ДР № 0112U003153)
- НДР “Широкодіапазонна мікро-детекторна система для установки швидкісного рентгенографування 2014-2015 (ДР № 0114U004685)
- ДФФД НАНУ грантові програми F69/53-2015, F69/49-2016, CO-4-1-2015, CO-1-7-2017

Роботи частково виконувались в рамках діяльності Асоційованої міжнародної лабораторії у галузі фізики високих енергій “Розробка детекторних систем для експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів” (LIA IDEATE)

Мета і задачі дослідження. Метою даних досліджень було створення нових радіаційно стійких детекторних систем для вимірювання положення і профілю пучків заряджених частинок та синхротронного випромінювання

Задачами дослідження були:

- розробити дизайн та побудувати детекторні системи на базі металевих мікродетекторів для широкого спектру застосування.
- вимірювання потоків іонізуючого випромінювання та визначення їх параметрів.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні задачі:

- Дослідити принцип роботи металевих мікродетекторів;
- Розробити детекторні системи, які відповідають поставленим вимогам.
- провести дослідження детекторів на різних прискорювачах

Об'єкт дослідження – металеві мікродетектори

Предмет дослідження – чутливість металевих мікро-детекторів до потоків синхротронного випромінювання та заряджених частинок в широкому діапазоні енергій та інтенсивностей

Методи дослідження – реконструкція профілю та положення пучків синхротронного випромінювання та заряджених частинок з даних, отриманих металевими мікро-детекторами

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше створені детектори іонізуючого випромінювання товщиною 1 мікромметр з надзвичайно високою радіаційною стійкістю. Розроблені вимірювальні системи на їх основі для вимірювання просторового розподілу потоків заряджених частинок та синхротронного випромінювання, зокрема для визначення положення і профілю пучків таких частинок на прискорювачах або синхротронах. Проведені випробування детекторних систем на прискорювачах заряджених частинок та синхротронного випромінювання. Експериментально доведено можливість спостереження в онлайн режимі профіля пучка протонів, масових розподілів важких іонів для цілей мас-спектрометрії, високо-інтенсивних потоків синхротронного випромінювання та іонних пучків для цілей фракціонованої радіаційної терапії:

- продемонстрована можливість вимірювання масових розподілів низько енергетичних іонів в фокальній площині лазерного мас-спектрометра (ІПФ НАН України, м. Суми).
- в режимі реального часу вперше виміряні просторові розподіли високо-інтенсивних потоків синхротронного випромінювання в міні- та мікро-пучках на біо-медичній лінії ID-17 (ESRF, Grenoble).
- в режимі реального часу вперше виміряні просторові розподіли високо-енергетичних потоків пучків протонів, іонів вуглецю та кисню для цілей просторово фракціонованої адронної терапії (НІТ, Heidelberg).
- вперше застосовано металеві мікро-стріпові та мікро-піксельні детектори для дослідження методом швидкісної рентгенографії фазових переходів в металах при їх нагріванні/охолодженні (ІПМ НАН України, м. Київ).

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені детекторні системи можуть використовуватись для вимірювання положення і профілю пучків синхротронного випромінювання та заряджених частинок. Детектори можуть

використовуватися у мас-спектрометрії (електронна фокальна площина), дослідженні характеристичних спектрів рентгенівського випромінювання, у якості профілометрів на прискорювачах, для моніторингу розподілу дозових навантажень в радіаційній терапії та інших галузях, де використовуються потоки іонізуючого випромінювання.

Особистий внесок здобувача. Автор брав участь в розробці та виготовленні всіх детекторних систем, представлених у роботі. Автор приймав участь у всіх експериментах, на основі яких були отримані результати дисертації. Публікації в співавторстві написані при особистій участі дисертанта.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на конференціях:

- Міжнародний Симпозіум «Резонансні явища в атомних системах», Ужгород (2007),
- Конференція по фізиці високих енергій, ядерній фізиці і прискорювачах. Харків (2009);
- Міжнародний симпозіум «The EURISOL Town Meeting», Pisa, Italy. (2009, 2011)
- Международная школа Молодых ученых по ядерной физике и энергетике, Алушта, Украина (2009, 2011)
- Міжнародний симпозіум «EURORIB 2010», Lamoura, France (2010)
- Міжнародна конференція «Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy», Kyiv, Ukraine (2010, 2012)
- Астрономічна школа молодих вчених, Чернігів, Україна (2011)
- French-Ukrainian Workshop on the instrumentation developments for HEP, LAL - Orsay, France (2015, 2016, 2017, 2018)
- Щорічні Наукові конференції ІЯД НАН України (2006-2018).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 35 робіт, в тому числі, основних: 11 робіт у реферованих наукових виданнях та 1 патент України. Перелік публікацій наведений в кінці автореферату.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 55 найменувань та додатку. Дисертація викладена на 139 сторінках друкованого тексту, включаючи 75 малюнки і 1 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми досліджень, сформульована мета досліджень, розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відображено особистий внесок здобувача, представлено апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** наводиться огляд літератури, в якому розглянуті теоретичні основи явища вторинної електронної емісії, формулюється визначення металевих мікро-детекторів, їх основні характеристики та принцип роботи, а також наведено розрахунки граничних умов застосування таких детекторів.

Добре відомо, що при бомбардуванні тонкої металевої фольги потоками заряджених частинок чи електромагнітного випромінювання з обох її поверхонь відбувається Вторинна Електронна Емісія (ВЕЕ). Вимірювання утворюваного при цьому позитивного заряду в ізольованому сенсорі покладено в основу принципу дії металевих мікро-детекторів, розроблених в рамках даної дисертації.

Процеси, що викликають вторинну емісію мають різну природу (іонізація, фононне збудження, пряме вибивання тощо). Вторинні електрони мають енергії від декількох електрон-вольт до енергій рівних енергії налітаючої частинки (δ -електрони). Основний внесок у енергетичний спектр вторинних електронів дають електрони з енергіями в декілька електрон-вольт (від 1 до 5 eV). Емісія відбувається з обох сторін бомбардованої металевої фольги з її при поверхневих шарів товщиною біля 50 нм. Основною характеристикою ВЕЕ є коефіцієнт ВЕЕ:

$$\delta = \frac{N_{SEE}}{N_0}, \quad (1)$$

де N_{SEE} - кількість вторинних електронів, N_0 - кількість налітаючих частинок.

В основі принципу роботи ММД лежить вторинна електронна емісія (ВЕЕ). Пучок заряджених частинок або фотонів, проходячи крізь стріп, викликає ВЕЕ, утворюючи, тим самим, додатній заряд, який інтегрується високочутливим зарядовим інтегратором (ВЗІ), що з'єднаний зі стріпом. В явищі ВЕЕ головну роль відіграє тонкий приповерхній шар металу завтовшки 10 - 50 нм, що дає можливість створювати надтонкі детектори з мінімальною масою детектуючого матеріалу. Оскільки як вже було зазначено вище основну частку вторинних електронів складають електрони з енергією в декілька eV, то прикладаючи порівняно невелику напругу (десятки вольт), можливо збирати практично всі вторинні електрони, що емітуються сенсором. Знаючи коефіцієнт ВЕЕ для різних частинок ми можемо визначити їх потік через одиницю площі у одиницю часу.

На Рис.1 наведена схема побудови ММД. Сенсор з обох боків оточений електродами, до яких підводиться позитивна напруга, що дає змогу збирати емітовані з сенсора електрони. Також досить важливим компонентом є дві зовнішні заземлені фольги, що забезпечують захист всієї системи від електричних шумів та наводок.

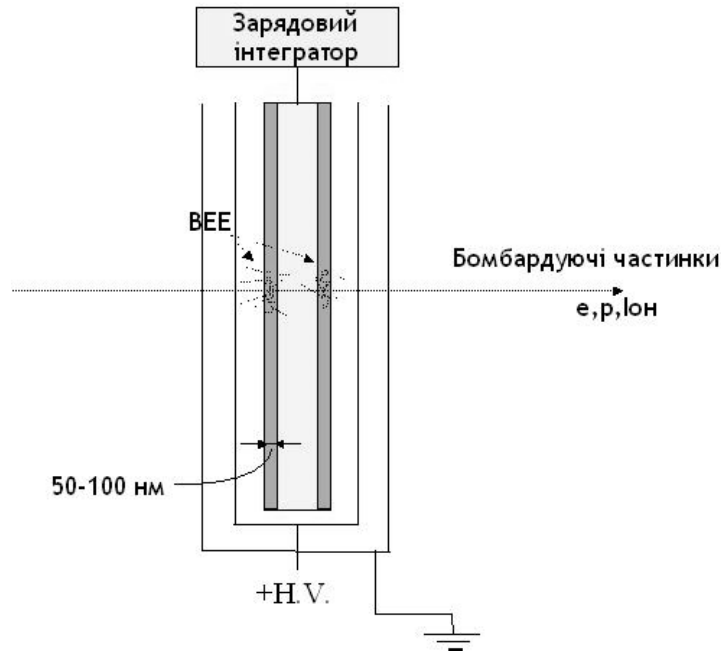


Рис.1 Принципова схема роботи металевого мікро-детектора

Динамічний діапазон інтенсивності пучків, що можуть бути зареєстровані за допомогою ММД, є важливою характеристикою детектора. Нижня межа визначається шумами та наводками на входні каскади зарядових інтеграторів і становить величину біля $5 \cdot 10^4$ заряджених частинок (фотонів) на сенсор за 1 секунду. Верхня межа інтенсивності визначається розігрівом матеріалу стріпа до температур, коли термоелектронна емісія починає спотворювати корисний сигнал від вторинної електронної емісії.

Розглянемо задачу, в якій стріп періодично нагрівається пучком. Охолодження між імпульсами відбувається переважно шляхом теплопередачі та випромінювання чорного тіла, тому можна записати диференціальне рівняння, що описує процес охолодження і включає два члени:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T - \frac{\sigma (T^4 - T_{ambient}^4)}{C \rho V} \varepsilon S_{surf}, \quad (2)$$

де T – температура, t – час, ε – випромінювальна здатність ($\varepsilon = 0.1$), S_{surf} – площа передньої та задньої поверхонь стріпа ($S_{surf} = 2 \cdot 0.16 \text{ мм}^2$), ρ – густина нікелю ($\rho = 8.9 \text{ г/см}^3$), C – теплопровідність нікелю ($C = 443 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$), $\sigma = 5,76 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – стала Стефана-Больцмана, V – об'єм частини стріпа, що піддається опроміненню.

$$\alpha = \frac{k}{C \rho}, \text{ де } k \text{ – теплопровідність } (k = 0.899 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})$$

Теплопровідність відіграє важливе значення для всіх металевих плівок, окрім найтонших. Оскільки товщина стріпів біля 1 мкм, ми розглядаємо наближення, в якому першим членом у правій частині (2) можна знехтувати. Тоді залежність температури від часу після нагрівання буде описуватися наступною формулою:

$$T(t) = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{1}{T_0^3} + \frac{3\sigma\epsilon A_{surf}}{C\rho V}t}}, \quad (3)$$

Охолодження відбувається від температури T_0 до деякої T .

Кількісний аналіз цієї формули показує, що при таких малих приростах температури охолодження практично не відбувається, тому за приблизно 150000 банчів, що потрапляють на стріп за один цикл опромінення стріп змінить температуру на 470°C (або 490°C з урахуванням температури оточуючого середовища 20°C). Максимально допустима густина потоку синхротронного випромінювання становить $10^{16} \text{ c}^{-1}\text{mm}^{-2}$.

Проведено розрахунки теплового нагрівання ММД протонним пучком. У протонному пучку з енергією 200 ГеВ при 10^8 частинок на банч температура не перевищить 500°C при частоті потрапляння банчів у 40 МГц. При більшій інтенсивності робота ММД можлива за умови меншої частоти банчів чи роботі на відстані 1 мм від центру ваги пучка.

Другий розділ дисертації присвячений процесу виготовлення ММД, який включає надсучасні технології, розроблені для виробництва мікро та нано-електроніки: мікро-фотолітографія та плазмово-хімічне травлення.

В першому підрозділі наводиться процедура фотолітографії кремнієвих пластин. Перший крок створення кристалів ММД – це підготовка до фотолітографії. Пластину з чистого кремнію діаметром 10 см і товщиною 460 мкм розміщують в однозонній дифузійній пічці, де проводиться термічне окислення, внаслідок чого на поверхні пластини утворюється шар оксиду кремнію SiO_2 , завтовшки 50 - 100 нм. Далі створюється ще один діелектричний прошарок з нітриду кремнію Si_3N_4 завтовшки 200 нм. Потім проводиться металізація для формування суцільної металеві плівки товщиною 1-2 мкм. Другий крок – власне сама фотолітографія. На поверхню отриманої структури з одного боку наноситься тонка плівка фоторезисту, який потім експонується крізь фотошаблон лицьової сторони. Після експозиції пластину проявляють: при позитивному фоторезисті ті ділянки, що були засвічені, внаслідок фотохімічних реакцій переходять у майже нерозчинну фазу й зберігаються при проявленні, інші ж ділянки – змиваються розчинником. Далі проводиться травлення незахищених фоторезистом ділянок металізації до підшару нітриду кремнію, внаслідок чого й утворюється "мікро-стріпова" структура.

В другому підрозділі описано технологію плазмохімічного травлення. Сутність плазмохімічного травлення (ПХТ) кремнію, чи так званого іонно-стимульованого травлення, полягає в фізичному розпиленні поверхні твердого тіла внаслідок бомбардування його іонами, наприклад аргонем з енергією 500-1000 еВ. Або, при травленні кремнію галогенами (F^* , Cl^* , Br^* , I^*), внаслідок гетерогенної реакції типу газ – тверде тіло. Видалення відбувається за рахунок хімічної реакції, що проходить по узагальненій формулі:



Тетрафторид кремнію є газом й спонтанно залишає поверхню оброблюваного матеріалу. В цьому випадку плазма є лише засобом отримання радикалів фтору із

молекул більш стійких газів. Для того, щоб травлення проходило тільки в робочій зоні, а не по всій поверхні, на кристал накладається маска з нержавіючої сталі.

В рамках даної роботи були успішно виготовлені сенсори ММД із кількістю стріпів від 16 до 1024 із кроком стріпів від 30 до 200 мікрон.

На рис. 2 представлені фото двох виготовлених сенсорів ММД. Зліва зображено сенсор ММД64: 64-стріповий металевий мікро-стріповий сенсор для визначення положення та профілю мікро-пучків. Справа зображено сенсор ММД32v: 32 стріпа зі змінним кроком (від 2 до 300 мікрон в групах по 4 стріпи) для фокусування мікро-пучків.

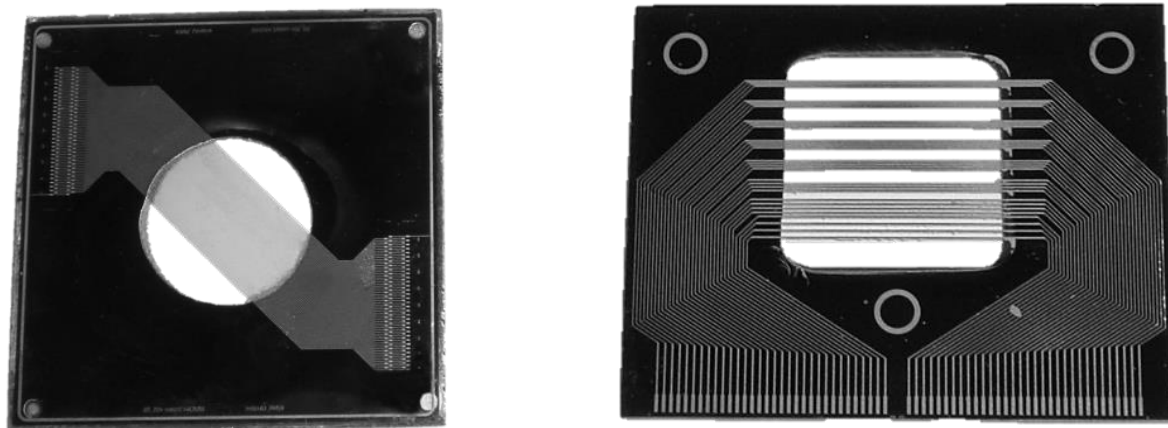


Рис. 2 Фото виготовлених сенсорів ММД (ММД64 зліва, ММД32v зі змінним кроком – справа)

В третьому підрозділі наводиться приклад монтажу ММД.

Сенсорний кристал (Рис. 3) монтується на РСВ чи керамічній пластині з металізацією для з'єднання стріпів з контактами роз'єма, який також монтується на пластині чи з'єднується з нею за допомогою гнучкого кабеля-шлейфа. З обох сторін пластини з сенсором кріпляться польові кристали – ММД кристали з спеціальною геометрією стріпів для збору вторинних електронів. Ця конструкція монтується в захисний металевий корпус. За таким принципом реалізується описана вище 5-шарова структура ММД (Рис.1).

На рис. 4 представлена фотографія одного з детекторних модулів, виготовлених в рамках даної роботи.

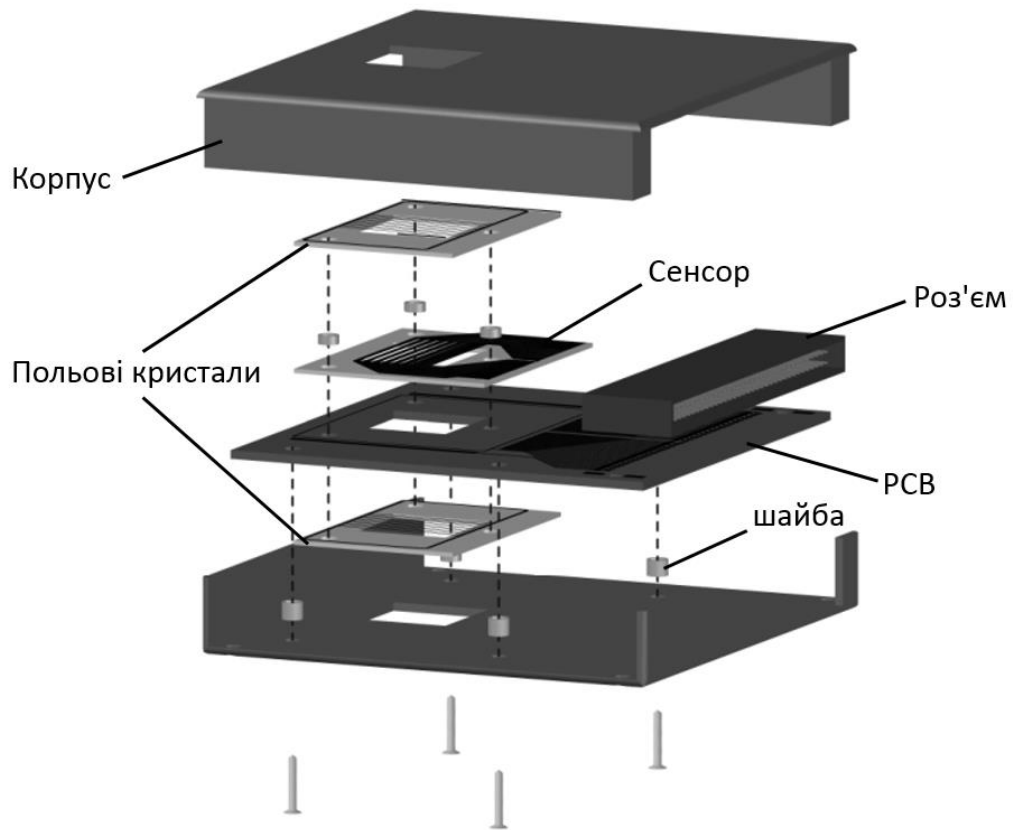


Рис. 3 Складальне креслення детекторного модуля на базі MMD32v

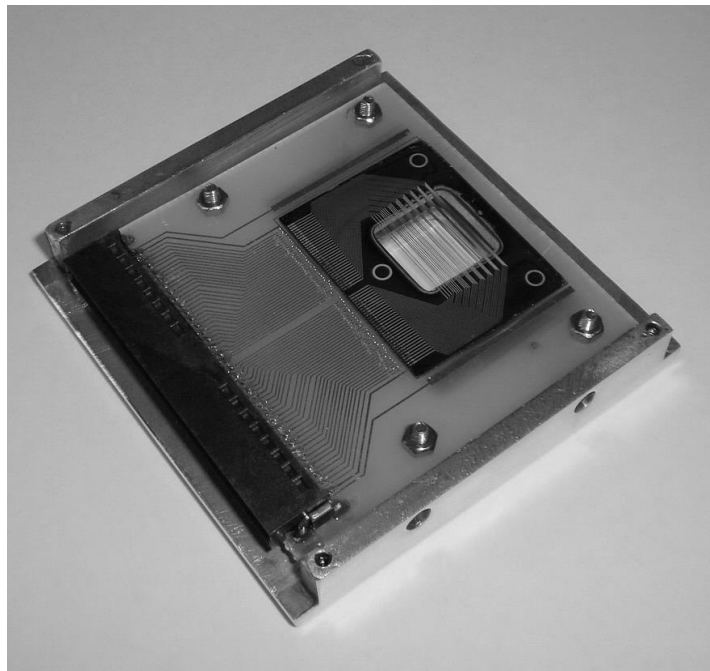


Рис. 4 Фото детекторного модуля на етапі зборки.

Третій розділ присвячений вимірювальній електроніці. Система зчитування ММД повинна мати високу чутливість, радіаційну стійкість та інші характеристики,

які визначають можливості ММД та їх використання для фізики високих енергій. Простота роботи ММД дозволяє застосовувати широке коло зарядово-чутливих систем збору та обробки даних, що значно розширює функціональність ММД (мультиканальність, модульність). Представлені комерційно-доступні системи зчитування даних, які планується застосовувати з описаними у 2 розділі металевими мікро-стріповими сенсорами. В першому підрозділі описується система зчитування на основі високочутливого зарядового інтегратора розробленого в ІЯД НАНУ сумісно з MPIfK (м. Хайдельберг). Принцип дії зарядового інтегратора полягає у перетворенні вхідного заряду у послідовність вихідних імпульсів, частота котрих пропорційна вхідному струму. Система має високу чутливість (від кількох фемто-ампер) та широкий динамічний діапазон (6 порядків).

В другому підрозділі описується мікрочип VA_SCM3 компанії IDEAS (Осло, Норвегія). VA_SCM3128-канальний зарядовочутливий підсилювач з мультиплексуванням сигналу VA_SCM3.VA_SCM3 виконує роль попереднього підсилювача та мультиплексора. VA_SCM3 складається з 128 однакових паралельних інтегруючих підсилювачів струму. Підсилювачі мають ємнісний обернений зв'язок (змінної величини), який відповідає за підсилення вхідного струму. Вихід усіх підсилювачів з'єднаний з подвійним блоком вибірки та збереження (В/З), який дозволяє одночасно по всіх каналах зберігати данні у одну з В/З та зчитувати дані з іншої В/З. Таким чином досягається майже неперервне інтегрування вхідного сигналу без мертвого часу. Дані всіх каналів змішуються за допомогою мультиплексора та передаються до системи зчитування, відповідно до заданих параметрів.

В третьому підрозділі наведено основні характеристики мікрочипу TimePix, розробленого колаборацією MEDIPIX (ЦЕРН). Чіп TimePix [28] (удосконалений MEDIPIX-2) складається з 256×256 ідентичних елементів (пікселей), створених за промисловою технологією CMOS (6 шарів металу товщиною 0.25 мкм). Для нього характерний низький рівень шумів (~ 100 e- rms). Детектор Timepix може вимірювати енергію або час прильоту частинки кожним пікселем окремо (~ 65000 детекторних каналів). Цей пристрій є потужним інструментом для зображення радіаційних потоків та трекінгу іонізуючих частинок. Для зчитування даних ММД планується використання Timepix без чутливого шару (напівпровідникового детектору). Розроблено спеціальний дизайн ММД з 766 стріпами, кроком стріпів 55 мкм та шириною стріпів 30 мкм. Особлива геометрія стріпів дозволяє пряме підключення сенсору до зчитувального чіпу Timepix, задіявши максимальну кількість доступних вхідних каналів зчитування.

В четвертому підрозділі описана система зчитування XDAS (Sense-Tech, Великобританія). XDAS представляє собою модульну систему для широкого кола застосувань, пов'язаних зі скануванням рентгенівського випромінювання. Вона дозволяє створювати великі детекторні масиви, які одночасно зчитуються у доступному цифровому форматі. Система має низький електронний шум, динамічний діапазон по максимальному заряду на вході від 3 pC до 60 pC. Мінімальний час інтегрування сигналу становить 60 μ s при одночасному накопиченні даних та їх зчитування. Динамічний діапазон по вихідним сигналам становить 16 біт. Сполучення входів зчитувальної системи із мікροстріповими

сенсорами здійснюється за допомогою спеціально розроблених та виготовлених мікрокабелів-адаптерів. Сполучення із керуючим комп'ютером через порт USB 2.0.

У **Четвертому розділі** дисертації представлені дослідження по застосуванню ММД для вимірювання профілю пучків, для вимірювання розподілу дози опромінення для цілей фракціонованої радіаційної терапії, для реєстрації розподілів по масам ізотопів у мас-спектрометрі, для реєстрації дифракційних максимумів розсіяних зразком рентгенівських квантів для цілей швидкісного рентгеноструктурного аналізу металів та сплавів.

У першому підрозділі представлені результати характеристичних вимірювань ММД на пучках заряджених частинок та синхротронного випромінювання на прискорювачах DESY (Гамбург) та на тандем-генераторі ІЯД НАН України. Експериментальні вимірювання профілю пучка синхротронного випромінювання проводилися на першій лінії HASYLAB 6, яка отримує СВ з ондулятора, встановленого на кільцевому прискорювачі PETRA II в дослідницькому центрі DESY. Метою експерименту було встановити працездатність пристрою й отримати інформацію про профіль пучка СВ. Для цього провели ряд вимірювань з різними положеннями щілин, які відкривали тільки частину або увесь пучок, а також вимірювання в яких щілина поступово відкривала пучок. Параметри встановленого зразка ММД були слідуєчі: товщина стріпів 1,5 мкм; ширина 40 мкм; крок 70 мкм. Загальний профіль пучка синхротронного випромінювання, виміряний ММД представлений на Рис. 5. Було проведено багато вимірів з аналогічними результатами. Висновок, який можна зробити з усіх вимірювань, такий: ММД придатний для спостереження за профілем пучка синхротронного випромінювання в реальному часі. Але, як виявилось, при вимірюваннях у повітрі до 35% сигналу детектора обумовлені іонізацією повітря та розсіянням випромінювання в ньому. Виміряний ефективний конверсійний коефіцієнт (відношення кількості падаючих фотонів до вибитих електронів) у повітрі дорівнює 2,02 фотона на 1 електрон. Виміряна величина міжстріпових наводок не перевищує 0,2% від сигналу.

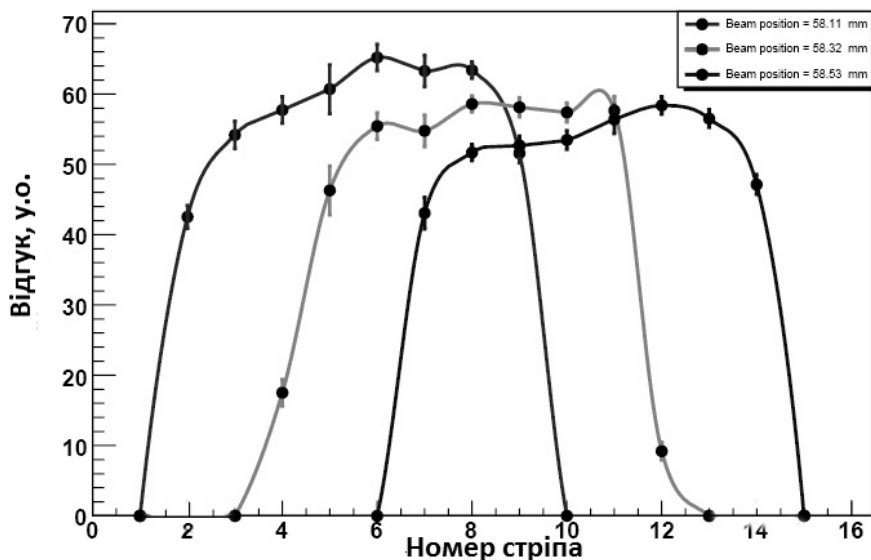


Рис. 5 Профілі пучка синхротронного випромінювання при різних положеннях щілин над стріпами детектора

Характеристичні дослідження роботи ММД на протонному пучку були виконані на тандем-генераторі ІЯД НАН України у вакуумній камері на центральному іонопроводі протонного зала.

Для цих досліджень було підготовлено детектор з двома мікстріповими металевими сенсорами ММД64, спеціально розробленими для двовимірного вимірювання профіля пучка заряджених частинок. Сенсори було змонтовано у алюмінієвий корпус з конектором D-Sub на 25 контактів. З кожного сенсору було підключено по 12 стріпів.

На Рис. 6 представлено результати виміру профілю пучка протонів із енергією 2.65 MeV, одержані з використанням системи X-DAS та ММД-64. Півширина розподілу по осі X (графік зліва) та Y (графік справа) становить біля – 600 мікрон, що узгоджується із очікуваним розподілом інтенсивності протонного пучка, сформованого коліматором із отвором в діафрагмах біля 1 мм.

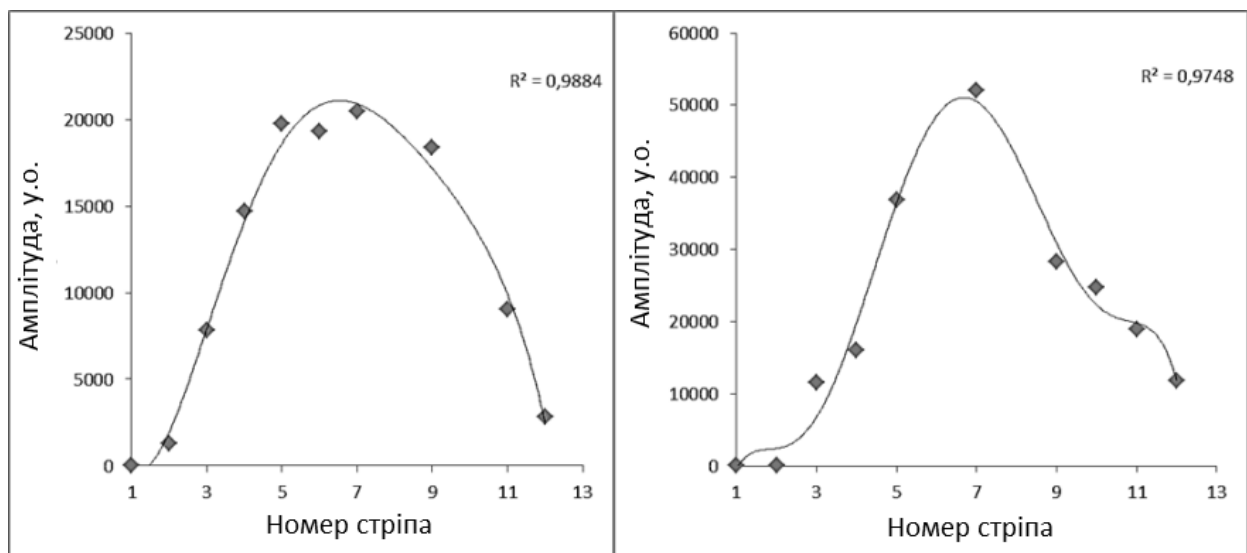


Рис. 6. Профіль пучка протонів з енергією 2.65 MeV у двох взаємно-перпендикулярних напрямках.

У другому підрозділі представлені результати досліджень ММД в мас-спектрометрії. Основні дослідження ММД виконувались на мас-спектрометрі МС3103 у відділі лазерної мас-спектрометрії ІПФ (м. Суми). ММД було встановлено у вакуумній камері на рухомій каретці у фокальній площині мас-спектрометра. Відгук зарядових інтеграторів було відкалібровано стабільними джерелами струмів - 1 Гц/1 фА. Флуктуації відгуку при вимкненому лазерному джерелі становили кілька Гц, в той час, як при ввімкненні лазера вони зростали більш ніж на порядок. Були виміряні масові розподіли ізоотопів олова (Рис. 7), одержуваних при бомбардуванні стандартної калібрувальної мішені із природного олова.

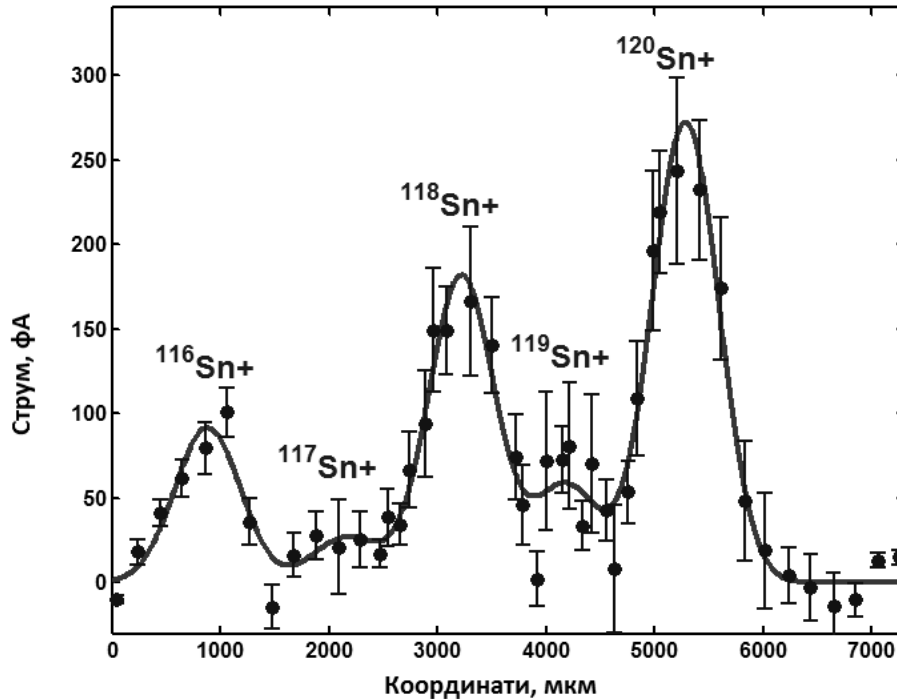


Рис. 7. Спектр ізотопів олова, виміряний ММД на лазерному мас-спектрометрі ІФ НАН України (м. Суми).

Досліджені характеристики прототипів ММД дозволили встановити відповідність спостережуваних розподілів по масам ізотопів олова за допомогою ММД та традиційних вторинних електронних помножувачів. Дослідження відгуку ММД показали, що його середнє значення знаходиться в межах 1.2 – 1.5 електрон/іон в залежності від прискорювальної напруги в ММД.

Після успішного застосування мікροстріпових металевих детекторів у фокальній площині лазерного мас-спектрометра було запропоновано та здійснено випробування для цієї ж мети мікропксельних детекторів. Було вперше використано металевий режим роботи мікропксельного детектора, модифікованого відповідно до принципів функціонування металевих детекторів. Ціллю цих досліджень було протестувати можливість реєстрації іонів малої енергії прямо на металевому електроді окремого пікселя детектора TimePix. Це дозволить виключити напівпровідниковий мікропксельний детектор з ланцюга реєстрації з явними перевагами, щодо роботи мас-спектрометра. Металевий детектор TimePix має вищу радіаційну стійкість, а також нижчу загрозу накопичення заряду з наступним виведенням детектора з ладу. Дизайн та виготовлення необхідних для цього елементів було виконано в ІЯД НАН України.

На Рис. 8 представлені двовимірні та спроектовані на вісь мас дані, виміряні металевим TimePix для 3-зарядних іонів Zr та Nb з різними масами. Енергія іонів — 21 кеВ. Таким чином, дослідження, проведені з TimePix, показали їх здатність до використання для реєстрації іонів малої енергії (3 — 20 кеВ) у фокальній площині мас-спектрометра з перевагами пристроїв реального часу. Двовірні зображення, що отримуються за допомогою TimePix можуть використовуватись для налагодження

мас-спектрометрів (або схожих пристроїв, наприклад електронних мікроскопів) у режимі «on-line».

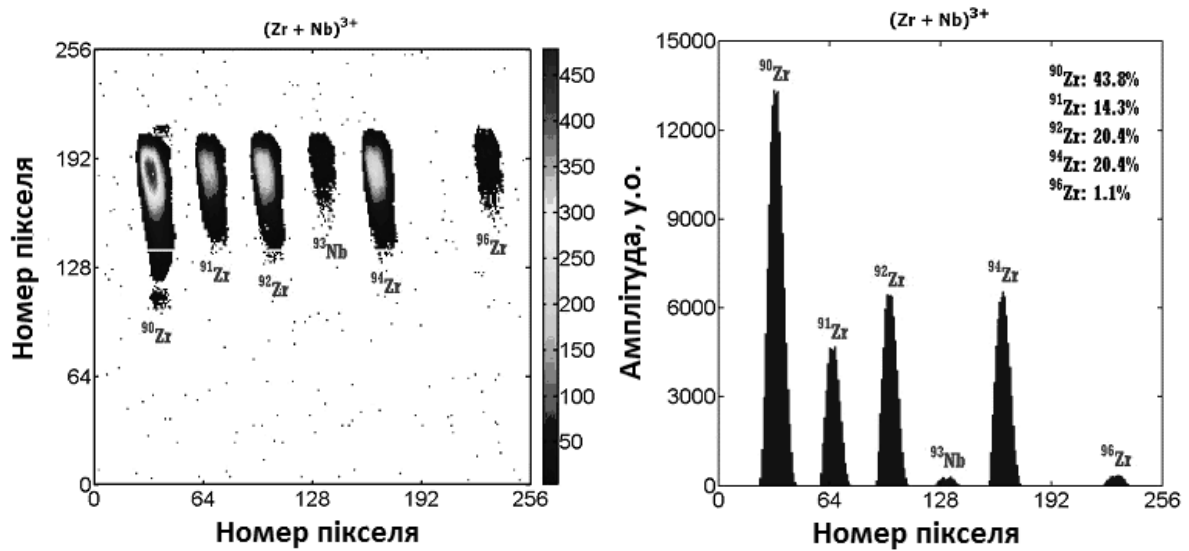


Рис. 8. Двовимірні розподіли іонів Zr та Nb, виміряні TimePix у металевій моді.

В четвертому підрозділі наведено результати досліджень динаміки фазових переходів в металах. Для формування властивостей конструкційних матеріалів за сучасними технологіями необхідно знати кінетику швидкоплинних фазово-структурних перетворень, які відбуваються за короткий час. Актуальною є розробка методів швидкісного рентгеноструктурного дослідження таких процесів у реальному часі. Ціллю роботи була розробка позиційно чутливого мікро-детектора рентгенівського випромінювання як елемента експериментальних методик для дослідження швидкоплинних процесів з динаміки фазових переходів в металах та їх сполуках при нагріванні/охолодженні або стискуванні/розтягу. Нагрівання зразка зі швидкістю нагріву $V_{\text{нагр}} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ здійснювалося пропусканням через нього електричного струму, охолодження здійснювалося у вакуумі зі швидкістю $V_{\text{ох}} \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ у діапазоні температур від 20 до 1500 градусів Цельсія. Розроблено дизайн прототипу широкодіапазонної системи на основі ММД та системи зчитування X-DAS (крок стріпів - 120 мкм, кількість стріпів - 128), а також відповідних мікрокабельних адаптерів та плат із зчитувальною мікро-електронікою. На час виготовлення відповідних ММД було прийнято рішення використати наявні мікροстріпові кремнієві детектори. Система була змонтована та протестована на установці швидкісного рентгеноструктурного аналізу ІПМ НАН України. Досліджено фазові переходи кількох зразків при нагріванні до високих температур, вимірюючи зміну положення дифракційних піків в кутовому розподілі рентгенівських квантів, розсіяних на досліджуваному зразку. Детекторна система була встановлена у фокальній площині рентгенівської установки в області малих кутів для спостереження основного піку характеристичного випромінювання зразка заліза. Однією з найважливіших характеристик при дослідженні швидкоплинних процесів у металах є зміна положення дифракційних максимумів характеристичного випромінювання зразка. Спеціально розроблене програмне забезпечення дозволяє графічно представити зміну положення дифракційного максимуму та проводити подальший аналіз динаміки фазових переходів у досліджуваних зразках (Рис. 9).

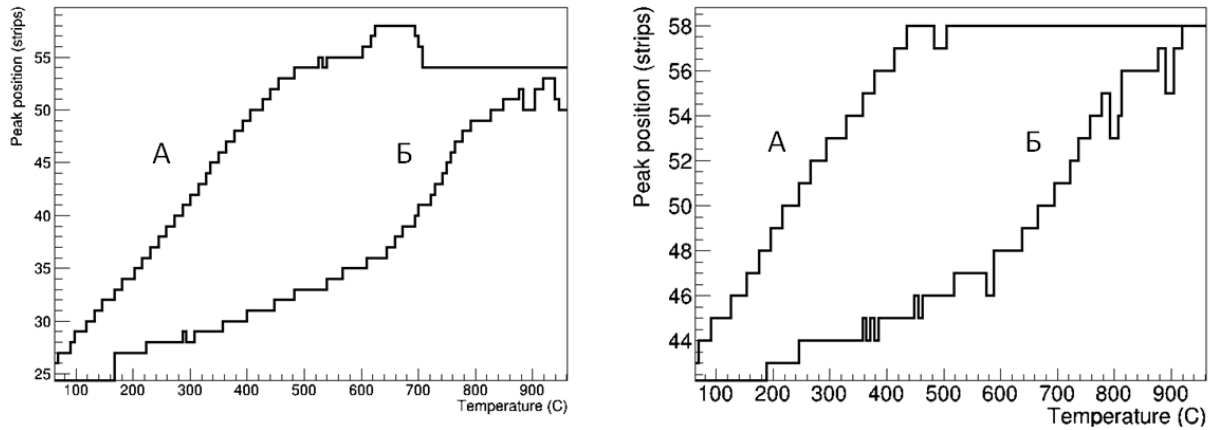


Рис. 9 Зміна положення дифракційного піку в залежності від температури зразка заліза. Зліва – лінія 2-1-1, справа - лінія 2-0-0. А – процес нагрівання зразка, Б – охолодження зразка.

Підсумовуючи дослідження створеної 256-канальної мікродетекторної системи, можна зробити висновок про високу ефективність роботи системи у дослідженнях динаміки фазових переходів в металах при їх нагріванні або охолодженні в реальному часі. Розроблена мікро-детекторна система може бути використана для створення компактних рентгенівських дифрактометрів для дослідження в реальному часі швидкоплинних процесів та властивостей матеріалів з використанням дифракції рентгенівських променів на зразках, створюваних за сучасними мікро- та нанотехнологіями для промисловості та матеріалознавства.

У п'ятому підрозділі представлені дослідження ММД для медицини. В дослідженнях у дослідницькому центрі DESY була встановлена придатність металевих мікροстріпових детекторів для моніторингу потужних пучків синхротронного випромінення. Цей факт укупі з успішною реалізацією металеві моди функціонування мікропиксельного детектора TimePix (див. розділ 4.2) в режимі двохвимірною зображення кількох іонних пучків привели до ідеї його застосування в практиці фракціонованої радіаційної терапії, яка за біомедичним обґрунтуванням здійснюється за допомогою кількох міні- чи мікро-пучків синхротронного випромінення. Цей напрямок досліджень розвивається в останні роки на Європейському синхротроні (Гренобль, Франція) на біомедичній пучковій лінії ID17. Було виконано спільний експеримент MI-1056, "Microstrip Metal Detectors" (листопад 2010 р.) по дослідженню властивостей металевих мікροстріпових та мікропиксельних детекторів та їх придатності для цілей фракціонованої радіаційної терапії. Введення високих доз (кГрей/с) вимагає від цього виду терапії дуже точну дозиметрію та фіксацію положення пацієнта. Високі радіаційні навантаження виключають можливість використання в реальному часі традиційних напівпровідникових, сцинтиляційних чи іонізаційних детекторів. Практичне вимірювання розподілу дози зараз здійснюють за допомогою радіохромних плівок.

Ключовим параметром для успіху фракціонованої радіаційної терапії є співвідношення доз, в області максимального і мінімального опромінення, Peak-Valley-Dose-Ratio (PVDR). Виходячи з представлених вище критеріїв в експерименті MI-1056 (Гренобль), на пучках синхротронного випромінення, сформованого за

принципами міні- (MBRT) та мікро- (MRT) радіаційної терапії, виконано характеристизацію металевих мікростріпових та мікропксельних детекторів в якості елементів системи радіаційного моніторингу. Для оцінки якості функціонування металевих мікро-детекторів одержані за їх допомогою дані були порівняні з даними, одержаними з використанням радіохромних плівок (Gafchromic films).

Як видно з Рис. 10 дані виміряні двома засобами узгоджуються в цілому непогано між собою.

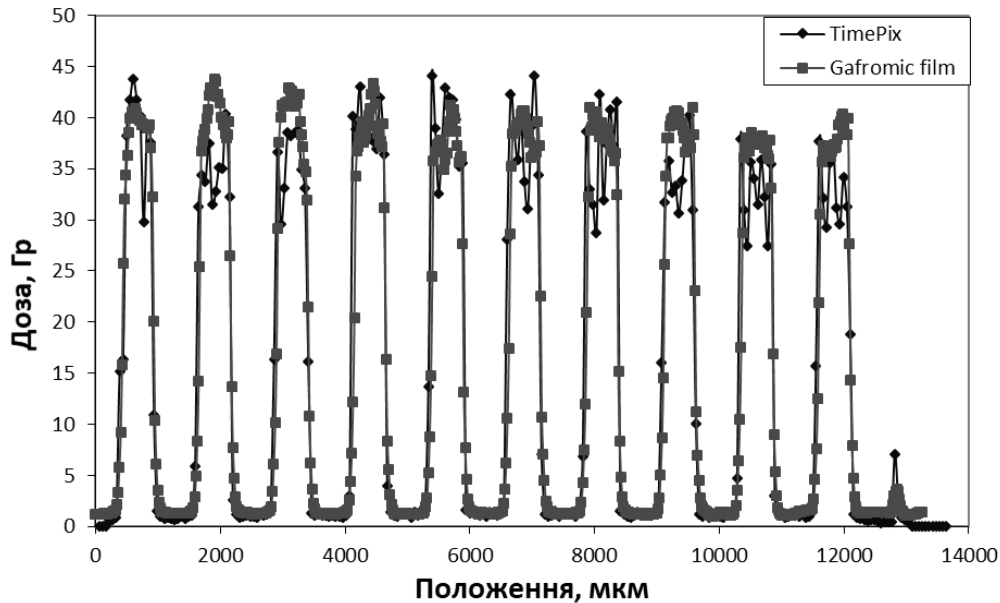


Рис. 10. Розподіл дози від 11 пучків синхротронного випромінювання виміряний за допомогою радіохромних плівок (прямокутники) та металевим мікро-пксельним детектором (ромби).

Застосування високо енергетичних (декілька сотень MeV на нуклон) пучків вижких іонів розглядається як перспективний напрям для підвищення терапевтичного ефекту за рахунок локалізації дози та високої біологічної ефективності в порівнянні з звичайною рентгенотерапією. Для тестування принципів формування багато-пучкових структур адронних пучків та детекторних систем для вимірювання просторового розподілу їх інтенсивності було виготовлено 2 типа коліматорів: щілинні та матричні. Експериментальні дослідження проводилися на тандем-генераторі ІЯД НАН України з пучками протонів низьких енергій. Детектори, встановлені на дистанційно рухомих платформах, розташовувались всередині реакційної камери діаметром 400 мм, в якій підтримувався вакуум до 10^{-4} мм рт. ст. Протони з енергією 3 MeV налітали на мішень з поліетилену (CH_2), два детектори розташовані під кутом 45° та на відстані 100 мм від мішені кожен. Проводились дослідження оптимальних умов для зображення розподілу інтенсивності протонів та інших продуктів ядерних реакцій, після проходження через коліматори. Ці умови задаються багатьма параметрами, серед яких основними є: величина напруги зміщення; кількість кадрів, що знімаються та час експозиції (різний для кремнієвого та металевих детекторів;

режим роботи (TimePix, Medipix, ToT); значення порогового рівня дискримінатора та інше. За допомогою зміни напруги на самому детекторі можна змінювати “роздільну здатність” по кластерам подій при режимі ToT (time of a threshold): чим вона менша, тим краща селекція типу частинок за розмірами та формою кластерів. Методом підбору під час експерименту було визначено, що напруга 5-10 В є найбільш оптимальною. Двовимірний та одновимірний розподіл інтенсивності протонів, розсіяних на мішені, виміряний металевим Timepix, зображено на рис. 11.

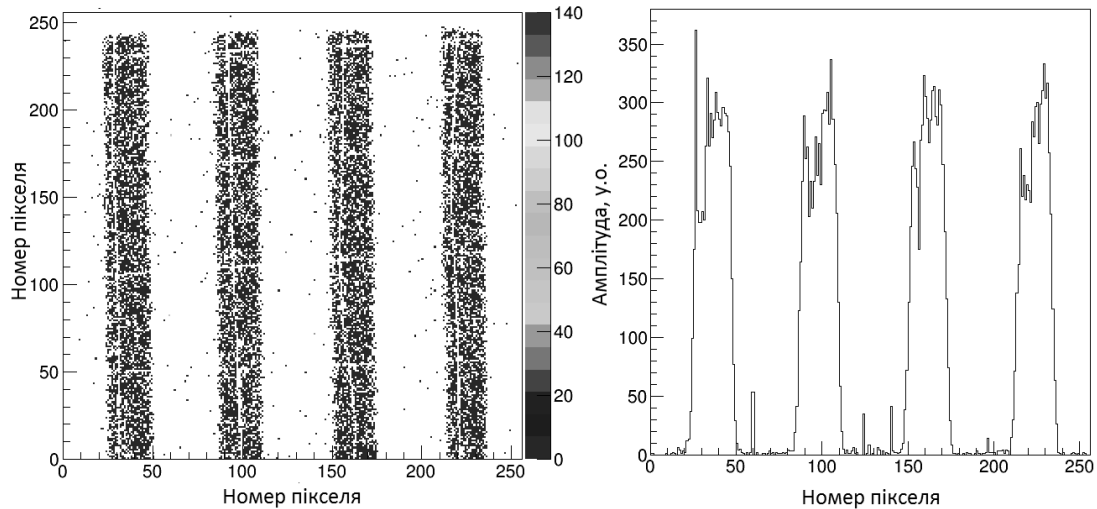


Рис. 11 Двовимірний (зліва) та одновимірний (справа) розподіл інтенсивності протонів виміряний металевим Timepix

Кількісну інформацію про розподіл інтенсивності можна одержати у вигляді проекції 2D розподілів на горизонтальну вісь. На рис. 11 ілюструється така процедура, яка необхідна в реальних умовах опромінення для розрахунку величини PVDR. На лівій частині зображено 2D розподіл: тут залежність інтенсивності від положення виділяється кольором; на правій частині рисунка представлено проекцію цього розподілу на горизонтальну вісь.

Добре видно вплив (зменшення інтенсивності) металевих дротів (100 мкм), розташованих над металевим детектором у формі сітки для збору вторинних електронів. На цю металеву сітку подається напруга 20 В для реалізації роботи ММД. Отримані результати показали прийнятне функціонування розроблених коліматорів, а також металевих та гібридних мікропиксельних детекторів для вимірювання та візуалізації в реальному часі розподілу інтенсивності протонів в міні-пучкових структурах.

Були також виготовлені коліматори для тестувань із високоенергетичними адронами (70–250 MeV/нуклон) в Хайдельберзькому іонно-терапевтичному центрі (НІТ, Heidelberg). Ці коліматори було виготовлено із латуні та алюмінію з товщиною достатньою для гальмування високоенергетичних іонів та з різною геометрією отворів та їх кроку. Дослідження проводилися на фіксованій горизонтальній станції терапевтичного центру Heidelberg Ion Therapy center (Німеччина) на пучках вуглецю та кисню. Використовувалися пучки іонів з енергією 80-250 MeV/іон та інтенсивністю $10^6 - 10^8$ іонів/с. Загальний профіль іонного пучка, а також його

часова структура вимірювалися за допомогою мікстріпового ММД з системою зчитування X-DAS, розподіл інтенсивності фракціонованого пучка вимірювався гібридним та металевим детекторами Тімеріх. Міні-пучкові структури, сформовані щілинними та матричними коліматорами були виміряні гібридним та металевим детекторами Тімеріх. Деякі результати цих досліджень представлено на рис. 12.

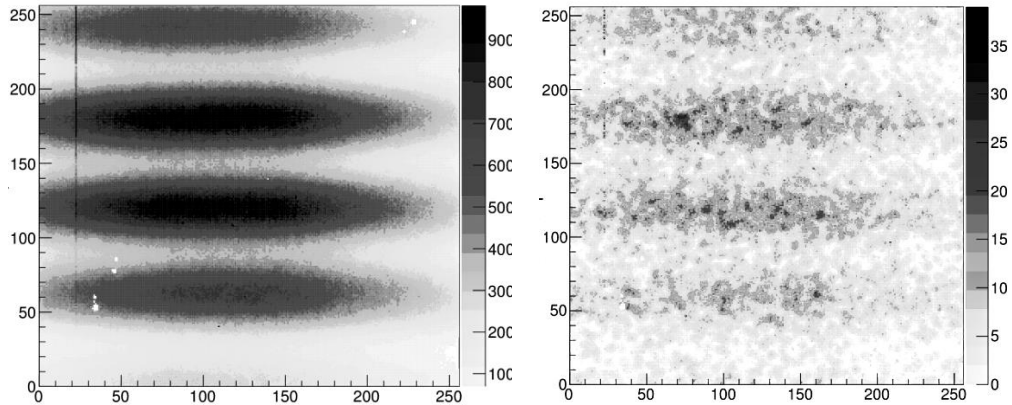


Рис. 12. 2D зображення міні-пучків іонів вуглецю, сформованих щілинним коліматором, виміряних гібридним (зліва) та металевим (справа) детекторами Тімеріх

Детектори показують гарне розлічення міні-пучків та підтверджують можливість застосування коліматорів різних типів для формування одновимірних та двовимірних багатопучкових структур за допомогою виготовлених коліматорів.

Детектори Тімеріх забезпечують вимірювання в режимі реального часу 2D розподілу інтенсивності адронних мініпучків, що утворюються в просторі за допомогою щілинних або матричних коліматорів.

ВИСНОВКИ

1. Фізично обґрунтована можливість створення металевих мікродетекторів для вимірювання потоків заряджених частинок та синхротронного випромінювання в широкому енергетичному діапазоні (від десятків кеВ до кількох ТеВ) на основі явища вторинної електронної емісії.
2. Виконано розробку та виготовлення перших в світі детекторних модулів на основі надтонких мікстріпових металевих сенсорів різної конфігурації, виготовлених в ІЯД НАН України за оригінальною технологією плазмово-хімічного травлення. Товщина сенсорів 1-2 мікрони, крок – від 2 мікрон, кількість стріпів – до 1024.
3. Створено систему зчитування даних з металевих мікро- детекторів на основі розробленого в ІЯД НАН України високо-чутливого, поміхо- захищеного зарядового інтегратора (чутливість 1 фемто-ампер).
4. Розроблено та виготовлено мікстріпові металеві детектори різних форм та видів для вимірювання профілю і положення пучків заряджених частинок та синхротронного випромінювання

5. Створено технічні пристрої та необхідне програмне забезпечення на основі комерційних систем зчитування даних з багатоканальних металевих мікро-детекторів.
6. Прямими експериментами доведено можливість застосування металевих мікро-детекторів для цілей мас-спектрометрії, вимірювання профілю пучків заряджених частинок та синхротронного випромінювання, в тому числі для цілей фракціонованої радіаційної терапії.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. V.M. Pugatch, Y.V. Pylypchenko, O.Yu. Okhrimenko, V.M. Iakovenko, V.O. Kyva, M.S. Borysova, **O.S. Kovalchuk**, O.V. Mykhaylenko. Radiation Monitoring System For Lhcb Inner Tracker // Ukr. J. Phys. – 2009. – V. 54, N 4. P. 418-425
2. M. Campbell, L. Tlustos, D. Maneuski, Val O Shea, V. Storizhko, V. Eremenko, S. Homenko, A. Shelekhov, V. Pugatch, **O. Kovalchuk**, O. Okhrimenko, D. Storozhik, A. Chau. Hybrid micropixel detector at the focal plane of the mass-spectrometer. – Nuclear Physics and Atomic Energy. – No. 4. – 2009
3. V. Pugatch , M. Campbell, A. Chau, **O. Kovalchuk**, O. Okhrimenko et al., Metal and hybrid TimePix detectors imaging beams of particles, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 650 (2011) 194–197
4. V. Pugatch, **O. Kovalchuk** et al. Metal micro-detector TimePix imaging synchrotron radiation beams at the ESRF Bio-Medical Beamline ID17 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 682. – 2012. P. 8–11
5. O. Fedorovich, **O. Kovalchuk**, V. Pugatch, O. Okhrimenko, D. Storozhyk, V. Kyva. Metal Micro-detectors: Development Of “Transparent” Position Sensitive Detector For Beam Diagnostics. Problems of Atomic Science and Technology, Series “Plasma Physics” – Vol. 6 (82), 196 (2012)
6. Пугач М.В., Бурдін В.В., Кемпбел М., **О.С. Ковальчук**, К. Ллопарт, М.В. Мінаков, В.М. Міліція, О.Ю. Охріменко, Ю.М. Подрезов, С. Поспішил, В.М. Пугач, Д.І. Сторожик, Л. Тлустос, С.О. Фірстов, А.В. Чаус. Використання мікропиксельного детектора TimePix для спостереження динаміки фазових переходів у металах. Ядерна фізика та атомна енергетика. 2013, т.13, №4, с. 382–386
7. V. Pugatch, M. Campbell, X. Llopart Cudie, S. Pospisil, Y. Prezado, L. Tlustos, O. Okhrimenko, **O. Kovalchuk**, A. Chau, M. Renier. Metal Micro-detectors For Radiation Therapy Instrumentation. Radiotherapy and Oncology, Volume 102, Supplement 1, March 2012, P. 57–58
8. Яковенко В., **Ковальчук О.**, Сорокин Ю., Пугач В., Охріменко О., Презадо Й., Мартінез-Ровіра І., Ілюхіна А. Металеві мікро-детектори для візуалізації та моніторингу профілю пучка в радіаційній терапії. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка, 2014, вип. 1/2. С. 93–95

9. **О.С. Ковальчук**, В.В. Бурдін, В.О. Кива, В.М. Міліція, Н.В. Мінаков, Є.О. Петренко, В.М. Пугач, Д.І. Сторожик, Й. Хойзер, С.О. Фірстов, А.В. Чаус. Мікродетекторна система для швидкісної рентгенографії. Ядерна фізика та атомна енергетика. 2016, т.17, №4, с. 400
10. I. Momot, **O. Kovalchuk**, O. Okhrimenko, Y. Prezado, V. Pugatch Shaping and monitoring of the mini-beam structures for the spatially fractionated hadron radiation therapy, Nuclear Physics and Atomic Energy 2016, Vol. 17, No. 1, P. 92–97
11. V. Pugatch, S. Brons, M. Campbell, **O. Kovalchuk**, X. Llopart, I. Martínez-Rovira, Ie. Momot, Y. Prezado, Yu. Sorokin, Characterization of equipment for shaping and imaging hadron minibeam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 872 (2017) 119–125

Патенти та авторські свідоцтва

12. Детектор заряджених частинок та іонізуючих випромінювань і спосіб його виготовлення: патент України на винахід № 111418: МПК G01T 1/29 (2006.01) В.М. Пугач, О. А. Федорович, В. О. Петряков, **О. С.Ковальчук**, Є. Г.Костін. заявл. 30.09.2014, опубл. 25.04.2016, бюл. № 8

Міжнародні та всеукраїнські конференції

13. А.О. Lymanets, **O.S. Kovalchuk**, O.V. Mykhailenko, Yu.V. Pylypchenko, V.M. Pugatch. Temperature stability of the microstrip metal detectors. – Proceedings International Conference NPAE-2006. – 2006. – Kiev. – P. 814 – 818
14. В.М. Пугач, О.В. Михайленко, **О.С. Ковальчук**, В. О. Кива. Мікростріповий металевий детектор // Міжнародний Симпозіум «Резонансні явища в атомних системах». Програма та анотації доповідей. – Ужгород. – 2007. – с.23
15. V.M. Pugatch **O.S. Kovalchuk** et al. Mass-spectrometer electronic focal plane based on micro-strip metal detector, Proceedings of the NPAE-2008. – 2008. – Kyiv. – 2008. P. 796
16. В.М. Пугач, **О.С Ковальчук**, О.В. Михайленко, А.В. Чаус, О.А. Федорович, А.І. Борискін, В.М. Єрьоменко, С.М. Хоменко, В.Ю. Сторіжко, А. Шелехов, В.Л. Перевертайло. Мікростріповий металевий детектор // VII конференція по фізиці високих енергій, ядерній фізиці і прискорювачах. Тези доповідей. – Харків. – 2009. – с. 102
17. А.В. Чаус, **О.С. Ковальчук**, О.Ю. Охріменко, В.М. Пугач, В.М. Єременко, С.М.Хоменко, В.Ю. Сторіжко, А. Шелехов, М. Кампбел, Л. Тлустос, Д. Маневський, В. Оші. Мікропксельний детектор MEDIPIX2 в фокальній площині мас-спектрометра // VII конференція по фізиці високих енергій, ядерній фізиці і прискорювачах. Тези доповідей. – Харків. – 2009. – с. 102
18. **O. Kovalchuk**, V. Pugatch et al. Metal Micro-detectors for Radiation therapy instrumentation // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference IEEE. - 2011, P. 2617–2619
19. **О.С. Ковальчук**, В.М. Пугач, О.А. Федорович, А.В. Чаус, Д.І. Сторожик, В.М. Міліція, Є.Г. Костін, Б.П. Полозов, Металеві мікродетектори для діагностики пучків іонізуючого випромінювання // XIX Щорічна наукова конференція ІЯД НАНУ. Тези доповідей. - Київ. - 2012. С. 38

20. М.В. Пугач, В.В. Бурдін, М. Кемпбел, **О.С. Ковальчук**, К. Ллопарт, Б. Мінаков, В.М. Міліція, О. Ю. Охріменко, Ю. Подрезов, С. Поспішіл, В.М. Пугач, Д. Сторожик, Л. Тлустос, С.О. Фірстов, А.В. Чаус Динаміка фазових переходів в металах, спостережувана мікропксельним детектором Timerix // XIX Щорічна наукова конференція ІЯД НАНУ. Тези доповідей. - Київ. - 2012. С. 61
21. V. Pugatch, **О. Kovalchuk**, V. Kyva, Ya. Nikolaiko, O. Okhrimenko, V. Ostashko et al., New features of the experimental studies of the three-particle nuclear reactions at low energies // The 4-th International conference “Current problems in nuclear physics and atomic energy”. Books of abstracts. – Kyiv 2012. P. 52.
22. M. Pugatch, M. Cambell, X. Llopart, L. Tlustos, S. Pospisil, **О. Kovalchuk**, V. Militsya, V. Pugatch, D. Storozhyk, V. Yakovenko, V. Burdin, S. Firstov, Yu. Podrezov, B. Minakov. Micropixel detector timerix imaging dynamics of the phase transitions in metals // The 4-th International conference “Current problems in nuclear physics and atomic energy”. Books of abstracts. – Kyiv 2012. P. 141.
23. **О. Kovalchuk**, V. Pugatch, O. Fedorovich, O. Okhrimenko, D. Storozhyk, V. Kyva, M. Cambell, X. Llopart, S. Pospisil, Y. Przado, M. Renier. Metal micro-detectors: development of “transparent” position sensitive detector for beam diagnostics // The 4-th International conference “Current problems in nuclear physics and atomic energy”. Books of abstracts. – Kyiv 2012. P. 162.
24. О. А. Федорович, В. М. Пугач, **А. С. Ковальчук**, Д. И. Сторожик, В. М. Милиция, Е. Г. Костин, Б. П. Полозов, Г. Рем. Системы мониторинга профиля и положения пучков ионизирующего излучения на базе ММД. МНПК «Современные информационные и электронные технологии», 2013, Т.2, с.139–142
25. В. М. Міліція, В. В. Бурдін, Д. І. Денисюк, М. Кемпбел, **О. С. Ковальчук**, К. Ллопарт, Б. Мінаков, О. Ю. Охріменко, С. Поспішіл, М. В. Пугач, В. М. Пугач, Д. Сторожик, О. А. Федорович. Позиційно-чутливі мікродетектори для дифрактометрії швидкоплинних процесів. XX Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАНУ, 2013 р, Тези доповідей, с 28.
26. **О.С. Ковальчук**, В.М. Пугач, О.А. Федорович, Д.І. Сторожик, В.М. Міліція, В.О. Кива, Г. Рем, Мікростріпові металеві детектори для діагностики пучків заряджених частинок. Щорічник ІЯД НАНУ, Київ 2013, с. 78
27. Міліція В.М., Бурдін В.В., Кемпбел М., **Ковальчук О.С.**, Ллопарт К., Мінаков М.В. та інш., Детектор TimePіx у дослідженні дифрактометрії швидкоплинних процесів в сплавах заліза та титану. XXI Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України, 27-31 січня 2014 р. м. Київ. Тези доповідей, с. 62.
28. **Ковальчук О.С.**, Пугач В.М., Сторожик Д.І., Міліція В.М., Кива В.О., Панасенко Я.В., Бурдін В.В. Розробка на базі координатно-чутливого кремнієвого детектора системи реєстрації та обробки рентгенограм при дослідженні швидкоплинних процесів. XXI Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України, 27-31 січня 2014 р. м. Київ, Тези доповідей, с. 45.
29. Piiukhina A., Pugatch V., Iakovenko V., Storoyk D., **Kovalchuk O.** Metal strip detector for beam monitoring and positioning in hadron radiotherapy. Book of Abstracts, 4th International Conference “Medical physics – the current status, problems, the way of development. Innovation technologies”, October 23 – 24, 2014, Kyiv, 2014, p.12

30. Iakovenko V., **Kovalchuk O.**, Sorokin Iu., Pugatch V., Okhrimenko O., Prezado Y., Martinez-Rovira I., Iliukhina A. Metal micro-detectors for imaging and beam profile monitoring in radiation therapy. Book of Abstracts, 4th International Conference “Medical physics – the current status, problems, the way of development. Innovation technologies”, October 23 – 24, 2014, Kyiv, 2014, p.19
31. V. Pugatch, I. Momot, **O. Kovalchuk**, O. Okhrimenko, Y. Prezado. Hybrid and Metal Microdetector Systems for measuring in real time spatial distribution of charged particles and X-rays beams // Proceedings of the third French-Ukrainian workshop on the instrumentation developments for HER. October 15-16, 2015, LAL, Orsay, France. arXiv:1512.07393v1 [physics.ins-det] 23 Dec 2015. P.45
32. **Ковальчук О.С.**, Пугач В.М., Сторожик Д.І., Міліція В.М., Кива В.О., Панасенко Я.В., Бурдін В.В., Мінаков Н.В. Широкодіапазонна мікро-детекторна система для установки швидкісного рентгенографування. XXII Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України, 26-30 січня 2015 р. м. Київ, Тези доповідей, с. 53.
33. В. Яковенко, **О. Ковальчук**, Ю. Сорокін, В. Пугач, О. Охріменко, Й. Презадо, І. Мартінез-Ровіра. Металеві мікродетектори для зображення і моніторингу профілю пучка в променевої терапії. // XXII Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України. Тези доповідей. – 2015. С. 91
34. **О.С Ковальчук**, С.Я. Барсук, П'єр Луїс Андре Леперк, В.М. Міліція, В.М. Пугач, Д.І. Сторожик, А. Фаус-Гольф, О.А. Федорович Дизайн мікростріпового металевого детектора для моніторингу положення та профілю пучка на прискорювачі RHIL (LAL, Orsay) // XXIII Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України. Тези доповідей. – 2016. С. 91
35. **О.С Ковальчук**, В.М. Пугач, В.М. Міліція, Д.І. Сторожик, С.Я. Барсук, А. Фаус-Гольф, П'єр Луїс Андре Леперк Просторове фракціонування пучків заряджених частинок та гама-квантів та їх зображення в реальному часі // XIX Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України. Тези доповідей. – 2017. С. 73

АНОТАЦІЯ

Ковальчук О.С. Металеві мікродетектори потоків іонізуючого випромінювання. –

На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 «Фізика ядра, елементарних частинок та високих енергій». – Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена експериментальним вимірюванням потоків іонізуючого випромінювання металевими мікродетекторами. Виконано розробку та створено перші в світі детекторні модулі на основі надтонких мікростріпових металевих сенсорів різної конфігурації, виготовлених в ІЯД НАН України за оригінальною технологією плазмово-хімічного травлення. Створено технічні пристрої та необхідне програмне забезпечення на основі комерційних систем зчитування даних з багатоканальних металевих мікро-детекторів. Прямими експериментами доведено можливість застосування металевих мікро-детекторів для цілей мас-спектрометрії, вимірювання профілю пучків заряджених частинок та синхротронного випромінювання, в тому числі для цілей фракціонованої радіаційної терапії.

Вимірний ефективний конверсійний коефіцієнт (відношення кількості падаючих фотонів до вибитих електронів) у повітрі дорівнює 2,02 фотона на 1 електрон, у вакуумі - $1,5 \times 10^4$ фотона на 1 електрон. Виміряна величина міжстріпових наводок не перевищує 0,2% від сигналу.

Ключові слова: вторинна електронна емісія, синхротронне випромінювання, профіль пучка, мас-спектрометрія, фракціонована радіаційна терапія.

ABSTRACT

Kovalchuk O.S. Metal micro detectors of ionizing radiation fluxes. - Manuscript. Thesis for the candidate's degree of technical sciences (Ph.D.) in specialty 01.04.16 "Physics of the nucleus, elementary particles and high energies". - Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to experimental measurements of ionizing radiation fluxes by metal micro-detectors. The development and creation of the world's first detector modules based on ultra-thin micro-strip metal sensors of various configurations manufactured by the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine by the original technology of plasma-chemical etching were completed. The technical devices and the necessary software are created on the basis of commercial readout systems for multichannel metal detectors. Direct experiments have proved the possibility of using metal detectors for mass-spectrometry purposes, measurement of the beam profile of charged particles and synchrotron radiation as well as for fractionated radiation therapy purposes. Measured effective conversion coefficient (the ratio of the number of incident photons to cut electrons) in the air is 2.02 photons per 1 electron, in a vacuum - 1.5×10^4 photons per 1 electron. The measured value of the inter-strip interference does not exceed 0.2% of the signal.

Key words: secondary electron emission, synchrotron radiation, beam profile, mass spectrometry, fractionated radiation therapy.