

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора техн. наук, професора,  
Борщова В. М. на дисертаційну роботу Ковальчука Олексія Сергійовича  
„Металеві мікродетектори потоків іонізуючого випромінення”,  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 01.04.16 - Фізика ядра, елементарних частинок і високих  
енергій

**Актуальність теми дисертаційної роботи** значною мірою обумовлена необхідністю підвищення радіаційної стійкості детекторів іонізуючого випромінювання для експериментів в області ядерної фізики, фізики високих енергій, а також в інших галузях (промисловість, медицина та ін.). Металеві сенсори детекторних систем, представлені в дисертаційній роботі О.С. Ковальчука, належать до сімейства з найбільшою радіаційною толерантністю, притаманної металевим об'єктам. Крім того, унікальна особливість цих детекторів, а саме їх мікронна товщина, дозволяє моніторувати параметри пучка іонізуючого випромінювання в онлайн режимі, зокрема у тих випадках, коли це неможливо здійснити за допомогою традиційних «непрозорих» детекторів. В дисертаційній роботі представлені результати досліджень і тестувань розроблених автором прототипів детекторних систем на базі металевих мікро-детекторів, доведено їх високу ефективність щодо вимірювання інтенсивності, положення та профілю пучків синхротронного випромінення, протонів та іонів різних енергій.

Дисертаційна робота була виконана в рамках держбюджетних тем, робіт за міжнародними угодами та науково-дослідних робіт, співвиконавцем яких був автор.

**За структурою та обсягом** дисертаційна робота подана до захисту в наступному вигляді: викладена на 139 сторінках друкованого тексту, включаючи 75 малюнків та 1 таблицю, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, переліку використаних джерел та додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, вказано на наукову новизну отриманих результатів, наведено наукове та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок автора.

У першому розділі представлено у деталях явище вторинної електронної емісії та його властивості, які визначають принцип роботи металевих мікродетекторів. Сформульовані основні характеристики цих детекторів та наведено розрахунки граничних умов, за яких можливе використання детекторів. Розрахована максимально допустима густина потоку синхротронного випромінювання становить  $10^{16} \text{ c}^{-1}\text{мм}^{-2}$ . На протонному пучку з енергією 200 ГеВ робота можлива при  $10^8$  частинок на банч, при частоті банчів у 40 МГц.

Другий розділ присвячений технології виготовлення мікростріпових детекторів. Наводиться покроковий опис процедури фотолітографії кремнієвих пластин для створення стріпової структури металевого сенсора. Описано в деталях процедуру плазмохімічного травлення, яка дозволяє звільнити металеві стріпи сенсора від підтримуючої кремнієвої основи. Ця оригінальна технологія, розроблена в ІЯД НАНУ, була використана для створення надтонких позиційно-чутливих металевих детекторів, аналогів яких немає в світі. Також у цьому розділі представлено етапи монтажу детекторів та наведено приклади виготовлених детекторних модулів.

У третьому розділі представлено опис електроніки для зчитування даних з металевих мікродетекторів. Представлено детальний опис та принцип роботи зарядового інтегратора, розробленого в Інституті ядерних досліджень. Характеристики комерційних систем, таких як XDAS (Sense-Tech, UK) та Timerix (CERN) з розрахунку використання з металевими мікродетекторами також представлені у роботі.

У четвертому розділі представлені результати досліджень виготовлених детекторів на різних прискорювачах. Були виконані дослідження на пучках синхротронного випромінювання з енергією 20 кеВ та



інтенсивністю до  $10^{12}$  фотонів за секунду в дослідницькому центрі DESY (м. Гамбург, Німеччина). Для цього експерименту був виготовлений мікροстріповий металевий детектор з товщиною стріпів 1,5 мкм, шириною 40 мкм та кроком 70 мкм, який під'єднувався до високочутливого зарядового інтегратора. За допомогою рухомих горизонтальних та вертикальних щілин формувалася пучок різної форми та вимірювався мікροстріповим детектором. Детектор з високою точністю показував зміни профілю пучка. Вимірний ефективний конверсійний коефіцієнт у повітрі дорівнює 2,02 фотона на 1 електрон. Виміряна величина міжстріпових наводок не перевищує 0,2% від сигналу.

На протонному пучці тандем-генератора ІЯД НАНУ (Київ) була протестована детекторна система з мікροстріповим детектором для вимірювання двовимірного розподілу та новою системою зчитування XDAS. На цьому ж прискорювачі була протестована система формування та зображення багатопучкових структур для фракціонованої радіаційної терапії. Система включала спеціально розроблені коліматори та металевий мікропіксельний детектор на базі Timepix.

В Інституті прикладної фізики НАНУ (м. Суми) мікροстріпові та мікропіксельні детектори були успішно застосовані для реєстрації в реальному часі іонів з енергією декількох кеВ у фокальній площині мас-спектрометра. Досліджена неоднорідність відгуку гібридного (кремнієвого) детектора TimePix в порівнянні з металевими мікродетекторами.

В рамках розробки методів швидкісного рентгеноструктурного дослідження фазово-структурних перетворень в металах та сплавах виконані дослідження на установці швидкісного рентгеноструктурного аналізу Інституту проблем матеріалознавства НАНУ (м. Київ). Розроблено та протестовано прототип широкодіапазонної мікро-детекторної системи. Створена система продемонструвала можливість спостерігати в реальному часі еволюцію положення дифракційних максимумів характеристичного випромінювання зразка заліза при його нагріванні чи охолодженні. Це може

знайти застосування при розробці нових методів зварювання металів та/або технологій створення нових композиційних металевих структур.

Для цілей фракціонованої радіаційної терапії розроблені детекторні системи та виконані дослідження на Європейському синхротроні ESRF (м. Гренобль, Франція) та на пучках іонів терапевтичного центру Heidelberg Ion Therapy center (м. Гайдельберг, Німеччина).

По кожному з експериментів описано мету досліджень та технічні характеристики експериментальної установки. Результати досліджень представлено в деталях та проілюстровано на багатьох рисунках. Всі експерименти були успішними та показали високу працездатність створених детекторів для вимірювання потоків синхротронного випромінювання та заряджених частинок різних енергій.

**У висновках** наведено основні наукові і практичні результати дисертації.

**Зауваження щодо дисертаційної роботи.** Рецензування текстів дисертаційної роботи та автореферату поставило деякі зауваження:

1. Застосовані технології для виготовлення металевих мікродетекторів є досить складними та коштовними, вимагають використання спеціалізованого обладнання, на що не було звернуто достатньо уваги. Не наведені відмінності від інших позиційно-чутливих детекторів, наприклад кремнієвих мікростріпових детекторів.

2. Деякі рисунки потребують додаткових пояснень. Так наприклад на рис. 4.40 відображення електродів є нерівним. Чим це викликано – незрозуміло.

3. Деякі рисунки представлені в англійському вигляді. Вважаю, що потрібно було б перекласти українською.

Наведені зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи Ковальчука О.С.

Одержані результати опубліковано у 11 наукових публікаціях у провідних вітчизняних та зарубіжних фахових журналах, отримано патент



України. Результати також представлено на багатьох міжнародних конференціях та семінарах.

Автореферат дисертації достатньо повно і точно описує основний зміст дисертаційної роботи.

Вважаю, що за рівнем наукових результатів, отриманих в дисертації, її практичної направленості здобувач Ковальчук Олексій Сергійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 - Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Перший заступник директора - головний конструктор  
ТОВ "Світлодіодні технології Україна"  
доктор технічних наук, професор



В. М. Борщов

Підпис В. М. Борщова засвідчую  
Генеральний директор  
ТОВ "Світлодіодні технології Україна"



Г.І. Нікітський