НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Шляхов Ілля Миколайович

УДК 539.1.074

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПОЛУК CdTe І CdZnTe У ЗАДАЧАХ АНАЛІЗУ ДЖЕРЕЛ γ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків–2012

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України.

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор
Уваров В'ячеславЛаврентійович
Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України, НДК «Прискорювач», начальник лабораторії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Рижиков Володимир Діомидович,
керівник відділу систем радіаційного контролю та дефектоскопії інституту сцинтиляційних матеріалів НАНУ (м. Харків);

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Маслов Микола Іванович,
начальник відділу інституту фізики високих енергій та ядерної фізики ННЦ ХФТІ.

Захист відбудеться "10" липня_2012 р. о 15^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м.Харків, просп. Леніна, 14

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий "_8_" __червня__ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Б.Г. Бородін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Техногенними джерелами радіаційної небезпеки є ядерні реактори, прискорювачі заряджених частинок, сховища відпрацьованого ядерного палива та радіоактивних відходів (для України ще і зона Чорнобильської АЕС), ізотопні установки медичного та технологічного призначення. У більшості випадків основним дозостворюючим чинником таких джерел є рентгенівське і γ-випромінювання. Значна частина завдань їх дозиметричного контролю вирішується за допомогою приладів з напівпровідниковими детекторами (НПД), які працюють за принципом зміни електропровідності напівпровідників під дією іонізуючого випромінювання.

Для спектрометричного аналізу γ-випромінювання використовують переважно прилади з НПД на основі Ge. Перевагами таких приладів є високі чутливість і точність енергетичного розподілу. Проте такі НПД працюють лише при температурі рідкого азоту, що істотно збільшує габарити приладу, а також ускладнює його експлуатацію. Тому розробка надійних і простих в експлуатації методів і засобів характеризації джерел рентгенівського та γ-випромінювання, тобто визначення їх інтенсивності, енергетичного спектра і ізотопного складу, геометричних характеристик в умовах широкого діапазону значень поглинутої дози (ПД) та потужності поглинутої дози (ППД), а також енергії реєстрованих фотонів і робочих температур є актуальною. Такі методи та засоби знаходять застосування при радіаційно-екологічному моніторингу, в системах радіаційного контролю (СРК) АЕС, а також підприємств, що використовують джерела іонізуючого випромінювання у виробничих циклах та ін.

Останніми роками особливо актуальною стала проблема нерозповсюдження речовин, що діляться. Як один з напрямів її рішення Європейським комітетом з ядерної співпраці названа розробка систем контролю з використанням детекторів на основі CdZnTe.

Слід зазначити, що з 90-х років минулого століття сполуки CdTe (CdZnTe) займають лідируюче положення серед матеріалів напівпровідникових детекторів. Такі детектори не вимагають глибокого охолоджування, компактні, мають підвищену радіаційну стійкість. Разом з тим, виробництво НПД з CdTe (CdZnTe) вимагає застосування складних технологій, пов'язаних з вирощуванням кристалів, виготовленням на їх основі детектуючих елементів, а також розробки відповідної електронної апаратури для обробки сигналів від детекторів. Такого роду продукція випускається в світі тільки декількома спеціалізованими фірмами: eV-PRODUCTS, AMPTEK, DIGIRAD (США), EURORAD, CEA Leti (Франція), ACROTEC (Японія).

Незважаючи на значну кількість робіт щодо електрофізичних і спектрометричних властивостей детекторів на основі CdTe і CdZnTe, практично відсутні дані про їх застосування для дослідження джерел рентгенівського та γ-випромінювання різної природи в широкому діапазоні умов експлуатації детекторів (температура, інтенсивність випромінювання, інтегральна поглинута

доза та ін.). Ці умови визначають вибір режиму роботи детектора (радіометричний або спектрометричний), його чутливість, радіаційний ресурс тощо.

Ця дисертаційна робота присвячена розробці методів і засобів аналізу джерел високоенергетичного рентгенівського та γ-випромінювання у широкому діапазоні параметрів останніх щодо інтенсивності, енергії фотонів, геометричних характеристик за допомогою детекторів на основі CdTe і CdZnTe.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Ця дисертаційна робота виконана в Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут". Тема, якій присвячена дисертація, пов'язана з програмами досліджень, у виконанні яких автор узяв безпосередню участь, а саме:

1. Був виконавцем програм з атомної науки і техніки (АНТ):

– тема № 13/35. Розробка фізичних основ виробництва нейтрондефіцитних ізотопів (НДІ) у потужних потоках прискорених електронів (1997–1998 рр.) ;

– тема № 35/02. Розробка ядерних технологій для медицини з використанням прискорювачів електронів (1999–2000 рр.);

– тема № 35/01. Розробка нових і удосконалення існуючих лінійних прискорювачів електронів ННЦ ХФТІ для проведення наукових і прикладних досліджень та розвиток ядерних технологій для медицини і вирішення чорнобильської проблеми з використанням цих прискорювачів (2003–2005 рр.);

2. Був учасником таких програм, зокрема:

– «Державне замовлення науково-технічної продукції». Реєстраційний номер 06.01.11;

– «Розробка і впровадження комплексу фізичних засобів вимірювань

– і контролю ядерних випромінювань на основі досконалих напівпровідникових монокристалів типу AIIBVI і AIIIBV з метою посилення
контролю і підвищення безпеки атомних станцій і «Об'єкта «Укриття» України». Програма виконувалася відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України від 16.02.2001 № 71;

– багатогалузева науково-технічна програма «Програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» на 2001–2005 рік, що виконувалася відповідно до розпорядження КМУ від 13.09.01. № 421–р. Державний реєстраційний номер 080901UP0009;

– державна програма Ресурс-2004, НАНУ «Розробка і виготовлення сенсорних пристроїв широкого спектра дії для радіаційного і ядерного технологічного контролю в системі АЕС на основі радіаційно-стійких напівпровідникових сенсорів з CdTe, CdZnTe і штучних діамантових плівок». Державний реєстраційний номер 0104U007429 – 2004;

– НДР з договору № 40 від 14.12.99 «Розробка і атестація методик визначення кількості і рівня активності РАВ в Об'єкті «Укриття»;

3. Брав участь у виконанні:

– проектної угоди з Українським науково-технологічним центром № 1787 (2003 р.) "Нові підходи до вирощування CdZnTe і створення сенсорів ядерного випромінювання для моніторингу оточуючого середовища";

– проектної угоди з Українським науково-технологічним центром № 3151 (2005-2008 р.) ”Технологічні основи виробництва на прискорювачах електронів ізотопів W-181, Pd-103 і Re-186 для ядерної медицини”;

– проектної угоди з Українським науково-технологічним центром № P228 (2006-2008г.) ”Розробка технології та обладнання для фотоядерного виробництва медичних ізотопів”.

Метою дисертаційної роботи є:

– розробка методів поліпшення радіометричних і спектрометричних характеристик пристроїв детектування рентгенівського та γ-випромінювання високої інтенсивності;

– створення на їх основі блоків детектування та дослідження умов їх застосування в реальних завданнях характеризації джерел рентгенівського та γ-випромінювання;

– розробка методу та апаратури для просторово-енергетичного аналізу потоку високоенергетичного гальмівного випромінювання.

Об'єкт дослідження – методи і засоби аналізу високоінтенсивних джерел рентгенівського та γ-випромінювання з використанням напівпровідникових детекторів на основі сполук CdTe і CdZnTe.

Предмет дослідження – фізичні процеси в детекторах на основі CdTe і CdZnTe в режимі спектрометрії і радіометрії джерел рентгенівського та γ-випромінювання великої інтенсивності, а також методи аналізу просторово-енергетичних характеристик такого випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

– проаналізувати фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідникових сполуках під впливом іонізуючого випромінювання стосовно проблеми аналізу джерел рентгенівського та γ-випромінювання високої інтенсивності;

– провести комплексне дослідження електрофізичних властивостей спектрометричних детекторів;

– на основі цього дослідження розробити та створити експериментальні зразки блоків детектування для радіометрії і спектрометрії рентгенівського та γ-випромінювання у радіаційних полях високої інтенсивності;

– вивчити спектрометричні характеристики розроблених детекторів γ-випромінювання у широкому діапазоні потужностей доз і енергій останнього;

– розробити метод випробувань та дослідити радіаційну стійкість спектрометричних детекторів на основі CdTe і CdZnTe у полі гальмівного випромінювання високої інтенсивності;

– розробити метод і апаратуру на основі CdTe (CdZnTe) для просторово-енергетичного аналізу потоку високоенергетичного гальмівного випромінювання, яке застосовується у фотоядерних дослідженнях і технологіях.

Для вирішення поставлених завдань використано такі **методи дослідження**:

– метод вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) детекторів, які експлуатуються при різних температурах і в умовах дії рентгенівського та γ-випромінювання різної інтенсивності;

– метод НП спектрометрії джерел γ-випромінювання з широким діапазоном характеристик, включаючи стандартні зразки з набору ОСГІ, а також радіонуклідні джерела, напрацьовані на прискорювачах електронів у фотоядерних реакціях;

– метод вимірювання потужності поглинутої дози гальмівного випромінювання прискорювача електронів під час дослідження радіаційної стійкості детекторів на основі CdTe (CdZnTe);

– комп’ютерне моделювання для аналізу та оптимізації розроблених методів і пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів. В ході виконання дисертаційної роботи вперше отримано такі результати:

– сформульовано вимоги щодо електронного тракту спектрометра у залежності від електрофізичних властивостей детектора на основі CdTe і CdZnTe, на основі яких оптимізовано параметри тракту і підвищено енергетичну роздільну здатність спектрометра;

– розроблено метод радіаційних випробувань з використанням гальмівного випромінювання великої потужності, на основі якого досліджено радіаційну стійкість спектрометричних детекторів з CdTe і CdZnTe;

– продемонстровано можливості розроблених блоків детектування на основі CdTe і CdZnTe для вимірювання просторово–енергетичних характеристик джерел рентгенівського та γ-випромінювання високої інтенсивності з різними геометричними характеристиками;

– розроблені метод, устаткування і проведені дослідження просторово-енергетичних характеристик джерел гальмівного випромінювання інтенсивністю до 10 кВт/см^2 з верхньою межею енергетичного спектра до 100 МеВ.

Практичне значення отриманих результатів. Найбільше значення для практики мають такі результати дисертаційної роботи:

– розроблено методи та проведено дослідження характеристик джерел високоенергетичного фотонного випромінювання різної природи (гальмівне випромінювання прискорювачів електронів з енергією до 100 МеВ, радіонуклідні джерела γ-випромінювання складної просторової конфігурації тощо);

– розроблено метод фотоядерного конвертера для вимірювання розподілу щільності потоку високоенергетичних фотонів інтенсивністю до 10 кВт/см^2 з роздільною здатністю 1.5 мм;

– розроблено та виготовлено електронні тракти багатоканальних (16 каналів) радіометричних та спектрометричних детекторів рентгенівського і γ-випромінювань з CdTe і CdZnTe;

– розроблено та виготовлено експериментальні спектрометричні БД, призначені для дослідження джерел γ-випромінювання в діапазоні енергій 10...1000 кеВ;

– розроблені та виготовлені експериментальні БД γ-випромінювання, призначені для роботи у складі СРК АЕС України, мають перевагу по ваго–габаритних показниках та експлуатаційному ресурсу в порівнянні з існуючими.

Результати дисертаційної роботи були також використані під час розробки методик аналізу радіоактивних відходів, що знаходяться в Об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС.

Зразок розробленого дисертантом у межах проекту УНТЦ № Р228 гамма-сканера для вимірювання профілю потоку високоенергетичного гальмівного випромінювання передано замовникові в Аргоннську Національну Лабораторію (США).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації отримано автором самостійно. Дисертант безпосередньо брав участь у розробці технології виготовлення детекторів та методу їх радіаційних випробувань, у плануванні, підготовці і проведенні експериментів, обробці їх результатів, а також у розробці методу фотоядерного конвертера, апаратури, математичного та програмного забезпечення для його реалізації.

У наукових роботах, опублікованих в співавторстві, дисертантові належить:

– експериментальне дослідження радіаційної стійкості спектрометричних детекторів: автор безпосередньо склав програми випробувань, підготував зразки для випробувань, брав участь у їх проведенні і дослідженні характеристик детекторів після радіаційного навантаження [1,2];

– брав участь у дослідженні радіометричних і спектрометричних характеристик детекторів рентгенівського та γ-випромінювання [3];

– у [4,5] автор провів дослідження характеристик розробленого ним блоку детектування γ-випромінювання;

– у [6…11] дисертант безпосередньо брав участь в обробці та аналізі отриманих експериментальних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи докладались і отримали позитивну оцінку на таких міжнародних конференціях та нарадах: XVII–й Міжнародний семінар з лінійних прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2001 р.);

IV–а Міжнародна науково-практична конференція "Об’єкт "Укриття" 15 років: минуле, сьогодення, майбутнє " (Славутич, Україна, 2001 р.); XV–а Міжнародна конференція з фізики

радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства XV-ICPRP (Алушта, Україна, 2002 р.); 5th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (Riga, 2003 р.); XVIII–й Міжнародний семінар з лінійних прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2003 р.); XVI–а Міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства XVI-ICPRP (Алушта, Україна, 2004 р.); XIX–й Міжнародний семінар з лінійних прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2005 р.); XVII–а Міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства (Алушта, Україна, 2006 р.); International Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2006) (Kyiv, Ukraine, 2006 р.); X European Particle Accelerator Conference (EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006 р.); XVIII–а Міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ і радіаційного матеріалознавства (Алушта, Україна, 2008 р.); XXI –й Міжнародний семінар з лінійних прискорювачів заряджених частинок (Алушта, Україна, 2009 р.);

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 11 роботах, 7 з них у наукових журналах, 4 – у матеріалах і тезах доповідей на науково-технічних конференціях. Із зазначених робіт відповідають вимогам ВАК України до публікацій 7 статей у наукових журналах [3,5,6,8…11].

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінку та містить у собі 118 сторінок основного тексту, 54 рисунка, 11 таблиць (із них 11 рисунків займають 11 окремих сторінок). Список використаних джерел нараховує 60 найменувань, розташованих на семи сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ***вступі*** розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну отриманих результатів, надано практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора в дисертаційну роботу, апробація результатів дисертації.

У ***розділі 1*** проведено огляд літератури та розглянуто особливості роботи напівпровідникових детекторів у режимах радіометрії і спектрометрії, а також проаналізовано радіаційні дефекти у напівпровідниках і вимоги щодо електронної апаратури для γ-спектрометрії.

У ***розділі 2*** проведено аналіз і сформульовано вимоги щодо радіометра- спектрометра, а також проведено оптимізацію його електронного тракту з використанням комп'ютерного моделювання.

Радіометр–спектрометр – це прилад, що поєднує в собі властивості як радіометра, так і спектрометра. Він повинен працювати при великих статистичних завантаженнях. Отже, власна постійна часу передпідсилювача повинна бути не більш за одиниці мікросекунд. Для виконання цієї вимоги запропоновано зменшити ємність зворотного зв'язку і ввести ланцюг компенсації власної ємності детектора (рис.1–3). Одержана АЧХ оптимізованого передпідсилювача є рівномірною до 40 МГц. Таким чином, збирання електронної компоненти заряду детектора забезпечується практично без спотворень.

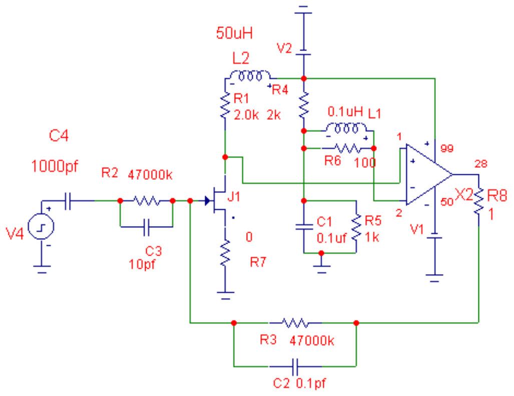

Рис.1. Оптимізована схема передпідсилювача

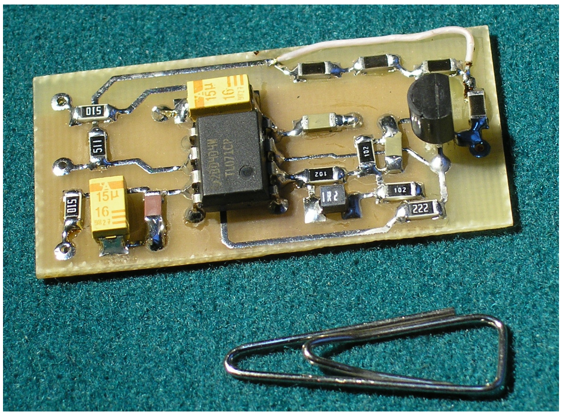

Рис. 2. Реалізація передпідсилювача

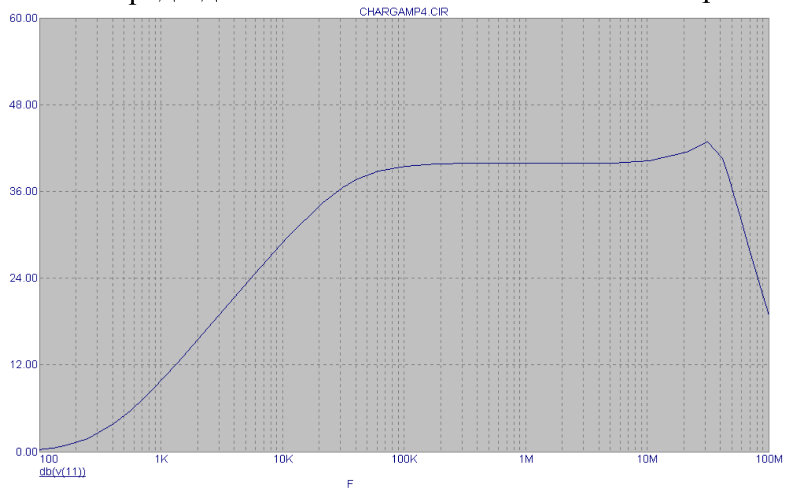

Рис. 3. Частотна характеристика оптимізованого передпідсилювача

У ***розділі 3*** проведено дослідження радіаційної стійкості спектрометричних детекторів і особливостей їх роботи в умовах великих статистичних завантажень. Випробування радіаційної стійкості виконувались

з використанням гальмівного випромінювання лінійного прискорювача електронів.

Після опромінювання детектори показали зниження області лінійної залежності ВАХ і збільшення струму витоку поза нею (рис.4).

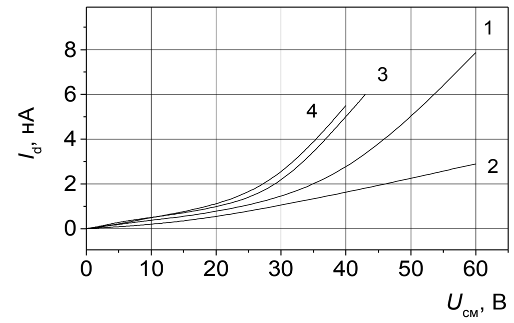

Рис. 4. ВАХ (струм витоку) спектрометричного CdZnTe детектора при різних дозах опромінення гамма-квантами: 1 – до опромінення, 2 – 5 кГр, 3 – 11 кГр, 4 – 21 кГр

Ці зміни можна пов'язати із збільшенням кількості центрів захоплення носіїв, створених унаслідок опромінювання. Потрібно відзначити деяке зниження струму витоку в CdZnTe після проміжної дози 5 кГр.

У ***розділі 4*** наведено результати розробки блоків детектування різного призначення: для роботи в умовах радіаційної аварії, аналізу ізотопного складу РАО, а також визначення геометричних характеристик поля γ-випромінювання.

З метою детектування γ-випромінювання і його контролю в аварійному режимі розроблений і пройшов попередні випробування блок детектування (БД), що працює в струмовому режимі (вимірювання струму, що індукується опромінюванням) і призначений для вимірювань ПЕД потужних γ-полів (рис. 5,6).

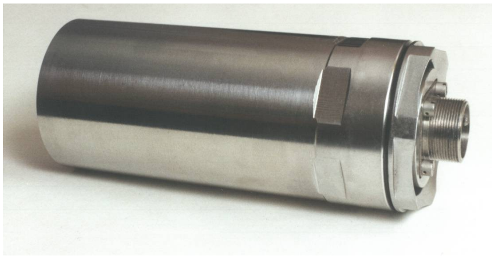

Рис.5. Зовнішній вигляд блоку детектування для контролю γ-випромінювання в аварійному режимі

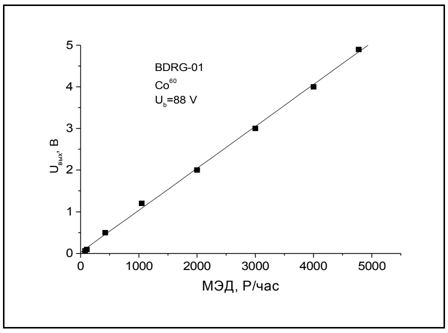

Рис.6. Залежність напруги на виході перетворювача БД від ПЕД γ-випромінювання (^{60}Co)

Однією з цілей даної роботи було підвищення енергетичного розділення неохолоджуваного гамма-спектрометра з CdZnTe детектором шляхом поліпшення шумових характеристик попереднього підсилювача, а також збільшення максимально допустимого статистичного завантаження

спектрометричного тракту. На рис.7 приведений спектр γ-квантів у діапазоні енергій 500-800 кеВ, отриманий за допомогою неохолоджуваного CdZnTe детектора розміром 5×5×2 мм при 25°C.

Для калібрування томографічних гамма-камер, що широко застосовуються у сучасній ядерній медицині, використовують джерела γ-випромінювання на основі ізотопу ^{57}Co активністю декілька мКі. В межах дисертаційної роботи таке джерело було напрацьовано на прискорювачі електронів за реакцією ^{58}Co(γ,N)^{57}Co.

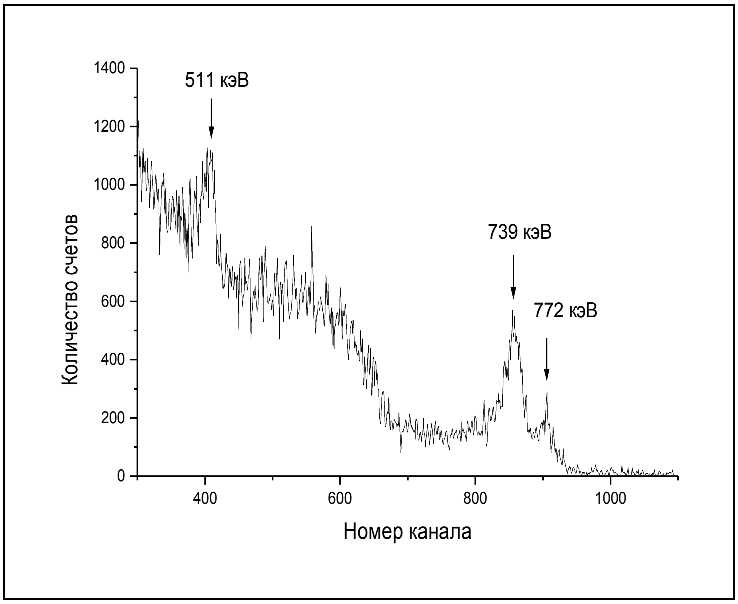

Рис. 7. Енергетичний спектр γ-квантів від джерела ^{99}Mo

Вимірювання відносного розподілу потужності експозиційної дози в межах робочого поля проводилося на відстані 2300 мм від калібратора. У точках контролю визначалась швидкість рахунку імпульсів на виході напівпровідникового детектора типу ТХ 201АП з детектором CdTe розміром 5х5х2, мм. Детектор по черзі розміщувався у кожній з 5 контрольних точок робочого поля калібратора (рис.8).

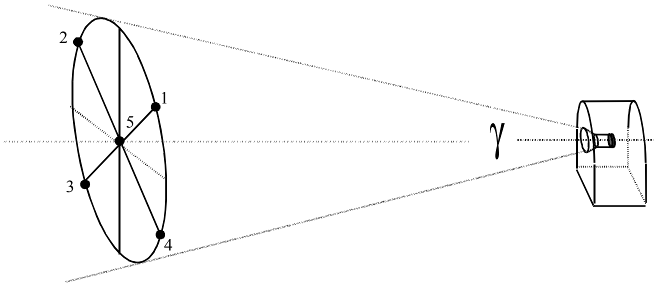

Рис. 8. Схема вимірювань робочого поля калібратора з джерелом ^{57}Co

Таким чином було встановлено, що нерівномірність щільності потоку фотонів у межах робочого поля калібратора не перевищує 0.5%.

У розділі 5 представлено розроблений у межах дисертаційної роботи метод фотоядерного конвертера (PNC) для вимірювання профілю потоку високоенергетичного фотонного випромінювання. Наведено результати комп'ютерного моделювання, описано апаратуру для реалізації методу та алгоритм обробки результатів вимірювань. Спочатку на заданій відстані від досліджуваного джерела встановлюється фольга-мішень і проводиться її активація. Далі опромінена мішень досліджується за допомогою колімованого радіометра гамма-випромінювання. Просторовий розподіл щільності потоку фотонів з енергією E_γ>-Q (поріг (γ,N) реакції в матеріалі PNC) можна відновити шляхом вимірювання розподілу його поверхневої активності.

Результати моделювання профілю потоку гальмівного випромінювання і розподілу щільності поверхневої активності ізотопу ^{99}Mo для енергії електронів 30 МеВ наведено на рис.9.

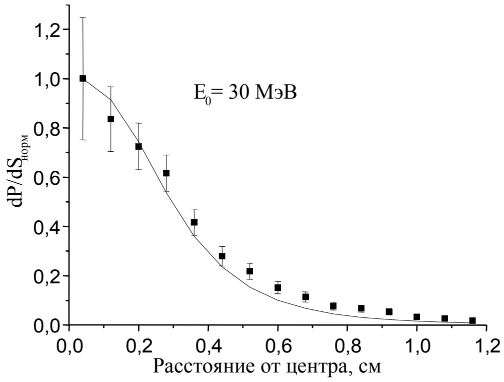

Рис. 9. Розподіл відносної щільності потоку гальмівних фотонів (E_γ>8.2 MeB – суцільна крива моделювання) і поверхневої активності PNC з молібдену

Для відтворення 2D-розподілу щільності потоку гальмівних фотонів запропоновано фізичну модель, за якою PNC розглядається як набір точкових джерел, що розташовані кроком L у вигляді матриці 16x16 елементів. Повне число відліків N кожного детектора для кожного рядка матриці визначається так:

$$N1=X1+k1*X2+k2*X3,$$
$$N2=X2+k1*X1+k1*X3+k2*X4,$$
$$N3=X3+k1*X2+k2*X1+k1*X4+k2*X5, \qquad (1)$$
$$* \quad * \quad * \quad *$$
$$N16=X16+k1*X15+k2*X14,$$

де X1…X16 – активність джерел у рядку матриці, k1,k2 – коефіцієнти впливу сусідніх джерел на детектор, що визначаються як відношення швидкості рахунку детектора при опромінюванні сусіднім точковим джерелом до швидкості рахунку при опромінюванні прямим джерелом.

Значення коефіцієнтів k1,k2 визначалися експериментально. Таким чином було отримано систему з 16 лінійних рівнянь для кожного рядка матриці, яка набуває вигляду:

$$A=\begin{vmatrix}
X_1 & k_1X_2 & k_2X_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
k_1X_1 & X_2 & k_1X_3 & k_2X_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
k_2X_1 & k_1X_2 & X_3 & k_1X_4 & k_2X_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & k_2X_2 & k_1X_3 & X_4 & k_1X_5 & k_2X_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & k_2X_3 & k_1X_4 & X_5 & k_1X_6 & k_2X_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & k_2X_4 & k_1X_5 & X_6 & k_1X_7 & k_2X_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_5 & k_1X_6 & X_7 & k_1X_8 & k_2X_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_6 & k_1X_7 & X_8 & k_1X_9 & k_2X_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_7 & k_1X_8 & X_9 & k_1X_{10} & k_2X_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_8 & k_1X_9 & X_{10} & k_1X_{11} & k_2X_{12} & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_9 & k_1X_{10} & X_{11} & k_1X_{12} & k_2X_{13} & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_{10} & k_1X_{11} & X_{12} & k_1X_{13} & k_2X_{14} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_{11} & k_1X_{12} & X_{13} & k_1X_{14} & k_2X_{15} & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_{12} & k_1X_{13} & X_{14} & k_1X_{15} & k_2X_{16}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_{13} & k_1X_{14} & X_{15} & k_1X_{16}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2X_{14} & k_1X_{15} & X_{16}
\end{vmatrix} \qquad (2)$$

Для урахування перерозсіяного випромінювання у вертикальній площині достатньо матрицю А зробити транспонованою. Остаточний результат можна отримати шляхом визначення середнього арифметичного між першим і другим кроком розрахунків.

Для вимірювання 2D-розподілу поверхневої активності PNC запропоновано використовувати багатоканальний колімований координатно–чутливий радіометр **γ**-випромінення власної розробки (гамма-сканер). Він складається з детекторної головки (DH) і основного спектрометричного блоку. До складу головки (рис.10) входить лінійна матриця з 16 колімованих напівпровідникових детекторів на основі CdZnTe (2х2х2,мм^3). Кожен детектор має на виході малошумливий попередній підсилювач PA. Розмір головки складає 30х40х120,мм^3.

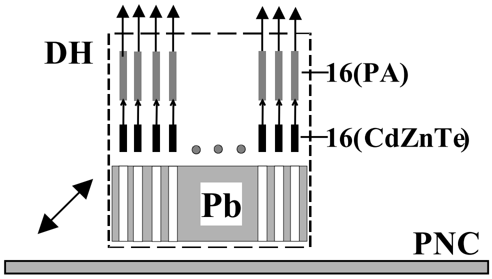

Рис. 10. Розміщення детекторної головки на PNC

Умови реєстрації вихідного з PNC випромінювання одиночним детектором були заздалегідь досліджені й оптимізовані методом комп'ютерного моделювання на основі програмної системи PENELOPE. Модельований пристрій складається з радіоактивної пластини (PNC – джерело фотонів), коліматора С і чутливої пластини (детектор – D), рис. 11.

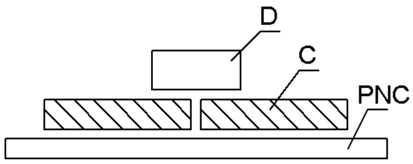

Рис. 11. Модельована геометрія умов реєстрації розподілу активності PNC

Методом комп’ютерного моделювання зокрема встановлено, що при Pb коліматорі 5 мм завтовшки і діаметром отвору 1.5 мм, можна забезпечити адекватне відтворення розподілу поверхневої активності шляхом одновимірного сканування PNC за допомогою DH нормальної лінії детекторів.

До складу основного радіометричного блоку гамма-сканера (див.рис.12) входить шістнадцятиканальний формуючий підсилювач (AF-16), дискримінатор (DC-16), стробований лічильник імпульсів (SC-16), програмований генератор стробів (SG) і джерело високої напруги (HV) для живлення матриці детекторів. Всі блоки виконані в стандарті КАМАК (див.рис.13).

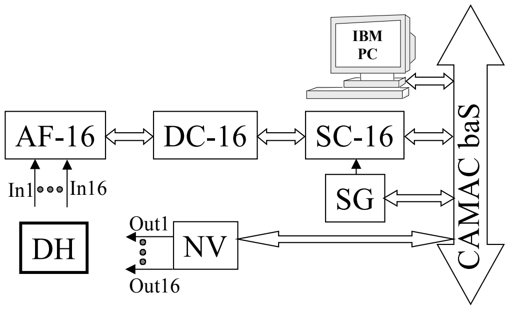

Рис. 12. Блок-схема гамма-сканера

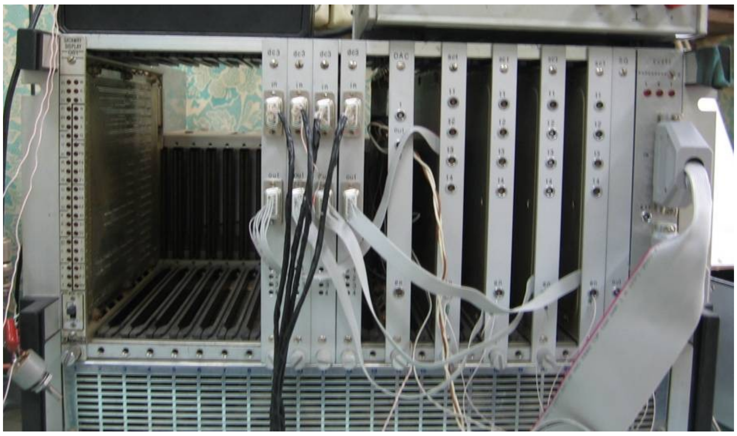

Рис. 13. Зовнішній вигляд основного радіометричного блоку в крейті КАМАК

Можливості запропонованого методу і устаткування продемонстровані під час дослідження джерела гальмівного випромінювання на базі прискорювача КУТ-20. На рис.14 наведено профіль потоку гальмівного випромінювання, отриманий шляхом сканування PNC з нікелю.

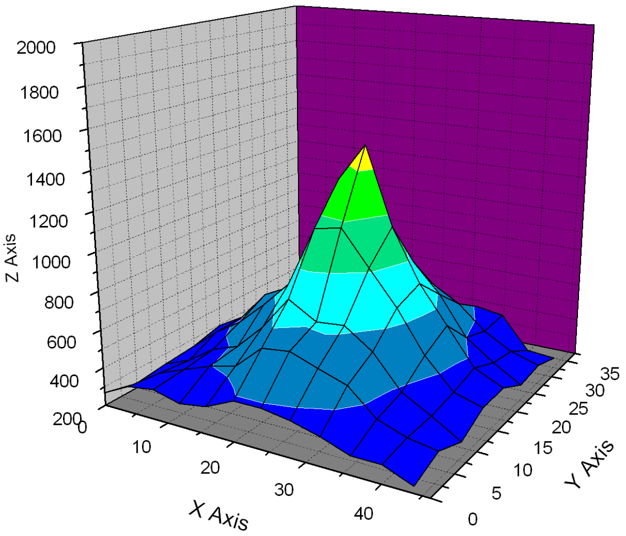

Рис. 14. Двовимірний розподіл щільності потоку гальмівного випромінювання

У ***висновках*** сформульовано основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації викладено результати дослідження фізичних процесів, що протікають у напівпровідникових детекторах з CdTe(CdZnTe) під впливом рентгенівського і γ-випромінювання високої інтенсивності. На основі цих результатів вирішено важливу наукову задачу з розробки методів аналізу та проведення досліджень характеристик джерел високоенергетичного фотонного випромінювання різної природи (гальмівне випромінювання прискорювачів електронів, радіонуклідні джерела γ-випромінювання складної просторової конфігурації тощо) та розроблено метод фотоядерного конвертера для вимірювання розподілу щільності потоку високоенергетичних фотонів .

1. В результаті проведення дослідження електрофізичних властивостей CdTe (CdZnTe) детекторів встановлено залежності між їх електрофізичними й спектрометричними характеристиками. На підставі цих залежностей розроблені ефективні методи поліпшення радіометричних і спектрометричних характеристик пристроїв детектування рентгенівського та γ-випромінювання високої інтенсивності.

2. Отримано дані щодо радіаційного ресурсу спектрометричних детекторів на основі CdTe (CdZnTe) у полі гальмівного випромінювання високої інтенсивності.

3. На основі розроблених високоефективних детекторів з CdTe (CdZnTe) створено експериментальні зразки багатоканальних радіометричних і спектрометричних блоків детектування

рентгенівського та γ-випромінювань і продемонстровано їх можливості для аналізу просторово-енергетичних характеристик джерел рентгенівського та γ-випромінювання високої інтенсивності.

4. Запропоновано метод фотоядерного конвертера та розроблено апаратуру на основі CdTe (CdZnTe) для просторово-енергетичного аналізу потоку високоенергетичного гальмівного випромінювання високої потужності, використовуваного у фотоядерних дослідженнях і технологіях.

5. Проведено аналіз просторово-енергетичного розподілу потоку гальмівного випромінювання прискорювачів електронів з енергією до 100 МеВ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Давыдов Л.Н. Исследование радиационной стойкости CdTe и CdZnTe детекторов для спектрометрии гамма-излучения / Л.Н. Давыдов, И.Н. Шляхов, В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, А.С. Абызов, С.П. Карасев, А. Захарченко // Труды 16 международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению XVI-ICPRP, 6-11 сентября 2004, Алушта, Крым, с. 372.

2. Давыдов Л.Н. Влияние облучения электронами и гамма-квантами на электрофизические свойства полупроводниковых детекторов из CdTe и CdZnTe / Л.Н. Давыдов, В.Н. Борисенко, А.А. Захарченко, В.Е. Кутний, Д.В. Кутний, Д.В. Наконечный, А.В. Рыбка, И.Н. Шляхов // Труды XVII международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. 4—9 сентября 2006 г. Алушта, Крым. С. 287—288.

3. Давыдов Л.Н. Радиационная стойкость полупроводниковых детекторов корпускулярного и гамма-излучения / Л.Н. Давыдов, А.А. Захарченко, Д.В. Кутний, В.Е. Кутний, И.М. Неклюдов, А.В. Рыбка, И.Н. Шляхов // Вестник ХНУ 2005, № 627. Серия физическая "Ядра, частицы, поля" вып. 1 (26). С. 3–22.

4. Левенец В.В. Спектрометрия гамма- и альфа-излучений полупроводниковыми детекторами на основе CdTe (CdZnTe), изготовленными

в ННЦ ХФТИ / В.В. Левенец, А.П. Омельник, А.А. Щур, В.Н. Борисенко, В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, И.Н Шляхов, А.А. Захарченко // Proceedings of International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-2006) Kyiv, Ukraine, 29 May – 3 June 2006. – С. 847–851.

5. A.V. Rybka, L.N. Davydov, I.N. Shlyakhov, V.E. Kutny, I.M. Prokhoretz, D.V. Kutny, A.N. Orobinsky. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors Nucl. Instr. and Meth. A: 2004. Vol. 531, pp 147–156.

6. Dikiy N.P. Electron Linac Production of Co-57 for Gamma-Chamber Calibhration / N.P. Dikiy, A.N. Dovbnya, O.A. Repikhov, I.N. Shlyakhov, Ja.N. Kravchenko // Problems of Atomic Science and Technology (PAST). – 2001. – №5. – Ser.: Nuclear Physics Investigations (NPhI) (39). – P.2002–02.

7. Карасев С.П. Применение CdZnTe детекторов в исследованиях пространственно-энергетической структуры высокоэнергетичного тормозного излучения для фотоядерных технологий / С.П. Карасев, В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, В.А. Шевченко, И.Н. Шляхов, А.Э Тенишев, В.Л. Уваров, В.Е. Кутний, Д.В. Кутний, Д.В. Наконечный, А.В. Рыбка // Труды XVII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. 4 – 9 сентября 2006. Алушта (Украина). С. 318.

8. Dovbnya N.A. Application of CdTe (CdZnTe) Detectors for Radioactive Waste Characterization / N.A. Dovbnya, S.P. Karasyov, V.E. Kutny, A.V. Rybka, I.N. Shlyakhov // PAST. – 2002 – №2, Ser.: NPhI (40). – P.55–57

9. Никифоров В.И. Система измерения профиля потока высокоэнергетичного тормозного излучения / В.И. Никифоров, Р.И. Помацалюк, В.А. Шевченко, И.Н. Шляхов, Н.А. Шляхов, А.Э Тенишев // ВАНТ. 2008. – № 3. – Сер. ЯФИ (49). С. 196–200.

10. Малыхина Т.В. Исследование поля смешанного X,n-излучения при фотоядерном производстве изотопов / Т.В. Малыхина, А.А. Торговкин, А.В. Торговкин, В.А. Шевченко, И.Н. Шляхов, Б.И. Шраменко // PAST. – 2008. – №1. Series: NPI (47). – P.184–188.

11. Biller E.Z. Distributed converter for high-brightness bremstrahlung generation / E.Z.Biller, V.I.Nikiforov, A.Eh.Tenishev, A.V.Torgovkin, V.L.Uvarov, V.A.Shevchenko, I.N.Shlyakhov, B.I.Shramenko, V.F.Zhiglo // PAST. – 2010. – №3. Series: NPI (54). – P.1351–39.

АНОТАЦІЯ

Шляхов І.М. Застосування детекторів на основі напівпровідникових сполук CdTe і CdZnTe у задачах аналізу джерел γ-випромінювання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі – розробці методів і засобів аналізу джерел високоенергетичного рентгенівського та γ-випромінювання в широкому діапазоні параметрів останніх за інтенсивністю, енергією фотонів, геометричними характеристиками за допомогою детекторів на основі CdTe і CdZnTe.

У роботі проведено аналіз і оптимізацію умов формування сигналу для реалізації режиму радіометра-спектрометра на CdTe (CdZnTe), проведено дослідження радіаційної стійкості спектрометричних детекторів і особливості їх роботи в умовах великих статистичних завантажень, показано результати розробки блоків детектування різного призначення: для роботи в режимі радіаційної аварії, аналізу ізотопного складу РАВ, а також визначення геометричних характеристик поля γ-випромінювання. Крім того, наведено розроблений в межах дисертаційної роботи метод фотоядерного конвертера, результати комп'ютерного моделювання, описано апаратуру для реалізації методу та алгоритм обробки результатів вимірювання.

Ключові слова: CdTe (CdZnTe), γ-випромінювання, радіометр-спектрометр, зарядочутливий передпідсилювач, радіаційна стійкість, спектрометричні детектори, РАВ, геометричні характеристики поля γ- випромінювання, метод фотоядерного конвертера, гамма-сканер.

АННОТАЦИЯ

Шляхов И.Н. Применение детекторов на основе полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe в задачах анализа источников γ-излучения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – Харьков, 2012.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи – разработке методов и средств анализа источников высокоэнергетичного рентгеновского и γ-излучения в широком диапазоне параметров последних по интенсивности, энергии фотонов и геометрическим характеристикам с помощью детекторов на основе CdTe и CdZnTe.

Первый раздел посвящен обзору существующих методов и средств анализа источников γ-излучения полупроводниковыми детекторами. Сформулированы требования к материалу для изготовления твердотельного детектора. Рассмотрены особенности работы детекторов в режиме радиометрии и спектрометрии. Проанализированы требования к аппаратуре для полупроводниковой γ-спектрометрии.

Во втором разделе проведены анализ и оптимизация условий формирования сигнала для реализации режима радиометра-спектрометра на основе CdTe (CdZnTe). Обоснованы требования, предъявляемые к зарядочувствительному предусилителю и усилителю-формирователю радиометра-спектрометра. Предложена оптимизированная схема предусилителя для работы с CdTe (CdZnTe) детекторами.

В третьем разделе проведено исследование радиационной стойкости спектрометрических детекторов и особенностей их работы в условиях больших статистических загрузок. Испытания

радиационной стойкости проводились в поле тормозного излучения линейного ускорителя электронов. После облучения детекторы показали уменьшение области линейной зависимости ВАХ и увеличение токов утечки.

В четвертом разделе показаны результаты разработки блоков детектирования различного назначения: для работы в режиме радиационной аварии, анализа изотопного состава РАО, а также определения геометрических характеристик поля γ-излучения. Продемонстрирована возможность повышения энергетического разрешения неохлаждаемого гамма-спектрометра с CdZnTe детектором путем улучшения шумовых характеристик предварительного усилителя.

В пятом разделе представлен разработанный в рамках диссертационной работы метод фотоядерного конвертера для измерения профиля потока высокоэнергетичных фотонов. Приведены результаты компьютерного моделирования, описана аппаратура для реализации метода и алгоритм обработки результатов измерения. Для дистанционного автоматического измерения распределения активности был разработан и изготовлен специальный прибор – гамма-сканер. Принцип работы прибора основан на регистрации 2D распределения поверхностной активности при помощи линейки из 16-ти заколлимированных детекторов на основе CdZnTe.

Ключевые слова: CdTe (CdZnTe), γ-излучение, радиометр-спектрометр, зарядочувствительный предусилитель, радиационная стойкость, спектрометрический детектор, РАО, геометрическая характеристика поля γ-излучения, фотоядерный конвертер (PNC), гамма-сканер.

ABSTRACT

Shlyakhov I.N. Application of detectors on the basis of the CdTe and CdZnTe semiconductor compounds in problems of analysis of γ-sources. – Manuscript.

The thesis on competition of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on a speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkov national university of radioelectronics. – Kharkov, 2012.

The thesis is devoted to the solution of an urgent scientific and practical problem – development of methods and means for analysis of high-energy X- and γ-radiation sources in a wide range of parameters: intensity, energy of gammas as well as geometric characteristics with the help of detectors on the basis of CdTe and CdZnTe.

Analysis and optimization of conditions of a signal formation for realization of radiometer-spectrometer mode in a device on the basis of CdTe (CdZnTe) are carried out in the work. The study of radiation hardness of the spectrometer detectors as well as the features of their operation under high statistical capacity is conducted. The results of the design of detection devices for different purposes are

shown: for a radiation accident regime, isotope analysis of radioactive waste, and determination of geometrical characteristics of γ-radiation field. In addition, a method of photonuclear converter (PNC) developed in the framework of the thesis activity is represented. The results of computer simulation as well as equipment for method realization and an algorithm of the measuring result processing are given.

Key words: CdTe (CdZnTe), γ-radiation, radiometer – spectrometer, charge-sensitive preamplifier, radiation hardness, spectrometer detector, radioactive waste, geometric characteristic of γ-radiation field, photonuclear converter (PNC), γ- scanner.

Підп. до друку 6.06.2012. Формат 60х84 $^{1}/_{16.}$ Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,2. Облік. вид. арк. 1,1. Тираж 100.
Зам. № 2-529. Ціна договірна.

ХНУРЕ, Україна, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, пр. Леніна, 14