МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр»

на тему: «Неохолоджувані детектори X/Y-випромінювання на основі напівпровідників Cd(Zn)Te»

Виконав : студент 4 курсу, групи НФ-41
Анастасія ПОЛЯКОВА
Спеціальність: 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма: прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доц.
Олександр КУЛИК

Рецензент:

Харків - 2021 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) __бакалавр
Напрям підготовки 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.І.Ткаченко
підпис

"____"_____2021_року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Поляковій Анастасії Олегівні

1. Тема роботи «Неохолоджувані детектори X/γ-випромінювання на основі напівпровідників Cd(Zn)Te»

керівник роботи Кулик Олександр Петрович, к. ф.-м. н, доцент

затверджені наказом по університету від "__" _____20__р. №_____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

Провести аналітичний огляд літератури щодо фізичних властивостей напівпровідників Cd(Zn)Te (CZT) у якості детекторів X/γ-випромінювання. Проаналізувати тенденції удосконалення детекторів на основі CZT. Порівняти фізичні та електронні властивості CZT з властивостями інших напівпровідникових сполук, що можуть використовуватися у якості детекторів X/γ-випромінювання. Дослідити вплив робочої температури CZT-детекторів на їх характеристики.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вивчення явища електронно-діркового переходу та його фізичних характеристик.
2	Аналіз методик формування p-n-переходу в напівпровідниках на основі CdTe.
3	З’ясування фізичних та електронних характеристик напівпровідників Cd(Zn)Te, що виділяють їх серед інших подібних матеріалів для виготовлення детекторів X/γ-випромінювання.
4	Огляд основних тенденцій удосконалення детекторів на основі CZT.
5	Дослідження температурних режимів термоелектричного пристрою для покращення показників CZT-детектора.
6	Значимість зниженої стабільної робочої температури для ефективності CZT-детектора. Оформлення та написання бакалаврської роботи.

5. Дата видачі завдання _____

Студент _____ А.О. Полякова

Керівник роботи _____ О.П. Кулик

Перелік скорочень та абревіатур

ОЧГ- особливо чистий германій

CZT- теллурид цинка-кадмія

FWHM- повна ширина на пів висоті

ДІВ- джерело іонізуючого випромінювання

ENC-еквівалентний шумовий заряд

RTSD – неохолоджувані детектори кімнатних температур

РЕФЕРАТ

Полякова Анастасія Олегівна «Неохолоджувані детектори X/γ-випромінювання на основі напівпровідників Cd(Zn)Te» (випускна робота бакалавра), - Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2021.- __ с.

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків; містить 22 рисунки, 1 таблицю, список використаних джерел з 10 найменувань.

Проаналізовано сучасні тенденції удосконалення детекторів на основі напівпровідників Cd(Zn)Te (CZT). Досліджено температурні режими розробленого термоелектричного пристрою для покращення спектральних характеристик CZT-детектора. Встановлено значимість стабільно знижених по відношенню до температури навколишнього середовища температур для ефективної роботи CZT-детектора.

Ключові слова: CZT – матеріали, неохолоджувані детектори, X/γ-випромінювання, енергетична роздільна здатність, термоелектричні пристрої.

ABSTRACT

Polyakova Anastasia "Uncooled detectors of X / γ-radiation based on Cd (Zn) Te semiconductors" (bachelor's thesis), - Kharkov: KhNU named after V.N. Karazina, 2021.- __ p.

The work consists of an introduction, three sections, conclusions; contains 22 figures, 1 table, a list of sources used with 8 items.

Modern tendencies of improvement of detectors on the basis of Cd (Zn) Te (CZT) semiconductors are analyzed. The temperature regimes of the developed thermoelectric device for improving the spectral characteristics of the CZT detector have been studied. The significance of temperatures steadily reduced in relation to the ambient temperature for efficient operation of the CZT-detector is established.

Keywords: CZT - materials, uncooled detectors, X / γ-radiation, energy resolution, thermoelectric devices.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 1

РОЗДІЛ 1. Використання напівпровідникових сполук у якості детекторів X/γ-випромінювання. 4

1.1. Фізичні процеси в електронно-дірковому переході (p-n-переході). 4

1.2. Параметри, характеристики, шуми напівпровідникових детекторів. 6

1.3. Переваги та недоліки напівпровідникових детекторів. 10

РОЗДІЛ 2. Детектори X/γ-випромінювання на основі Cd(Zn)Te (CZT). 12

2.1. Формування p-n-переходу в напівпровідниках на основі CdTe. 12

2.2. CZT–детектори у порівнянні з іншими напівпровідниковими детекторами. 16

2.3. Напрямки удосконалення детекторів на основі CZT. 18

РОЗДІЛ 3. Значимість теплових режимів для CZT–детекторів іонізуючих випромінювань. 22

3.1. Детектуючі характеристики CdTe-детекторів в залежності від робочої температури. 22

3.2. Встановлення температурних режимів термоелектричного пристрою для CZT-детектора. 30

3.3. Оптимізація робочих режимів CZT-детектора в залежності від температури, інтенсивності та дози опромінення. 36

ВСТУП

Протягом минулих десятиліть дуже швидко виник інтерес до напівпровідникових сполучень CdTe, CdZnTe, GaAs. Детектори займають провідні позиції задля вирішення енергетичних потреб людства шляхом перетворення енергії електромагнітного випромінювання, та зокрема сонячного, в електричне, також для детектування рентгенівського (гамма -) випромінювання, яке з одного боку є найбільш небезпечним для живих організмів, з іншого найбільш ефективне для візуалізації матеріальних об’єктів.

Важливим інструментом для пристроїв, за допомогою яких виявляють присутність радіоактивних матеріалів є напівпровідникові детектори за кімнатної температури. Майбутні зусилля для розвитку цієї сфери будуть направлені на створення RTSD, які виробляються з більш високим виходом, ніж той, що спостерігається при використанні переважних технологій напівпровідникових детекторів CZT чи HpGe. Для досягнення такої мети найбільш привабливими матеріалами виявляються гібридно органо-неорганічні та неорганічні з’єднання, які розроблялись протягом декількох останніх років.

Не звертаючи уваги на розвиток та використання CZT як RTSD датчик, виникають деякі труднощі з матеріалом, що обмежує його продуктивність при знаходженні гамма-променів. Початкові труднощі відбуваються через структурні дефекти, які проявляються у виді двійникування разом з дефектом границь зерна та пакування. Проте, CZT має схильність до високої густини дислокації, зерен та двійників. Окрім цих проблем, з якими зіштовхується такий матеріал через свою структуру, також виникає занепокоєння своєю вартістю для багатосерійного виробництва.

Властивості напівпровідникових детекторів, а саме широка заборонена зона, високий питомий опір та хороші транспортні характеристики електронів з часовою стабільністю параметрів свідчать про те, наскільки чудові матеріали на даному моменті їх розробки. У міру такого розвитку матеріалів та його

кращого розуміння кристалів з великими об’ємами та більш низькою концентрацією дефектів можна забезпечити кращі характеристики у гамма-області.

Відомо що, детектори CZT використовуються у сфері ядерної охорони для точного аналізу спектрів радіонуклідів, що потребує відповідно точного розуміння характеристик відклику напівпровідника CZT при різноманітних температурах, оскільки гамма-спектрометри повинні бути обладнані хорошою стабільністю в залежності від температури. Було встановлено, характеристики детекторів CZT значно покращуються внаслідок зниження температури кристалу CZT.

Можливість отримання на основі цих кристалів детекторів іонізуючого випромінювання, що мають невеликий об'єм та не потребують охолодження рідким азотом та забезпечують високу ефективність реєстрації гамма-випромінювання застосовується у різних сферах - медичні системи діагностики, ідентифікація матеріалів, космічна астрономія, промисловість, моніторинг довкілля, системи безпеки, контроль ядерних об’єктів та комп’ютерна томографія.

Мета. Метою роботи є виявлення температурних режимів поблизу кімнатних температур, що забезпечують найбільш ефективну роботу CZT-детектора.

Об’єкт дослідження. Діодні детектори на основі широкозонних напівпровідникових сполучень CdTe та CdZnTe.

Огляд основних тенденцій удосконалення детекторів на основі CZT. З’ясування значимості зниження та стабілізації робочої температури для ефективної роботи CZT-детектора. Дослідження температурних режимів термоелектричного пристрою для покращення показників CZT-детектора.

Особистий внесок. Було виконано огляд основних тенденцій удосконалення детекторів на основі CZT та з’ясовано значимість зниження та стабілізації робочої температури для ефективної роботи CZT-детектора.

Досліджено можливість покращення спектральних характеристик CZT-детектора шляхом забезпечення стабільно зниженого по відношенню до температури навколишнього середовища температурного режиму його роботи. Практична цінність роботи полягає в удосконаленні установки, що дозволяє забезпечити стабільну роботу детектора за температури, яка на 2-3 десятки градусів нижча за температуру оточуючого середовища і попереджує ефект «запотівання» детектора. Показано, що за таких умов високі значення енергетичної роздільності CZT-детекторів можуть бути досягнуті за значно менших значень напруги зміщення.

РОЗДІЛ 1. Використання напівпровідникових сполук у якості детекторів X/γ-випромінювання.

1.1. Фізичні процеси в електронно-дірковому переході (p-n-переході).

Зазвичай, у більшості напівпровідникових пристроїв використовуються кристали з двома або більше ділянками з різним струмом провідності (n та p типу). При отриманні двошарової структури із шару n та p типу, як правило, концентрація домішок у шарі несиметрична – один із типів має вищу концентрацію основних носіїв та більшу електропровідність.

Електронно-дірковим переходом або p-n-переходом називають область, яка розміщена біля металургійної границі між n та p шару. Якщо розглянути процеси в p-n-переході за відсутності зовнішнього електричного поля, то через різницю концентрацій головних носіїв в p та n шарах відбувається процес дифузії через перехід носіїв зарядів від області з високою концентрацією, до області з пониженою концентрацією носіїв. Одночасно головні носії в p-області, тобто дірки, дифундують до n-шару, а головні носії n-шару(електрони), дифундують до p-шару.

Під впливом сил дифузії переходячи металургійну границю, носії рекомбінують з основними носіями іншого шару. Завдяки виходу головних носіїв з одного шару, в інший та їх рекомбінації в іншому шарі біля металургійної границі виникає область, з’єднана рухомими носіями заряду та володіючи високим опором (замикальний шар). У замикальному шарі порушується баланс позитивних та негативних зарядів, тому що при зменшенні концентрації рухомих носіїв виявляється некомпенсований об’ємний заряд нерухомих іонів домішок: у n-шарі позитивних, а p-шарі негативних іонів.

Електричне поле, що виникає всередині замикальному шару, викликає спрямований рух носіїв через перехід дрейфовий струм, який направлений назустріч дифузійній складовій струму через перехід.

Ріст електричного поля та потенціального бар’єра виникає через дифузію носіїв, при цьому росте дрейфовий струм. Якщо сумарний струм через прохід рівний нулю, то ріст подвійного електричного шару припиняється, що відповідає рівноважному стану p-n-переходу за відсутності зовнішнього електричного поля.

Перехід має подвійний електричний шар, ширина якого в слабо легованій n-області більша, тому що ширина залежить від концентрації іонів домішок у шарі(чим менша концентрація, тим більша концентрація домішок).

При підключенні двошарового напівпровідника до електричного ланцюга та прикладеної напруги(до n-шару мінус, p-шару плюс), майже вся напруга прикладена до замикального шару, як до ділянки з найбільшим опором, через це результуючу напруженість поля у замикальному шарі знижається. В результаті цього збільшується кількість носіїв, що мають енергією, достатньою для подолання потенційного бар’єра та зростає дифузійна складова струму через перехід. Через те, що дрейфова складова визначається тільки кількістю неголовних носіїв, відповідних до замикального шару у процесі теплового руху, дрейфовий струм не неголовних носіїв не залежить від прикладеної напруги.
Таким чином, сумарний струм через перехід більше нуля.($I_a = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} > 0$). Для протікання прямого струму до p-n-переходу достатньо прикласти напругу, яка вимірюється долями вольта. Зменшення результуючого поля у p-n-переході приводить до зменшення об’ємного заряду та звуженню замикального шару.

Зворотне зміщення переходу призводить до збільшування результуючого поля в замикальному шарі та росту потенційного бар’єра, дифузія носіїв через перехід стає майже неможливою. В такому випадку поле p-n-переходу втягує всі відповідні до нього неголовні носії незалежно від потенційного бар’єра та через перехід проходить струм тільки неголовних носіїв: струм дірок з n-області в p-шар та електронів з p до n-шару.
Відношення прямого та зворотного струму p-n-переходу говорить про те, що провідність p-n-переходу односпрямована, тобто про його випрямлячу дію.

1.2. Параметри, характеристики, шуми напівпровідникових детекторів.

Для використання напівпровідникових сполук у якості детекторів слід звернути увагу на параметри оптичного випромінювання, такі як: довжина хвилі λ, що відповідає максимальній спектральній потужності випромінювання Ф; потік випромінювання Ф (або потужність випромінювання), що падає на фотоприймач; ширину спектра випромінювання $\Delta\lambda$ джерела оптичного сигналу та часові параметри(частота модуляції або тривалість імпульсів).

Червону межу фотоефекту мають фотоприймачі з внутрішнім фотоефектом $\lambda_{max} = \frac{hc}{E_g}$. Чутливість можна задати різними параметрами – чутливість за напругою, питомою виявною здатністю, зовнішньою квантовою ефективністю та струмом.

Відношення приросту струму фотоприймача до приросту потоку випромінювання називають чутливістю за струмом. Наприклад, деякі фотоелектронні помножувачі мають струмову чутливість до 1000А/Вт, але це не означає, що за освітлення фотокатоду випромінювання потужністю в 1Вт можемо отримати фотострум в 1000А, який зростатиме відповідно до освітленості до декількох десятків мікроампер, щоб потім зайти в область насичення та перестати зростати з ростом освітленості.

Відношення приросту напруги на опорі навантаження фотоприймача до приросту потоку випромінювання називають чутливістю за напругою. Для узгодження приймача сигналів та опорів джерела, при якому мінімально втрачається енергія сигналу та вольтова чутливість була максимальною, опір навантаження повинен бути приблизно рівним внутрішньому опору фотоприймача.

Перераховані чутливості залежать від складу спектрального випромінювання, тоді потужність буде різною через реакцію фотоприймача на лазерне та сонячне випромінювання. Зазвичай, спектральну чутливість виражають для паспортних даних через енергетичні параметри випромінювання та або фотометричні. Завдяки спектральній характеристиці можна визначити чуттєвість фотоприймача до випромінюванні та наявність

інших доступних фотоприймачів, які мають на даній довжині хвилі оптичного випромінювання, також дозволяє знаходити спектральний діапазон фотоприймача та оцінити ефективність використання оптичного випромінювання.

Кожен фотоприймач має максимальну довжину хвилі випромінювання, до якої у фотоприймачі не спостерігається фотоефект. «Червона» межа фотоефекту визначається енергією фотону, яка можливо буде передана зв'язному електрону, якої не вистачає щоб стати вільним. Тоді фотон що має меншу енергію може вивільнити електрон лише при передачі додаткової енергії від фотону. Найбільш довгохвильову межу фотоефекту мають матеріали з найвужчою забороненою зоною.

Чутливість фотоприймача до оптичного випромінювання зі стандартним спектром, що заданий моделлю абсолютно чорного тіла називають інтегральною чутливістю. Для визначення такої чутливості фотоприймача видимого діапазону цей спектр можна отримати від лампи розжарювання потужністю 100Вт з вольфрамовою спіраллю.

Відношення «сигнал/шум» або «еквівалентна потужність шуму» тобто, потужність випромінювання на вході фотоприймача, при якій смуга частот в 1Гц на виході потужності сигналу буде дорівнювати потужності шуму називають пороговим потоком випромінювання(порогова потужність випромінювання або порогова чутливість).

Фізичний зміст можна описати наступним чином, якщо випромінювання на вході без власного шуму(ідеальний фотоприймач) має середнє квадратичне значення потужності, при якому у фотоприймачі виникає шум, який дорівнює потужності власного шуму реального фотоприймача. Схожим по змісту також є параметр чутливості, при якому відношення «сигнал/шум» має задане значення, тобто визначається як потік випромінювання. Для порівняння фотоприймачів з різною площею світлочутливої поверхні використовують параметр питомої виявної здатності.

Частка перехопленого фотоприймачем потоку фотонів, що викликає у фотоприймачі появу вільних носіїв заряду називають квантовою ефективністю, яка зв’язана зі спектральною чутливістю. За фізичним змістом цей параметр є зовнішньою квантовою ефективністю, на противагу рідко вживаній внутрішній квантовій ефективності, тобто частці поглинутого фотоприймачем потоку фотонів, що викликає появу вільних носіїв заряду.

При охарактеризуванні елементу електричного ланцюга темновим опором, тобто до неосвітленого приймача прикладають робочу напругу, тоді через нього протікає темновий струм, який є складовою шумового струму. Як правило, темновий струм являється головною характеристикою фотоприймача, на відміну від інших шумів, що може швидко оцінити придатність фотоприймача для використання у даних умовах.

Число, що показує, у скільки разів зменшується відношення «сигнал/шум» після проходження сигналу через фотоприймач називають коефіцієнтом шуму. Для фотоприймачів з внутрішнім підсиленням коефіцієнт шуму зростає у разі підвищення коефіцієнта підсилення(помноження).

Ват-амперна характеристика, або енергетична характеристика фотоприймача показує залежність струму від потоку випромінювання, який може бути інтегральним або монохроматичним. Зазвичай, у досить широких межах така характеристика є лінійною. Світлова або люкс-амперна характеристика виступає як фотометричний аналог.

Частотна характеристика, при якій швидкодію характеризують параметром, що має назву стала часу, яка визначається конструкцією, матеріалом, режимом роботи та інерційністю фотоелектричного ефекту на якому працює фотоприймач. На довгохвильовій ділянці спектральної характеристики стала часу більша, від короткохвильової ділянки. Як правило, частотну характеристику подають у вигляді залежності відносної величини фотоструму від частоти.

Робоча напруга фотоприймача, яка вказана у паспорті фотоприймача, гарантує довгострокову роботу приладу при достатньо високих показниках

якості, тобто при збільшенні напруги швидкодія та чутливість фотоприймача підвищується, через це збільшується ймовірність збою. Для підвищення добротності, яка є узагальненою характеристикою фотоприймача, для деяких вона є сталою величиною, необхідно удосконалити його технології та додати використання нових матеріалів.

Шуми притаманні напівпровідниковим фотоприймачам, що можна спостерігати і в інших видах напівпровідникових приладах, але існують і специфічні шуми.

Тепловий шум. Хаотичний тепловий рух носіїв заряду у напівпровіднику призводить до появи випадкових коливань струму, що протікає через прилад та відповідно до флуктуацій напруги на ньому, тим більших, чим вищий внутрішній опір даного приладу.[1] Сама назва «теплового шуму» свідчить про те, що при зниженні температури напівпровідника такий шум зменшується. Завдяки спектральній потужності теплового шуму, що залишається незмінною до частот 1012Гц, можна вважати шумом, що не залежить від частоти або білим шумом. В електронному пристрої кожен резистор є генератором теплового шуму, та визначає чутливість багатьох датчиків.

Дробовий шум обумовлений дискретною природою електронів та фотонів. Зазвичай, під цією назвою поєднаний шум фотонового засвічування фотоприймача, шум джерела випромінювання, шум , шум генераційно-рекомбінований та флуктуації струму під час перетину електронами та дірками p-n переходу та шум темнового струму.

Генераційно-рекомбінований шум. Такий шум зумовлений флуктуаціями швидкості генерації та рекомбінації носів заряду та частоти їх захоплення пастками. Такі флуктуації призводять до випадкових змін часу життя носіїв та змін концентрації. [1]

Фотонний шум. Такий шум складається з флуктуацій потужності джерела оптичного сигналу та фонового засвічування фотоприймача. Велику роль має фотонове засвічування в інфрачервоних фотоприймачів, через те, що від видимого випромінювання можна огородитися екраном, але захиститися від

інфрачервоного випромінювання неможливо. Якщо б наші очі були чутливі до такого випромінювання, то усі б предмети навіть вночі були б такими ж освітленими, як і при сонячному світлі. Говорять, що інфрачервоний фотоприймач працює у режимі обмеження фотоном коли приймач має малі власні шуми, які менші за фотонний шум. Якщо власними шумами можна знехтувати, то такий фотоприймач є непоганим наближенням до ідеального приймача.

1.3. Переваги та недоліки напівпровідникових детекторів.

Протягом багатьох десятиліть безперечним лідером серед багатьох інших детекторів у гамма-спектрометрії завдяки гарному енергетичному розширенню та високій ефективності реєстрації гамма-випромінювання являються детектори з особливо чистого германію(ОЧГ). Через це, на основі ОЧГ- детекторів випускається широкий спектр апаратури з метою вирішення різних задач охорони навколишнього середовища та атомної енергетики, геології та медицини, наукових досліджень та іншого застосування.

ОЧГ був признаний «досконалим» детектором для розпізнавання радіоізотопів. У нього приблизно в 40 разів краще енергетичне розширення(чуттєвість), ніж у сцинтиляційних систем та CZT. На відміну від детекторів з низьким розширенням, кристали ОЧГ повинні працювати за кріогенних температур, цю проблему було вирішено 25 років тому. Декілька сотень пристроїв, які працюють у реальному часі, свідчать про надійність сьогоднішніх мініатюрних охолоджувачів на основі циклу Стерлінга, що були використані для цієї цілі. За характерною чутливістю ОЧГ детекторів криються гранично високі робочі характеристики, що виражаються при високій точності визначення (ціллю являється нульовий рівень помилкових позитивних або помилкових негативних результатів), які залежать від програмувальних алгоритмів. Така практичність у використанні залежить від надійності обладнання та призначеного для користувача інтерфейсу, що у свою чергу, має бути простим у розумінні.

Структура детектора ОЧГ має циліндричну форму з діаметром до 70 мм та довжиною до 85 мм, що розміщений у корпусі з тепло відводом занурений у сосуд Дьюара, який протягом довгих років є незамінним супутником ОЧГ-детекторів. Для живлення детекторів використовується постійне джерело високої напруги до 5 кВ. Зазвичай, потребується плавне збільшення напруги до робочого рівня протягом декількох хвилин. Спеціальні типи детекторів для реєстрації низько енергетичного спектра мають невелику товщину та обладнані вхідним вікном з тонкої берилієвої фольги. Досить часто при вимірюваннях використовується свинцевий коліматор, який екранізує бічну поверхню детектора від зовнішнього фону.

Принцип роботи ОЧГ-детектора полягає у забезпеченні майже повної відсутності вільних зарядів у основному об’ємі детектора та відповідно дуже малого темнового струму. При проходженні гамма-кванту через матеріал детектора відбувається конверсія його енергії на виникнення вільних зарядів у напівпровіднику.

Утворений заряд створює імпульс струму між електродами, який пропорційний енергії переданій гамма-квантом. Енергетичне розширення визначається зі статистичних міркувань та пропорціональному квадратному кореню з кількості утворених зарядів при повному поглинанні гамма-кванту матеріалом детектора. Такому процесу на отриманому гамма-спектрі відповідає пік повного поглинання та в якості основної характеристики детектора приводиться ширина даного піка на половині його висоті. Окрім піка повного поглинання з виходу детектора можуть бути отримані імпульси відповідні частковому поглинанню. Можливе народження електрон-позитронної пари для досить високих енергій гамма-кванта, де кінетична енергія електрону та позитрону також витрачається на створення вільних зарядів, після зупинки позитрону відбувається його анігіляція з народженням вторинної пари гамма-квантів та один або обоє можуть покинути детектор без взаємодії.

РОЗДІЛ 2. Детектори X/γ-випромінювання на основі Cd(Zn)Te (CZT).

2.1. Формування p-n-переходу в напівпровідниках на основі CdTe.

Серед інших напівпровідників CdTe є основним та перспективним матеріалом для ядерних детекторів, завдяки своїм фізичним характеристикам – великі атомні числа, значний переріз для фотоелектричного поглинання, достатню ширину забороненої зони, що можуть мати високий електричний опір. Велика перевага полягає у можливості функціонування при кімнатній температурі без охолодження, що є досить важливим для портативних систем.

Струм протікання є однією з важливих характеристик детекторів, чим вище енергетична роздільна здатність детектора тим стабільніші спектральні та електричні характеристики, але опір промислових кристалів CdTe не настільки високий для забезпечення низького струму протікання, через це детектори на основі CdTe почали розробляти як діодні структури.

Для формування електричного p-n-переходу у поверхневій області кристалу використовують різні методи. При проведенні експериментів були використані монокристалічні компенсовані хлором пластини CdTe p-подібного типу провідності при кімнатній температурі, лінійні розміри зразків 5×5×0,5 мм^3. Методом термічного напилення у вакуумі наносили електричні контакти (In та Au) на попередньо підготовлені поверхні, які пройшли хімічне очищення та полірувальне травлення зразків. Легування тонкого поверхневого шару напівпровідника було спричинено опромінюванням наносекундними імпульсами індієвого електрода, завдяки цьому структури In/CdTe/Au мали різкі випрямлячі властивості.

При дослідженнях формування p-n-переходів, оптимальних контактів та бар’єрних структур було виявлено, що лазерне опромінення CdTe у певному діапазоні густини енергії може приводити до модифікації дефектної структури проти поверхневого шару без вагомої зміни об’єму напівпровідника.

Суттєва різниця при дії імпульсів ексимерного або рубінового лазера на електричні властивості напівпровідників CdTe була виявлена при опроміненні

імпульсами лазера зі густиною енергії, що росте, зростає також провідність через формування тонкої плівки Te.

Не було виявлено суттєвих змін у провідності зразків при опроміненні кристалів CdTe імпульсами ексимерного KrF лазера, але є значна відмінність зі великою різницею(на декілька порядків більше) коефіцієнту поглинання у результатах впливу випромінювання ексимерного KrF (λ=248 нм) та рубінового (λ=694 нм) лазера. У випадку ексимерного KrF лазера поглинання відбувається у дуже тонкому (< 10 нм) шарі напівпровідника, тоді як при опроміненні рубіновим лазером збуджується шар товщиною > 170 нм. [3]

Результати досліджень спектрів фотопровідності є ще одним свідченням формування сильно легованого поверхневого шару у кристалах CdTe, опромінених з боку плівки In(рис.2.1). Щоб виготовити p-n діодну структуру на леговану грань кристалу CdTe наноситься індієвий електрод, а на протилежну - золотий, потім для прямого зміщення під'єднують до негативного потенціалу індієвий електрод. Виявлено, що зонна смуга спектру діодної структури In/CdTe/Au (криві 2 і 3) розташована у більш довгохвильовій області, ніж аналогічна смуга у спектрі оригінальних нелегованих кристалів CdTe (крива 1). [3]

Формування шару сильно легованою домішкою (в даному випадку ln), що складає малий донорний рівень у забороненій зоні напівпровідника пояснює довгохвильовий зсув «червоної» границі та довготривале відхилення максимуму спектра фотопровідності кристалів після лазерно-індукованого легування.

При прикладанні прямого чи зворотного зміщення короткохвильового крила у спектрах фотопровідності діодів знаходиться нижче або вище крила фотопровідності оригінального кристала, це показує наявність сильно фіксованого електричного поля у поверхневій ділянці кристалу після формування різкого p-n переходу та вплив поля на поверхневу рекомбінацію носіїв заряду. [3]

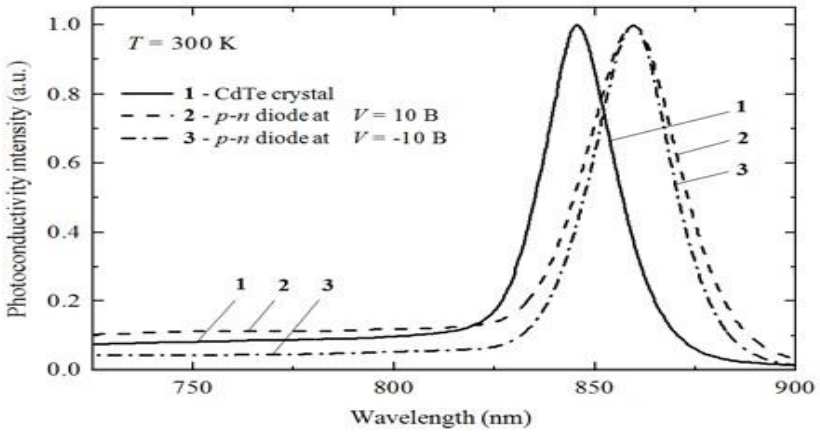


Рис. 2.1. Спектри фотопровідності нелегованого кристала CdTe (крива 1) і *p-n* діоду In/CdTe/Au при прямому (крива 2) та зворотному(крива 3) зміщеннях при T=300K.

Як правило, бар'єрні властивості має контакт метал-напівпровідник, через це головну роль у створених структурах займає сформований лазерно-індукованим легуванням p-n перехід. Щоб виявити легований шар були прибрані електричні контакти ln і Au, з двох сторін на зразок наносили нові контакти з ln.

Вольт-амперні характеристики асиметричні, що показують випрямлячі властивості структури In/CdTe/In, що характерно для діодних структур. В даній ситуації, це говорить про те, що у поверхневій області CdTe яка знаходилась під електродом ln опроміненим лазером, після легування поверхневого шару напівпровідника індієм був сформований p-n перехід.

Отже, випрямлячі властивості діодних структур In/CdTe/Au які були виготовлені при допомозі опромінення індієвого електрода наносекундними імпульсами лазеру оцінюються різким p-n переходом, що створюється на кордоні тонкого легованого індієм низькоомного поверхневого шару *n*-типу та об'ємної високоомної області кристалу *p*-CdTe.[3]

Про це свідчить те, що виміряна інтенсивність фотопровідність на стороні кристалу(контакти 1-2), яка була легована індієм, більш ніж на порядок величини вища, порівнюючи зі стороною, що не була опромінена(контакти 3-4). Схожий ефект у спектрах фотопровідності був помічений після опромінення

наносекундними імпульсами рубінового лазера.[3] При T=300K всі зроблені діоди In/CdTe/Au показували високі випрямлячі властивості із низьким струмом протікання в декілька наноампер чи менше.

На формування бар’єрної структури та збільшення поверхневого шару точковими дефектами, у більшості випадків акцепторного типу, впливає поширення густини енергії лазерних імпульсів. До створення p-n переходу у поверхневому шарі CdTe призводить опромінення зразків з раніш нанесеною плівкою легувального елементу індію.

Щоб дослідити спектральні та електричні характеристики потрібно досліджені зразки розрізати на пікселі, та розмістити їх на платі та під’єднати при допомозі тонких провідників до відповідних електричних схем та увімкнути до приладів, щоб зняти спектральні характеристики.

Досягали найменшого темнового струму протікання у детекторах, щоб об’єктивно проаналізувати спектр випромінювання радіоізотопів та проводили тестування створених структур на їх чутливість до випромінювання радіоізотопів.

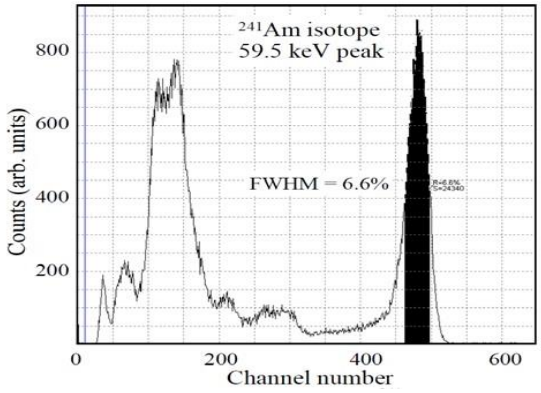


Рис.2.2. Спектр радіоізотопу ^{241}Am, зареєстрований діодною структурою In/CdTe/Au.

На рис.2.2 показано спектр радіоізотопу ^{241}Am, що зареєстрований діодною структурою In/CdTe/Au із *p-n* переходом. Ефективний метод формування детекторних структур з низьким струмом протікання та високою

спектральною роздільною здатністю є лазерно-індуковане легування поверхневого шару CdTe.[3]

2.2. CZT–детектори у порівнянні з іншими напівпровідниковими детекторами.

Були розглянуті високо розвинуті $CdTe$, $CdZnTe$, HgI_2, $TlBr$ для підкреслення потенціалу, який може виникнути із з'єднання RTSDs на просунутих стадіях технологічного розвитку.

Існує ряд вимог, які повинні бути виконані для користі радіаційних датчиків у якості інструментів, що виявляють вплив радіації. Найосновніші критерії такі: бути виготовленим з матеріалу, який ефективно поглинає гамма-промені та мати здатність створювати спектральний відклик, що дозволяє ідентифікувати та схарактеризувати радіоактивні джерела.

Детектори можуть забезпечувати високим співвідношенням «сигнал/шум» при взаємодії гамма-променів, що будуть здатні виявляти радіоактивні джерела, які задовольняють ці два критерії. Тоді детектор швидше ідентифікує та виявляє радіологічні загрози при кращому поєднанні ефективності дозволу сигналу в детекторі гамма-випромінюванні.

З'єднання на основі $Si, Ge, CdTe$ є більш поширеними сенсорними матеріалами. Найпоширенішим матеріалом для виявлення радіації, являється сцинтилятор Nal:Ti, що дозволяє створювати системи середнього розміру кристалів для ідентифікації багатьох ізотопів.

Порівнюючи Nal:Ti, відповідного розміру HpGe, можна знаходити та ідентифікувати джерела в порядку збільшення більш низьких потоків гамма-випромінювання. Має перевагу HpGe від механізму взаємодії, за допомогою якого напівпровідникові детектори регенерують сигнали гамма-випромінювання. Детектори HpGe повинні бути охолодженими до кріогенних температур для оптимального функціонування через початково низьке значення кімнатної температури, що являється недоліком.

З’єднання $CdTe, TlBr, Hgl_2$ усіх напівпровідникових сполук з привабливими електронними та фізичними властивостям $CdTe, CdZnTe$ (CZT) є передовим матеріалом датчиків RTSD. [4]

Однією з найбільш легованих сполук був успішно розроблений CdMnTe(CMT). При введенні Mn у кристалічну решітку CdTe вдвічі збільшується ширина смуги, ніж Zn. Набагато ближчий до одиниці коефіцієнт CMT ніж CZT, який допускає більш однорідний розподіл елементів у кристалах, завдяки цьому CMT показує виняткову продуктивність детектора.

Проте, CdTe ,CZT та CMT стримує наявність включень Te та осадів, але попри характерні проблеми CMT є достатньо хорошим матеріалом. Розвиток сполук подібних до CdTe з удосконаленням результатів продовжувалось замінивши аніон Te на Se, CdSe має широку заборонену зону через менший радіус Se у порівнянні з Te, що дозволяє кристалам виявляти більш високий питомий опір. Однією з особливостей CdTe є повна відсутність поляризаційних явищ. Аналогічно, сплавлення CdTe та CdSe разом дає з’єднання, яке добре працює у якості датчика випромінювання.

Для знаходження випромінювання використовують фізичні та атомні властивості TlBr, через те, що його густина є однією з найбільш високих серед RTSD. Не звертаючи уваги, на те, що TlBr має більш м’яку решітку через своє іонне походження, не має внутрішніх структурних дефектів, на відміну від кристалів CdTe. TlBr має деяку степінь захвату забороненої зони через точкові дефекти, як і більшість напівпровідників.

Tl_4Cdl_6 через високу напругу, виключної густини та атомному номеру для забезпечення високої гальмівний здатності відносно до падаючий випромінювання є більш перспективним.

Tl_6Sl_4 та Tl_6Sel_4 найбільш привабливим з цих складних з’єднань, які являються кристалами зі структурою P4/mnc з атомними, електронними та фізичними властивостями, що вже починають конкурувати з CZT.[4]

Розглядаючи будь-яке з’єднання, можна побачити, що кристал має надзвичайно високий опір. Як детектор, кристал на відміну від RTSD з’єднань є призначеним для використання у якості детекторів об’ємної форми.

Слід зазначити, що властивості цих напівпровідників, вказують на те, що на даному етапі розробки матеріал дуже перспективний та якісний.

2.3. Напрямки удосконалення детекторів на основі CZT.

Останнім часом, напівпровідникові детектори ядерного випромінювання дуже швидко розвиваються. Вони використовуються у різних областях: рентгенівські промені, гамма-випромінювання та ядерна фізика, та мають дуже хороші можливості візуалізації, хороше енергетичне розширення та здатність виготовлення компактних систем з дуже звабливими особливостями проти іншими типами детекторів (сцинтилятори та детектори газу).

Посеред складних напівпровідників CdTe та CdZnTe є найбільш перспективними матеріалами для детекторів випромінювання з гарним розширенням по енергії, роботою при кімнатній температурі та високою ефективністю виявлення, що дуже зручно для використання у гаммі та рентгенівських променях.

Ефект поляризації, тобто часова нестабільність при зміщенні є важливою проблемою детекторів CdTe, що приводить до залежного від часу зниженню швидкості рахунку та збору заряду. Звести до мінімуму ефекти поляризації можна використовуючи низький температурний режим роботи та високу напругу зміщення. Гарну продуктивність та часову стабільність показали детектори CdTe з контактами, що блокує та охолоджує компактними елементами Пельтье.

Зокрема, розвиваються два напрями досліджень: осадження товстих та тонких плівок.[5] Для того, щоб мінімізувати великі неоднорідності в кристали та оптимізувати електричні властивості використовують товсту плівку напилення.

Виготовлення металевих контактів на полу випромінений кристал CdTe з відтвореними електричними характеристиками і надзвичайною чуттєвістю електричних властивостей та необхідністю прикладання високої напруги зміщення до пристрою, для досягнення хорошої ефективності збору заряду призводить до відносно високих значень темнового струму. Через це, була запропонована нова структура: детектори з CdTe на основі гомоепітаксіального p-i-n діоду, у яких власна частина являється об’ємним кристалом з високим удільним опором(детекторної якості), у той час як n-i-p леговані- це гомоепітоксальні шари, що повинні мати більш нижчі значення темнового струму.[5]

Також проходить велика робота більш високих концентрацій електронів у шарі CdTe n-типу, як ріст матеріалу p-типу для реалізації остаточної структури p-i-n діоду.

Для покращення детекторів CdZnTe додають декілька відсотків цинку у розплав призводить до збільшення енергії створення дефекту. Високі об’ємні удільні опори та зниження густини дислокації, які призводять до більш низького струму витоку та більш високої температури експлуатації призводить збільшена забороненої зони.

Удільний опір CdZnTe зазвичай на один-два порядки більше, тобто струм витоку нижчий, що є важливо у детекторі, тому що дозволяє отримати менший струм витоку або застосувати більший напрям зміщення.[5]

Якість матеріалів залишається низькою, не дивлячись на дослідницькі зусилля по вдосконалення технологій вирощування кристалів. Низький одиничний вихід кристалів, який впливає на процес росту кристала являється проблемою що обмежує широке розповсюдження на основі CdZnTe. Взаємодія кристал-тигель є однією з причин виникнення двійників та границь зерен. Багато дослідників пропонують використовувати кварцові тиглі з вуглеводним покриттям або графітові. Шляхом своєчасного управління кутами змочування тигля, розплаву та кристалу можна уникнути контакту між кристалом, що росте, та тиглем.

В разі кристалів типу CdTe, Ge, та GaSb це можливо лише в умовах мікро гравітації або шляхом створення різниці тиску між кристалом та тиском між розплавом. Для подолання проблеми взаємодії тиглю та кристалу, італійська група розробила нову техніку вирощування, яка називають вертикальною інкапсульованим окисом бору, технікою Бріджмена, що показана на рис.2.3.[5]

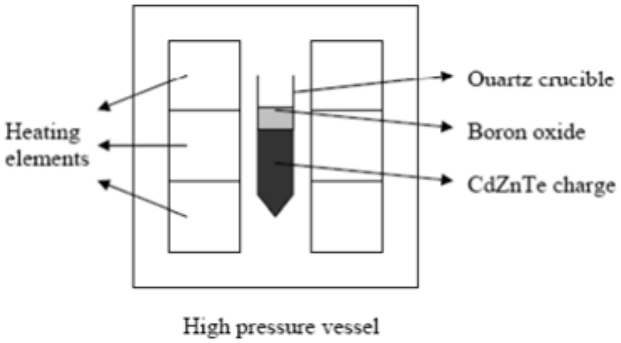


Рис.2.3. Установка для вирощування інкапсульованого оксиду бора для вертикального методу Бріджмена.

Як показано на рис.2.3., піч має три незалежних зони нагріву, температурний градієнт на кордоні розплав-кристал складає приблизно 10℃. Полікристалічний матеріал, що синтезує,CdZnTe перед вирощуванням піддається термообробці та обробляється для отримання певного складу, після чого заряджається до кварцової ампули. За рахунок підвищення температури печі, приблизно 450℃, оксид бору починає пом’якшуватись, при плавленні починається ріст. При закінченні росту, кристал витягується з ампули шляхом опускання у воду, що змушує оксид бору розширятися та руйнувати стінки ампули. Можливі втрати маси під час росту визначаються шляхом порівняння ваги кристалу, але при правильному проведенні процедури росту втрати маси не були виявлені. [5]

Погані властивості перенесення дірок CdZnTe та CdTe матеріали є критичною проблемою при розробці детекторів та гамма-випромінювання та понижає ефективність збору зарядів детекторами та створює асиметричний довгий хвіст у фото піках виміряних спектрів захват отворів. Для мінімізації цього ефекту було використано декілька методів.

Для розробки детекторів використовують методи, які засновані на зборі електронів, тобто детектори з одним носієм заряду або уніполярні детектори, що мають кращі транспортні властивості ніж у дірок. Покращує енергетичне розширення метод вимірювання одного носія заряду, але призводить до значного пониження чуттєвості.

На аналізі кореляцій між імпульсною висотою та часом наростання сигналів заснований інший електронний метод, де у якості альтернативи детальна конструкція електродів дає напівпровідниковим детекторам одноразовий збір заряду.

У астрофізичних пристроях висота сегментації детекторів та необхідні спектроскопічні характеристики дозволили б дуже чуттєві вимірювання рівня поляризації потоку від джерела високих енергій. CdZnTe та CdTe є дуже перспективними матеріалами для створення позиційно-чуттєвих спектрометрів шо потребує характеристиками. Такі детектори залучили багато уваги наукового товариства, що цікавиться використанням гамма та рентгенівського діапазону, а особливо реалізація спектроскопічного формувача зображення для дослідження Всесвіту.

За останнє десятиліття усе більш зусиль було прикладено на розробку пристроїв для медичного застосування пристроїв на основі детекторів CdTe та CdZnTe. Такі детектори, як і гамма-спектрометри та рентгенівські дуже конкурентоспроможні з традиційними системами на основі твердих сцинтиляторів, кремнієвих та германієвих детекторів.[5]

На розробку нової гамми камери на основі детекторів CdZnTe та CdTe підштовхнув інтерес до систем виявлення з внутрішнім просторовим та кращим енергетичним розширенням. Детектори CZT показують найкращі результати енергетичного розширення, ніж детектори Nal(Tl).[5]

Діяльність та дослідження розвитку CZT несуть в основному дві мети: розробити прототипи готових та працюючих детекторів для медичних та астрофізичних приладів та зростання виробництва CdTe спектрометричної якості та кристали CdZnTe в італійських лабораторіях.

РОЗДІЛ 3. Значимість теплових режимів для CZT–детекторів іонізуючих випромінювань.

3.1. Детектуючі характеристики CdTe-детекторів в залежності від робочої температури.

В попередніх розділах було показано, що телурид кадмію-цинку є напівпровідниковим детекторним матеріалом, який привертає велику увагу завдяки енергетичному розширенню та високому ефективному атомному номеру, для хорошої ефективності зупинки променів у широкій забороненій зоні (1,6 эВ) за кімнатної температури. Такі властивості дозволяють його використання в якості детектору рентгенівського випромінювання або гамма-випромінювання, що має широкий діапазон прикладних аспектів, включаючи візуалізацію у медичних цілях, ядерній спектроскопії та цілях безпеки. До низької абсолютної ефективності, що потребує досить тривалого часу вимірювання в багатьох пристроях призводить недолік, яким є обмеження максимального розміру напівпровідникового кристалу.

Зокрема, детектори телурид кадмію-цинку використовуються в області ядерної охорони для аналізу радіонуклідів. Характеристика відклику детектора CZT при різних температурах потрібна для точного аналізу спектрів радіонуклідів з використанням цих детекторів, так як гамма-спектрометри повинні мати хорошу стабільність в залежності від температури. Така вимога важлива, якщо спектральні данні будуть використовуватися для кількісного аналізу. Відомо, що характеристики детектору CZT значно покращуються за рахунок зниження температури кристалу телурид кадмію-цинку.

В даній роботі дослідження було направлено на визначення можливості аналізу радіонуклідів шляхом вимірювання енергетичного розширення детекторів CdTe та CdZnTe, що будуть використані для ідентифікації ядерних матеріалів.

Дослідження проводилися за допомогою детекторів, розроблених на основі напівпровідникового матеріалу (CdTe 5 x 5 x 0,5 мм^3), виготовленого

компанією Акорад (рис.3.1).

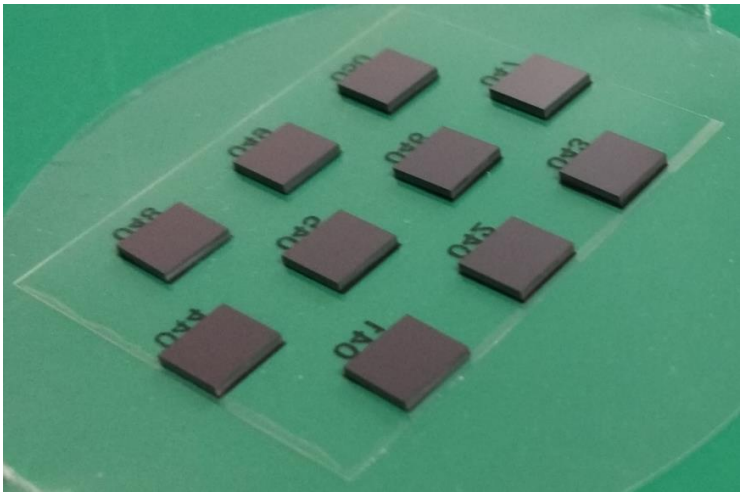


Рис.3.1. Напівпровідники, виготовлені компанією Акорад.

Ставилось за мету виконати вимірювання при різних температурах, близьких до температури навколишньої середовища, для вивчення температурної залежності енергетичного розширення та пікового коливання центру тяжіння детектору CdZnTe. Для цього використовувався метод охолодження за допомогою елемента Пельтье. Щоб перевірити ідентифікацію радіонуклідів використовували стандартне джерело радіонуклідів Am-241 (рис.3.2).

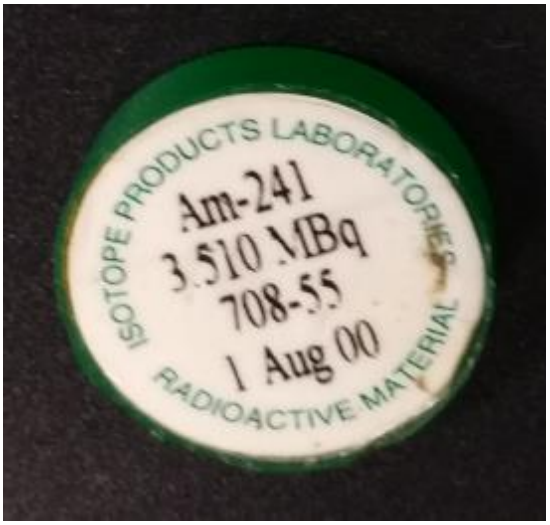


Рис.3.2. Джерело радіоактивного випромінювання Am-241.

За допомогою стандартної електроніки, яка складалася з попереднього підсилювача, підсилювача-формувача та багатоканального аналізатору (рис.3.3) були отримані спектри амплітуди імпульсів (рис.3.4).

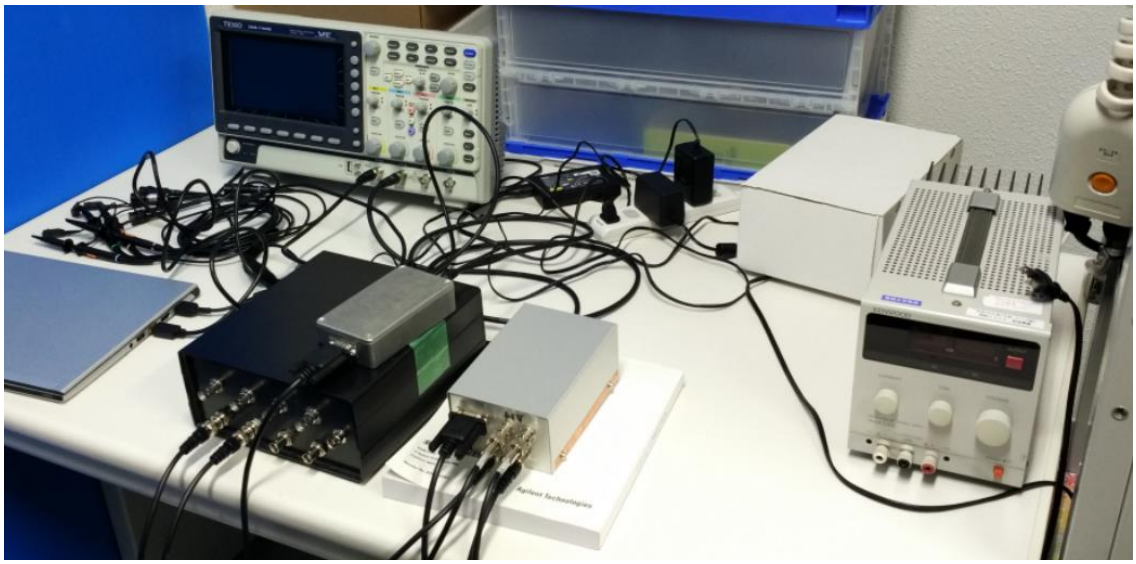


Рис.3.3. Устаткування для вимірювання енергетичних спектрів.

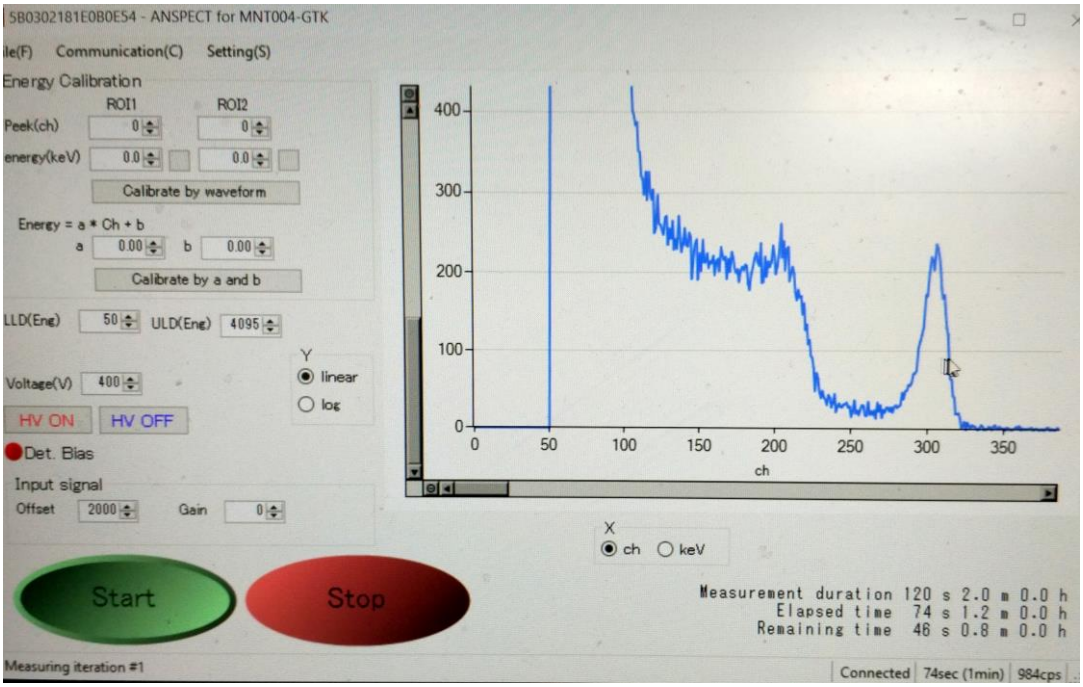


Рис.3.4. Енергетичний спектр, знятий детектором CZT за кімнатної температури.

Температурна залежність характеристик детекторів CZT раніше досліджувалася [5]. Було вивчено змінення FWHM та висоти піка в залежності від температури, також CZT детектор з термоелектричним охолодженням був дослідженим в проміжку температур від 30 до -40℃. Були виміряні енергетичні спектри гамма-випромінювання, такі як розширення по енергії та пікова флуктуація цетроїду, зокрема, при температурі детектора нижче кімнатної, від 10 до нижче нуля градусів. Таким чином, наше дослідження в змозі оцінити можливості радіонуклідного аналізу детектора CZT за температурою навколишньої середи.

Особлива увага при дослідженні приділялась оцінці здатності детектору CZT до радіонуклідного аналізу при різних температурах, також проведена серія вимірювань для дослідження температурної залежності детектору CZT з використання двох методів охолоджень: метод охолодження Пельтье та газове охолодження.

Система вимірювання з використанням газо охолоджувача, де одним з детекторів, який використовується в цьому досліді є модуль зонда детектора CZT(модель 297), що має кристал CZT з розміром детектора 5 x 5 x 5 mm^3 . Детектор включає електронний модуль, де знаходиться предпосилювач, уніполяний посилювач-формувач та джерело зміщення, який був оптимізований для використання з детектором CZT. Досліди були проведені з використанням радіоізотопних джерел :Cs^{137}, Ba^{133}, Cd^{109}, Pu^{238} та Eu^{152}, що були розміщенні на передній частині вікна детектора всередині охолоджуваної камери. [5]

Шляхом вимірювання гамма-променів протягом меншої міри 30 хвилин, що досить довго для спостерігання піків був здобутий енергетичний спектр для кожного джерела Rl при кімнатній температурі. Для вилучення температурної залежності детектора були також отримані спектри гамма-випромінювання при різних температурах з використанням обраних джерел радіонуклідів.

Щоб змінити температуру був використаний охолоджуючий бокс, що легко міг досягати температуру до -40℃. В охолоджуючій камері розміщався

тільки детектор, але джерела Rl та електричні модулі зонда CZT знаходилися поза коробкою для зупинення на них конденсації водяного пару. Спочатку детектор охолоджували, подаючи сухий холодний газ до охолоджуваної камери, а температуру детекторної системи вимірювали за допомогою термопари після стабілізування температури на половину -40℃, після чого оцінювалося енергетичне розширення при температурі.

Час формування підсилювача складало 1 мкс, висока напруга подавалася на детектор з джерелом високої напруги, що складало 200В. Так як, охолоджувач Пельтье може створювати шум у сигналі детектора, детектор був розміщений всередині металевої екранної коробки, а охолоджувач поза коробкою. Для вимірювання термопарою та зниження температури детектора CZT,аналогічно системі охолодження газу, струм на охолоджувачі Пельтье був збільшений. Було досліджено, що термопара створює перешкоди у сигналі детектора, також під час виміру термопара відключалася після стабілізації остигання температури.

Вимірювання за кімнатної температури при 25℃ з використанням різних стандартних радіоізотопних джерел. Було отримано енергетичне розширення для умов при кімнатній температурі та повну ширину на пів висоті(FWHM), а шум електричної схеми був оцінений шляхом вимірювання FWHM піку генератора. Можна ігнорувати схемний шум у процедурі аналізу через невелике значення, що був отриманий результат генератора імпульсів на пів висоті з енергією 1.0 кэВ. Звичайне значення FWHM досягнуте для цього детектору складало 11.3 кэВ при піці Cs^{137} 662 кэВ. Зведення даних по пів ширині та енергетичному розширенні для цього детектору з використанням різних стандартних джерел за кімнатної температури, що показана у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Радіонуклід	Cs-137		Ba-133			Co-57		Cd-109		Eu-152			Pu-238
Енергія (кэВ)	32	662	31	276	383	122	136	23	88	122	245	344	Низько-енергетичне рентгенівське зображення
FWHM (кэВ)	2.97	11.3	2.71	7.06	7.51	3.47	1.05	2.71	3.15	3.98	4.72	6.58	7.15
Енергетич. розшир. (%)	9.28	1.71	8.74	2.56	1.96	2.84	0.77	11.8	3.58	3.27	1.93	1.91	35.7

Таблиця 3.1.Данні про напівширину та енергетичну роздільну здатність при кімнатній температурі для малогабаритного детектору CZT (5x5x5mm^3) у системі охолодження газу з використанням різних джерел гамма-випромінювання. [5]

Енергетичні спектри при кожному температурному режимі були отримані при використанні камери охолодження газу. Результати вимірювань показані на рис.3.5.

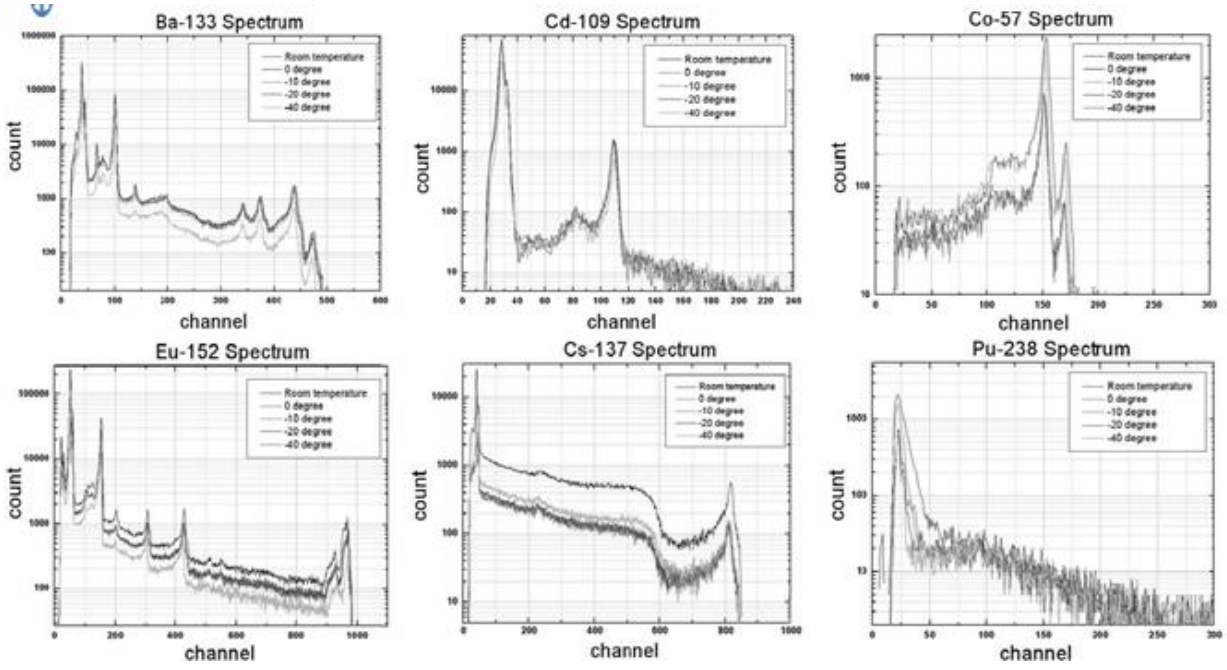


Рис.3.5. Енергетичні спектри, зняті детектором CZT для кожного температурного режиму в системі охолодження газу з використанням різних

стандартів джерела гамма-променів.[5]

Можна зробити висновок, що центр тяжіння піку енергетичного спектру коливається під час циклу охолодження, що може викликати ризик невірної ідентифікації піку. Для оцінки флуктуації піків використовували положення піків при кімнатній температурі у якості критерія, а діапазон температур складав від 25 до -40℃, цю тенденцію здвигу положення піків отриманих від джерел Co^{57} Rl можна побачити на рис.3.6.

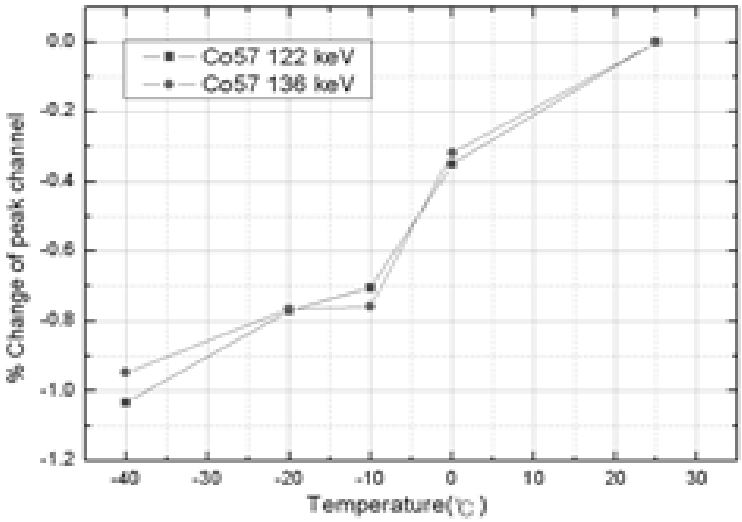


Рис.3.6. Данні про пікові флуктуації Co^{57} з детектором CZT та з використанням системи охолодження газом. [5]

При більш низьких температурах положення піку зміщується у нижній канал, чим при кімнатній температурі. Оскільки ці пікові коливання в залежності від температури мають дуже невелику величину, немає реального ризику для невірної ідентифікації пікових значень, також вияснилося що енергетичні розширення покращилися приблизно до 2% у діапазоні температур від 25 до -40℃ при охолодженні детектора. З практичної точки зору, отримані результати показують, що загальні температурні ефекти, як у положенні піка так і в розширенні, існують.

За допомогою системи охолодження Пельтье були виміряні енергетичні спектри при різних температурах від 32.6 до -9.6℃ з джерелами Co^{57}. При однаковій напрузі зміщення 200В були виміряні два спектри, які мають майже однакову форму. Виміряного при більш низькій температурі положення піку

енергетичного спектра було зміщене в сторону нижнього каналу, ніж у енергетичного спектру, який був виміряний при більш високій температурі. Коливання положення піку для детектору CZT в системі охолодження Пельтье при напрузі зміщення 400В та часу формування 0.5 мкс показані на рис.3.7.

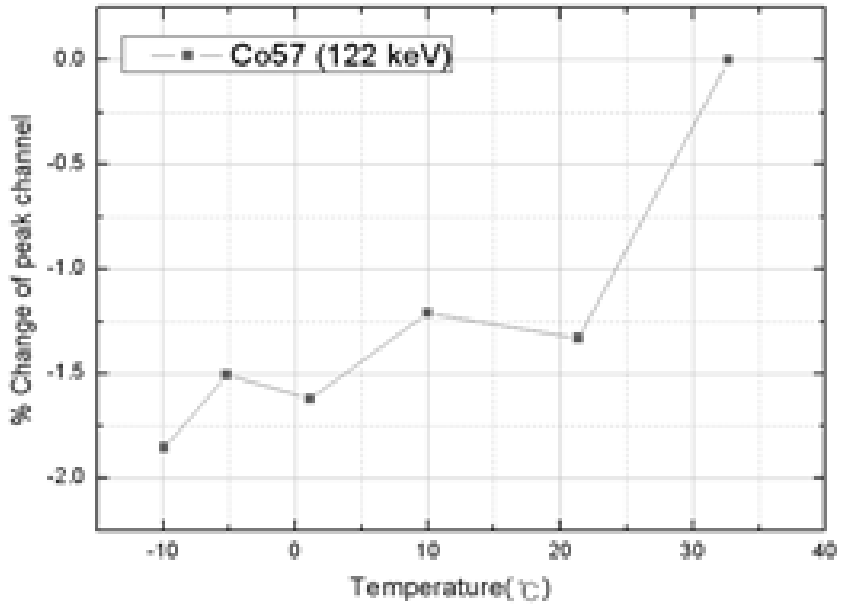


Рис.3.7. Пікове коливання Co^{57} з детектором CZT у системі охолодження за допомогою елементу Пельтье. [5]

Величина пікового коливання, виміряна в системі охолодження Пельтье, більше, ніж у системі охолодження газу, але результати двох систем показують однакові аспекти зміщення положення піка у нижній канал при відповідності з більш низькою температурою.

При зміненні температури від 32.6 до -9.6℃ розширення також покращилось приблизно на 3.54% у максимумі цієї системи. Змінення значень, що могли виникнути через зменшення струму витоку при більш низькій температурі FWHM з джерелом Co^{57} для детектора CZT у системі охолодження Пельтье показано на рис.3.8.

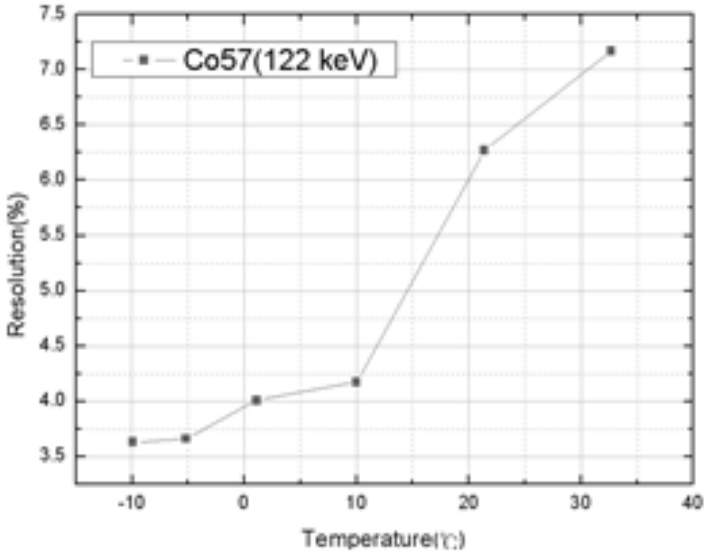


Рис.3.8. Змінення значень FWHM в залежності від температури для детектора CZT у системі охолодження Пельтье.[5]

Результати, які показують деякі коливання положення піка, були виміряні, коли енергетичний спектр гамма-випромінювання був виміряний при тій самій напрузі зміщення. Енергетичні спектри при пониженій температурі були майже однакові з енергетичним спектром при кімнатній температурі, через те що величина флуктуації дуже мала.

Тепловий шум детектора може знизити низька температура кристалу, що може впливати на здатність транспортування носіїв заряду всередині кристалу. При зміненні температури від 32.6 до -9.6℃ з використанням охолоджуваної системи Пельтье значення FWHM покращилось приблизно на 4.1% [5], тобто, більш, ніж удвічі у порівнянні зі способом охолодження газом.

3.2. Встановлення температурних режимів термоелектричного пристрою для CZT-детектора.

Результати, викладені у розділі 3.1, дозволили віддати перевагу пристрою для зниження робочої температури детектора, розробленого саме на елементах Пельтьє. Але проведені попередні дослідження показали, що при використанні такого пристрою виникає ефект «запотівання» детектора внаслідок конденсації водяної пари, що знаходиться в повітрі. Для запобігання виникнення даного ефекту, було запропоновано розміщувати детектор безпосередньо перед

вимірюванням в середовищі інертного газу, наприклад, аргону.

З цією метою необхідно було забезпечити герметизацію детектора всередині вимірювального блоку (рис.3.9) і розробити додатковий пристрій для прокачування інертного газу. Макет такого пристрою представлено на рис.3.10 разом з пристроєм на основі елементу Пельтьє для зниження робочої температури детектора.

а)  б) 

Рис.3.9. Вимірювальний блок для розміщення детектора в інертній атмосфері аргону: а) – в зборі; б) – детектор в середині блоку.

Для того, щоб з’ясувати можливості пристрою, розробленого усього на одному елементі Пельтьє (побутового рівня) і надати рекомендації стосовно конструювання більш потужного охолоджуючого пристрою, було проведено дослідження процесу встановлення стаціонарних температурних режимів в залежності від температури навколишнього середовища і вихідної напруги на елементі Пельтьє.



Рис.3.10. Пристрій для забезпечення стабільно зниженого по відношенню до температури навколишнього середовища температурного режиму роботи CZT-детектора.

До складу наведеного на рис.3.10 пристрою входять: 1 – блок живлення 12В\120Вт; 2- комплекс для вимірювання та регулювання температури на робочій поверхні (робочою поверхнею пристрою є блок із алюмінію до якого підведений датчик температури); 3- стійка з елементом Пельтьє; 4- радіатор з кулером для активного відводу гарячого повітря, яке утворилося за рахунок підвищення температури на «гарячій стороні» елементу Пельтьє; 5 - макет вимірювального блоку з детектором; 6 – макет системи прокачування інертного газу (аргону) через вимірювальний блок.

Вимірювання проводилися за температури навколишнього повітря 25 і 30 ℃, вихідній напрузі на блоці живлення 11, 12 та 13 В протягом 20 хвилин кожне. Покази електронних термометрів з монітору вимірювального комплексу фіксувалися в відео режимі одночасно з показами цифрового таймеру.

Отримані дані оброблялися за допомогою програмного пакету *MATLAB*. Результати вимірювань температури робочої поверхні - $t_{хол}$ з часом та температури «гарячої сторони» елементу Пельтьє - $t_{гар}$ наведені на рис.3.11-3.16.

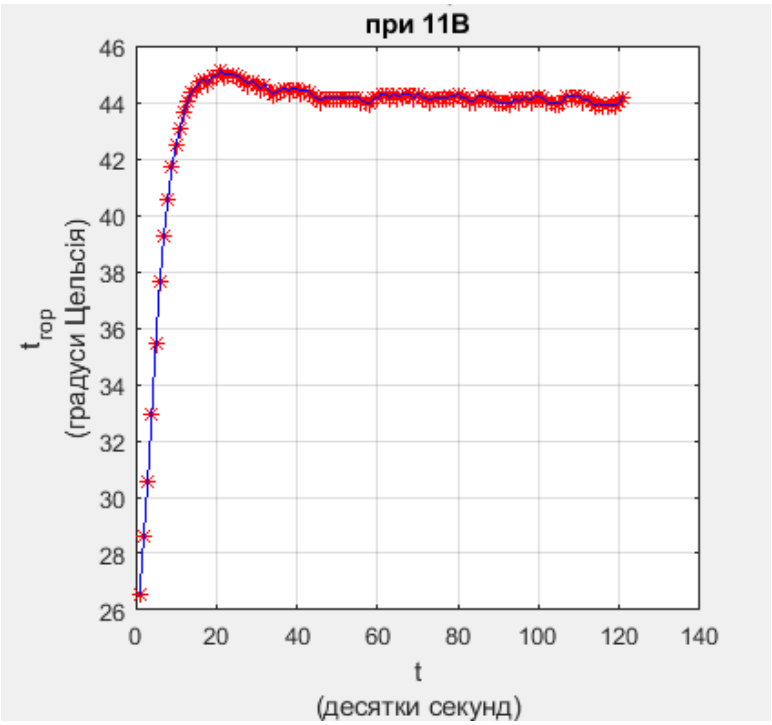


Рис.3.11. Залежність $t_{гар}$ від часу при 11В та 25 °С.

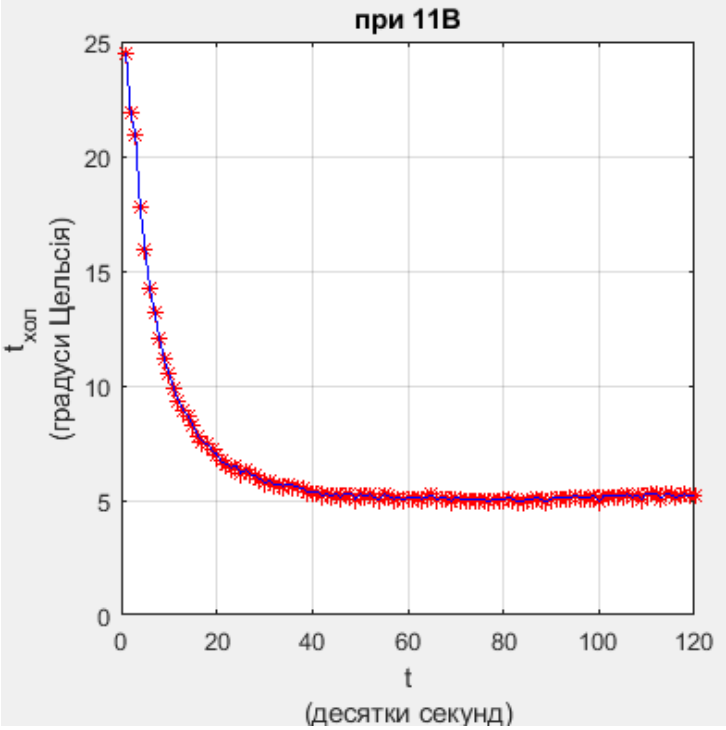


Рис.3.12. Залежність $t_{хол}$ від часу при 11 В.

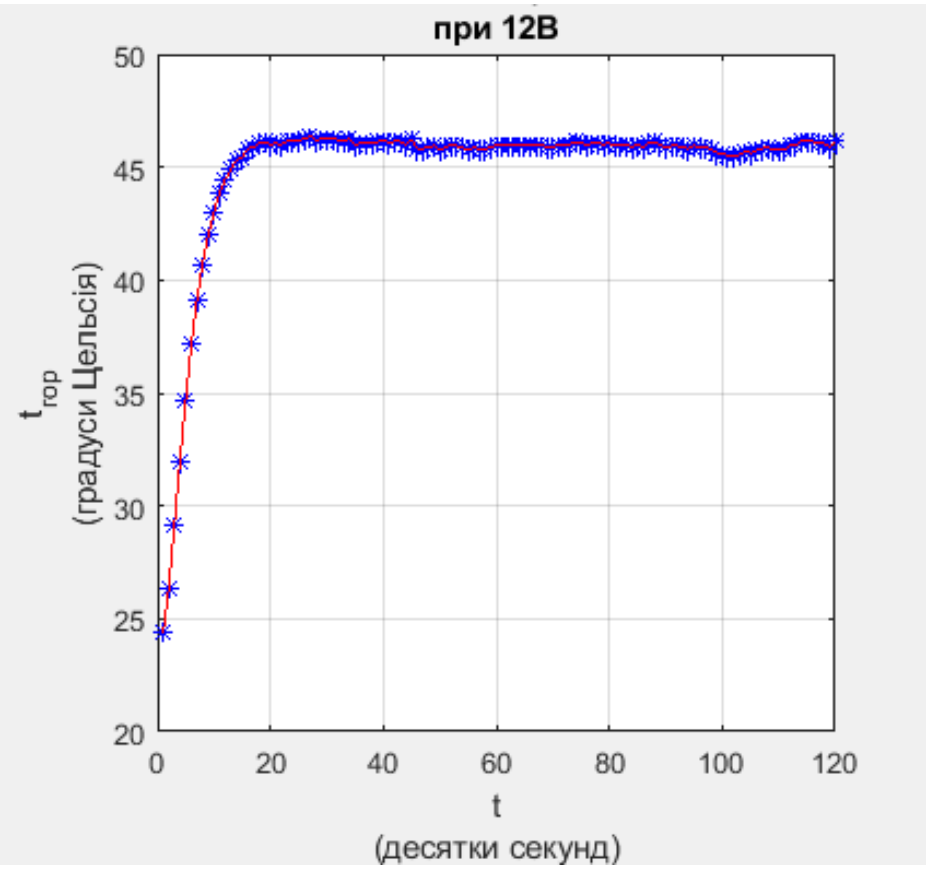


Рис.3.13. Залежність $t_{\text{гор}}$ від часу при 12В.

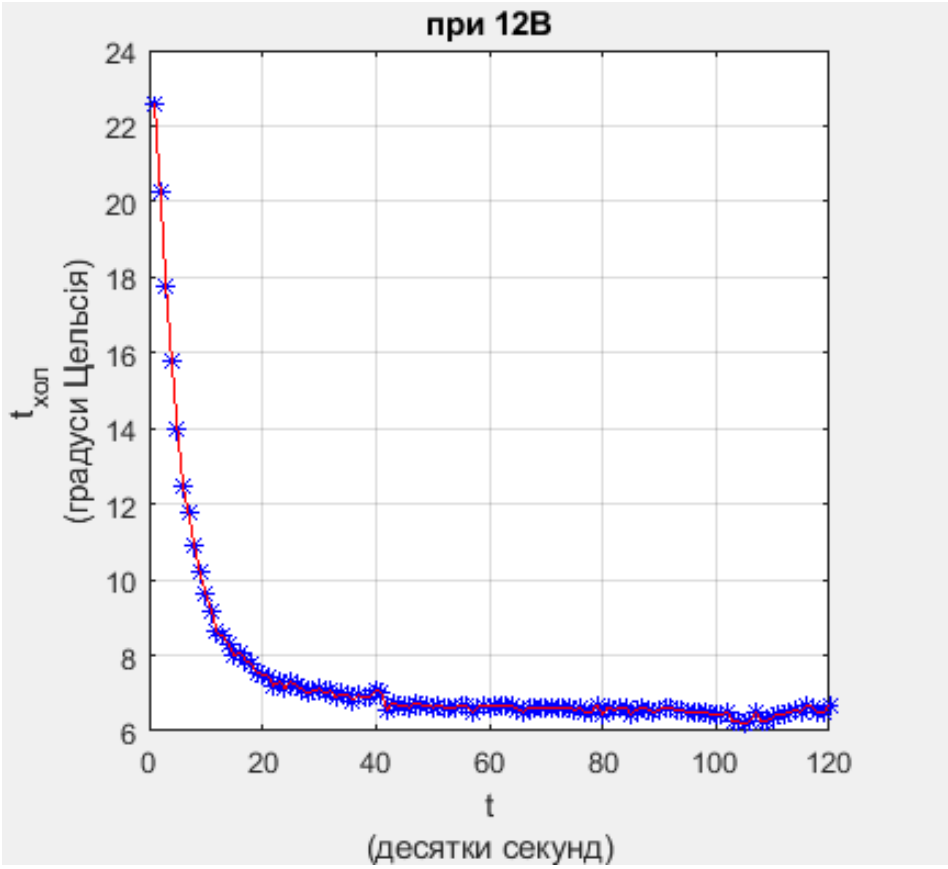


Рис.3.14. Залежність $t_{\text{хол}}$ від часу при 12В.

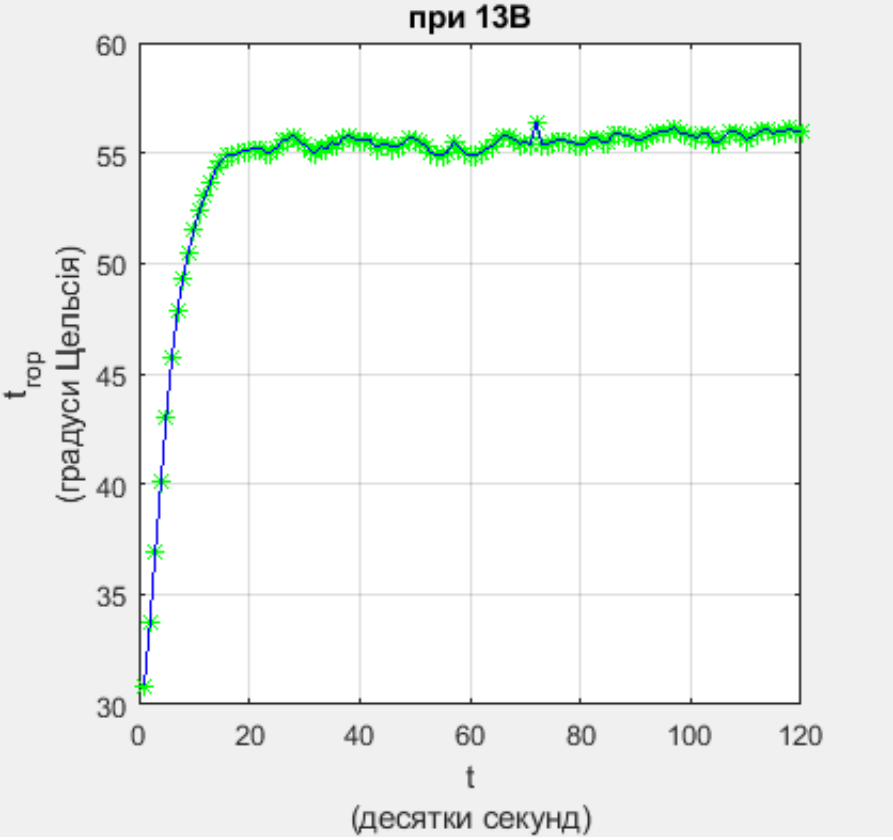


Рис.3.15. Залежність $t_{\text{гор}}$ від часу при 13В.

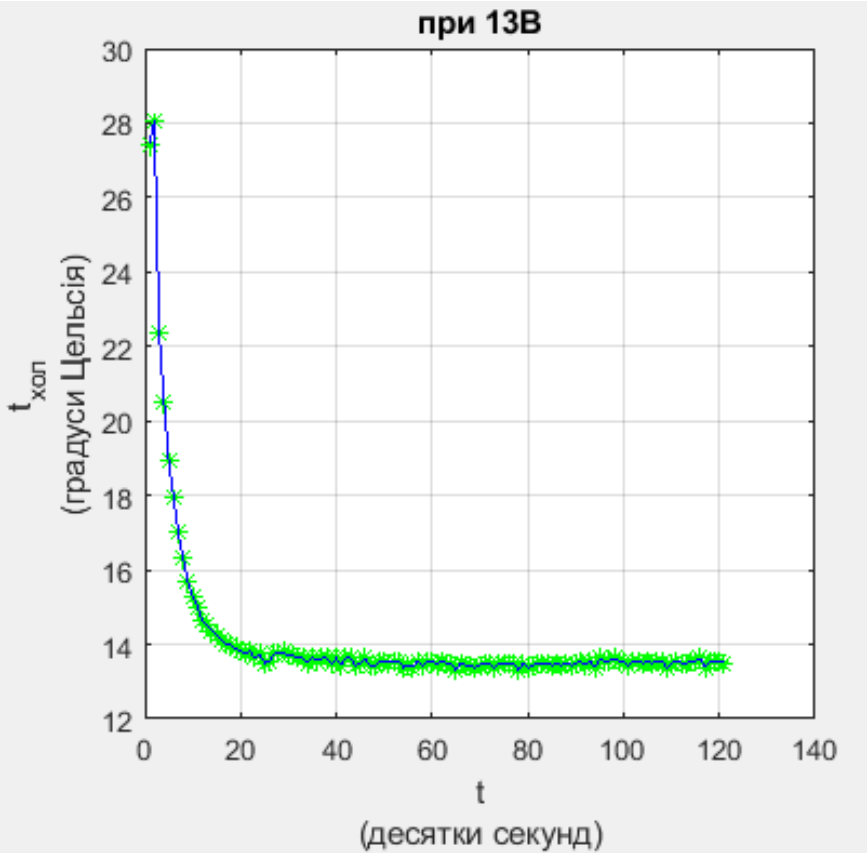


Рис.3.16. Залежність $t_{\text{хол}}$ від часу при 13В.

В результаті проведених вимірювань можна зробити наступні висновки. По-перше, час виходу на стаціонарний температурний режим в усіх випадках не перевищував п’яти хвилин. По-друге, на всіх робочих режимах температура робочої поверхні підтримувалася стабільною в межах одного градуса. Але найменші коливання температури ($\pm$ 0,2 ℃) спостерігалися при вихідній напрузі 11 В. При цьому зниження робочої температури по відношенню до температури навколишнього середовища можна було надійно забезпечити на 20 ℃.

3.3. Оптимізація робочих режимів CZT-детектора в залежності від температури, інтенсивності та дози опромінення.

Як правило, далеко не всі характеристики реакції детектора можуть бути виявлені експериментальними дослідженнями, що вимагають значної кількості уваги та підтримкою як фінансовою, так і матеріальне. тому математичне проектування у з’єднанні з дослідницькими результатами, що характеризують основні характеристики вивчаючих об’єктів, є незрівняний метод знаходження взаємозв’язку серед параметрів фізичних процесів, які виникають у детекторі випромінювання, особливістю поля випромінювання та дозиметричними властивостями гамма-випромінювання. Для ознайомлення характеристики спектрометра, таких як роздільна здатність та ефективність реєстрації, загалом використовується моделювання детекторів з пів ізольованих матеріалів. Більше використання детекторів CdZnTe або CdTe і перевірка справжньої моделі детекторів випромінювання зумовлена великою кількістю надрукованих дослідницьких даних, де кількісний збіг експериментальних розподілів амплітуд імпульсів заряду, отриманих від детекторів та детекторів під час реєстрації як зразковий критерій.[6]

При застосуванні розробленої математичної моделі фізичних процесів в НДП дублювання характеристик реакції CdZnTe, таких як амплітуду, розміщення та площу, форма фото піків та FWHM, добре спостерігається за

опроміненням і з набору примірного джерела іонізуючого випромінювання(ДІВ).

Для того щоб виконати аналіз впливу шуму на роздільну здатність чутливості з спектрометрією дозиметричного детектору CdTe або CdZnTe разом з блоками детекторів, що були створені на їх основі, та працюючі у режимі вимірювання амплітуди імпульсу, була використана модель фізичних процесів в НАП. Еквівалентний шумовий заряд (ENC) слугує характеристикою рівня шуму у приладах для спектрометрії та дозиметрії іонізуючого випромінювання, але за визначенням це заряд, що створений еквівалентним генератором струму, який генерує вихідний сигнал, рівний середньоквадратичній амплітуді. У перший раз методика імітаційного моделювання був використаний для визначення прийнятних рівня еквівалентного шумового заряду (ENC) у приладах для спектрометрії та дозиметрії на основі плоских детекторів CdTe (CdZnTe).[6] Шум майже не впливає на чутливість детекторів CdTe (CdZnTe) в дозиметричних приладах з високим рівнем дискримінації > 60 кеВ.

Граничний рівень ENC визначає рівень допустимого темного струму в детекторах CdTe (CdZnTe) детекторів, де на показники дозиметра не впливатимуть коливання температури в діапазоні від - 20℃ до +60℃ . Експоненціальна залежність темнових струмів на температурних обмеженнях їх допустимий рівень становить 5 нА при T = 20К. [6]

Високий опір CdZnTe (10^{11}> Ом) може досягати напруги зсувного поля вище 100 В / мм, тоді як для CdTe без нормування температури детектору дозволяється використовування напруги зміщення зі швидкістю приблизно 15-20В/мм.

Вимірювання параметрів переносу заряду при допомозі методів Холла є складним у високоомному детектору через низькі концентрації носіїв, поверхневі струми витоку, які набагато перевищують об'ємні струми, або малі розміри зразків. Вплив таких факторів призводить, що похибка вимірювання мають той самий порядок, що і значення вимірюваних параметрів. [6]

Створений метод визначення параметрів переносу зарядів не чуттєвий до рівня шуму в заданих межах, що дозволяє набагато зменшити час обчислень без великих статистичних помилок. Головними факторами, які впливають на точність розрахунку, є точність визначення потужності дози, що генерується джерелом гамма-випромінювання в місці розташування детектора, і точність вимірювання потужності детектора за заданим рівнем дискримінації.

Використання CdTe (CdZnTe) у дозиметрії потребує корекції "ходу з жорсткістю». Експериментальні дані показують, що для детекторів CdTe співвідношення потужності експозиційної дози до швидкості підрахунку лінійно пов'язано із середньою амплітудою імпульсів, які генеруються детекторами.

Оскільки значна "жорсткість" є узагальненою проблемою майже у всіх високоомних матеріалах, представляє великий інтерес вивчити можливості методу середніх розмірів для іншого пів ізольованого матеріалу. Напівпровідниковий детектор CdTe (CdZnTe) більше підходить для використання в дозиметричних пристроях після Hgl_2. Однак моделювання залежності 1 /δ від середньої амплітуди імпульсу заряду для гамма-детекторів на основі Hgl_2 показує, що ця залежність є не лінійною в діапазоніE_γ<1 МеВ.

Тому метод середньої амплітуди не можна використовувати для усунення похибки вимірювання дози, пов'язаної з енергетичною залежністю чутливості в дозиметрах на основі Hgl_2 . Кількісний збіг, що був отриманий припускає використання вдосконаленої моделі та техніку для реконструкцій функцій відгуку для вивчення властивостей детектора гамма-випромінювання на фундаменті інших високоомних напівпровідників (наприклад, Hgl_2).

Згідно з даними моделювання детекторівHgl_2, область, у якій залежність чутливості детектора від енергії гамма-квантів слабко впливає на похибку вимірювання дози, становить приблизно 40-300 кэВ. Тому підходить для використання в низько енергетичних рентгенівських та гамма-випромінюючих приладах. Уподібнювання дозиметричних властивостей детекторів на основі CdTe (CdZnTe) та HgI2 при допомозі імітаційного моделювання свідчить, що

лінійна залежності $1/\delta$ від середньої амплітуди імпульсів детекторів слугує головною особливістю напівпровідникових сполук CdTe та CdZnTe.

Також першою спробою методу моделювання було встановлено взаємозв'язок з продуктами часу життя електронів і дірок у планарних високоомних детекторах, ефективністю збору заряду, дискретною чутливістю. Це дозволило розробити метод визначення параметрів переносу носія заряду у високоомних детекторах для спектрометрії та дозиметрії гамма-випромінювання. Методика призначена для контроля якості на початковому етапі вибору детекторів та для контроля параметрів напівпровідникових детекторів під час роботи в детекторах випромінювання. Потім дозу випромінювання можна визначити на основі виміряної середньої амплітуди імпульсу детекторів CdTe (CdZnTe), незалежно від спектрального складу випромінювання. Це дозволяє створювати його на основі пристроїв широкого діапазону CdTe (CdZnTe), де виміряна доза не залежить від енергії гамма-випромінювання в діапазоні від 40 кеВ до 3 МеВ. [6]

Отже, отриманий результат комп'ютерного моделювання дозиметричних властивостей неохолоджених детекторів гамма-випромінювання на основі напівпровідників з високим опором показують, що існує взаємозв'язок між дозовими властивостями полів гамма-променів та параметрами розподілу амплітуд імпульсів заряду в детекторах. Що дозволило вирішити важливу наукову проблему створення методу вимірювання дози випромінювання, точність якого не залежить від спектрального складу гамм-квантів. [6]

Темновий струм діодних детекторів на основі CdTe (CdZnTe) з індукованим лазером p-n переходом має теплову природу і експоненційно За теорією Са-Нойса-Шоклі:

$$I = Aq\int_0^W U(x,V)dx$$

$$U(x,V)=\frac{n(x,V)\,p(x,V)-n_{\mathrm{i}}^2}{\tau_{p0}\left[n(x,V)+n_1\right]+\tau_{n0}\left[p(x,V)+p_1\right]}$$

$$n(x,V)=N_{\mathrm{c}}\exp\left[-\frac{E_{\mathrm{g}}-\Delta\mu-\varphi(x,V)-qV}{kT}\right]$$

$$p(x,V)=N_{\mathrm{v}}\exp\left[-\frac{\Delta\mu+\varphi(x,V)}{kT}\right]$$

$$W(V)=\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_{\mathrm{o}}(\varphi_{\mathrm{o}}-qV)}{q^2(N_{\mathrm{a}}-N_{\mathrm{d}})}}$$

$$\varphi(x,V)=(\varphi_0-qV)\left(1-\frac{x}{W}\right)^2$$

де I - темновий струм (струм генерації);

$U(x,V)$ - швидкість генерації в перерізі x при напрузі V;

$n(x,V)$, $p(x,V)$ - концентрації носіїв в зоні провідності і валентній зоні відповідно;

$W(V)$ - ширина області просторового заряду в p-n-переході;

$\varphi(x,V)$ - потенційна енергія, яка відлічується від краю валентної зони в об'ємній частині кристалу

q - електронний заряд, A - площа діода,

$\Delta\mu$ - енергетична щілина між рівнем Фермі і краєм валентної зони в об'ємній частині кристалу.

Порівняння на рис.3.17 виміряних (кружки) та обчислених (суцільні лінії) значень темнового струму при низькій напрузі (а) при температурах експерименту вказує на те, що знижуючи робочу температуру детектора, можна досягти оптимальних значень енергетичної роздільності при менших значеннях прикладеної напруги. Той факт, що в роботі [5] ефект від зниження робочої температури детектора склав чотири відсотка, може бути пов'язаний з якістю детекторів, які використовувалися для досліджень. Про це красномовно

свідчить порівняння енергетичних спектрів радіонукліду ^{137}Cs на рис.3.17 та рис.3.18.

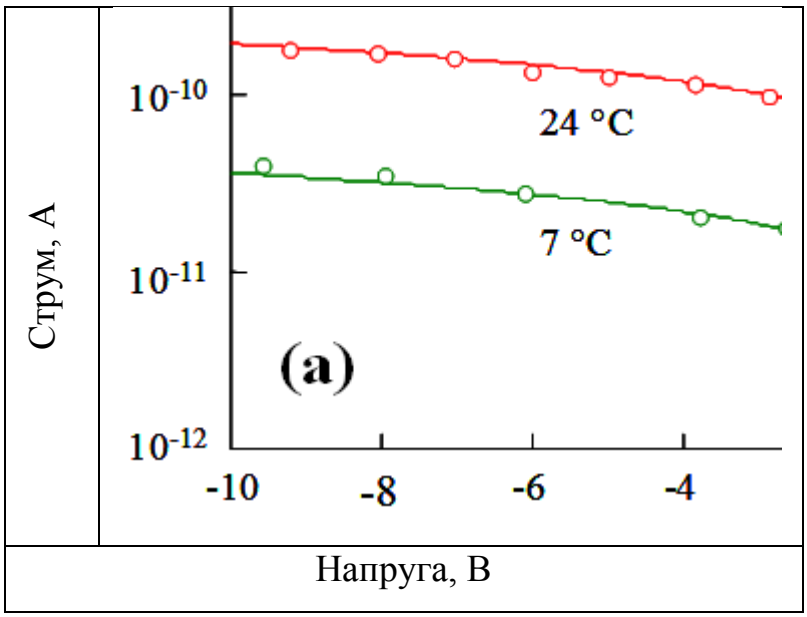


Рис.3.18. Темновий струм діодного детектора при низьких значеннях напруги зміщення: маркери – результати вимірювання; суцільні лінії – результат розрахунків за теорією Са-Нойса-Шоклі [7].

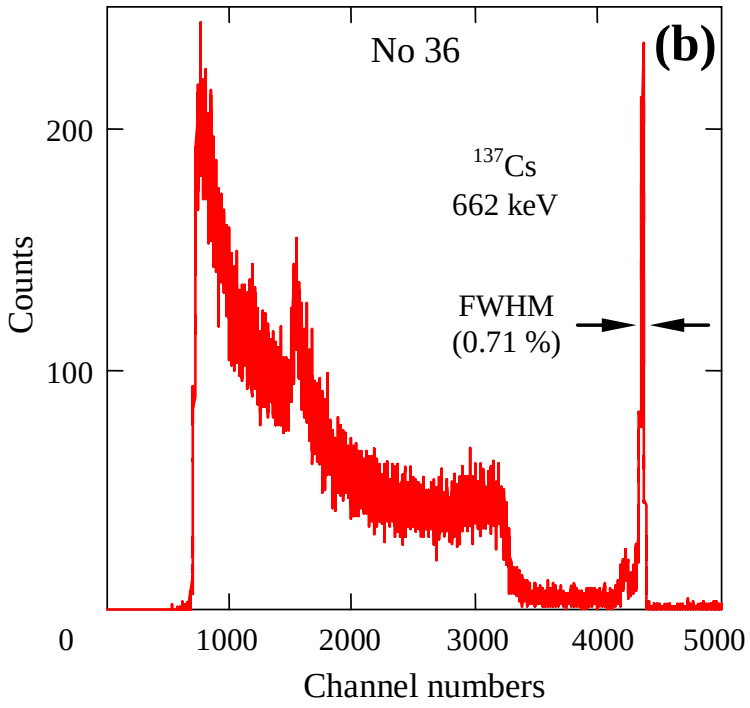


Рис.3.18. Енергетичний спектр радіонукліду ^{137}Cs, отриманий на детекторі CdTe (T = 300 K) [8].

Підводячи підсумок, можна зробити висновок, що спектральні характеристики діодних напівпровідникових детекторів на основі CdTe та CdZnTe з індукованим лазером p-n переходом можна покращувати, застосовуючи пристрої для забезпечення стабільно зниженої температури відносно температури навколишнього середовища.

Висновки

В рамках кваліфікаційної роботи було показано, що наряду з основними перевагами матеріалу на основі CZT – великим атомним номером, високою густиною, широкою забороненою зоною, високим питомим опором, хорошими транспортними характеристиками електронів і часовою стабільністю параметрів, існує ряд широко розповсюджених недоліків - незадовільні транспортні характеристики дірок, що обумовлюють необхідність застосування спеціальних конструкцій детекторів і / або спеціальних методів обробки сигналів, а також, наявність неоднорідностей в кристалах. В роботі наведено огляд сучасних тенденцій удосконалення детекторів на основі CZT та оптимізації їх робочих режимів в залежності від температури, інтенсивності та дози опромінення.

З’ясовано значимість зниження та стабілізації робочої температури для ефективної роботи CZT-детектора. Досліджено можливість покращення спектральних характеристик CZT-детектора шляхом забезпечення стабільно зниженого по відношенню до температури навколишнього середовища температурного режиму його роботи. Показано, що темновий струм досліджуваних детекторів має теплову природу і експоненційно залежить від температури. Удосконалено установку, що дозволяє забезпечити стабільну роботу детектора за температури, яка на 2-3 десятки градусів нижча за температуру оточуючого середовища і попереджує ефект «запотівання» детектора. Показано, що за таких умов високі значення енергетичної роздільності CZT-детекторів можуть бути досягнуті за значно менших значень напруги зміщення.

Список використаних джерел:

1. Чадюк В. О. Ч-13 Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. / В. О. Чадюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – Кн. 1. – 376 с.
2. «Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials» Reilly D., Ensslin N. and Smith H.Jr. March 1991, Los Alamos National Laboratory
3. Левицький С.М., к.т.н., с.н.с., Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, ORCID:0000-0002-3909-0993
4. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security Cite as: J. Appl. Phys. 126, 040902 (2019); Submitted: 05 February 2019. Accepted: 01 June 2019. Published Online: 30 July 2019
5. www.mdpi.com/journal/sensors
6. Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Захарченко Олександр Олексійович УДК 539.1.074
7. V.A. Gnatyuk, T. Aoki, Y. Hatanaka, O.I. Vlasenko, Defect formation in CdTe during laser-induced doping and application to the manufacturing nuclear radiation detectors, *Physica Status Solidi C*, Vol. **3**, No 4 (Mar. 2006) 1221-1224.
8. T. Aoki, V.A. Gnatyuk, A. Nakamura, Y. Tomita, Y. Hatanaka, J. Temmyo, Study of a CdTe high-energy radiation imaging device fabrication by excimer laser processing, *Physica Status Solidi C*, Vol. **1**, No 4, (2004) 1050-1053.
9. Трофимова Т. И. Т761 Курс физики: учеб. пособие для вузов / Таисия Ивановна Трофимова. — 11-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 560 с. ISBN 5-7695-2629-7.
10. Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Supplement 5, p. 421–424 (June 2008).