

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кондрика Олександра Івановича

«Вплив радіаційних і фонових дефектів на властивості GaAs, CdTe, CdZnTe і детекторів іонізуючих випромінювань на їх основі»

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.21 – радіаційна фізика і ядерна безпека

Актуальність теми.

В даний час в усьому світі розширюється використання ядерних технологій в енергетиці, промисловості, медицині, біології, космічних дослідженнях. Також в деяких країнах існує проблема пошуку джерел проникного випромінювання в місцях радіоактивного забруднення техногенного походження, наприклад в Японії після аварії на станції Фукусіма. В зв'язку з цим є актуальними задачі радіаційного моніторингу, для вирішення яких потрібно розробляти методики та прилади для детектування джерел радіоактивного випромінювання, проводити регулярні дослідження об'єктів, забруднених радіонуклідами. Це зумовлює значний інтерес до високоомних напівпровідникових сполук, зокрема A_3B_5 , A_2B_6 і потрійних сполук на їх основі, які є перспективними матеріалами для виготовлення детекторів іонізуючих випромінювань. В першу чергу до таких матеріалів можна віднести GaAs, CdTe, CdZnTe, які можуть застосовуватися як детектори рентгенівського і гамма випромінювання. Активно розробляються та вдосконалюються нові конструкції приладів на їх основі, а також способів отримання якісних кристалів. Про це свідчить велика кількість публікацій і конференцій по напівпровідниковим детекторам, що експлуатуються при кімнатних температурах.

На властивості напівпровідникових детекторів великий вплив мають домішки та дефекти, що дають в забороненій зоні глибокі енергетичні рівні, на яких відбувається захоплення та рекомбінація нерівноважних носіїв заряду, індукованих ядерними випромінюванням, що реєструється. Характеристики глибоких рівнів досліджуваних матеріалів важко піддаються точним вимірюванням через високий питомий опір: 10^8 Ом·см (GaAs), 10^{10} – 10^{11} Ом·см (CdTe, CdZnTe).

Використання комп'ютерних технологій при розробці детекторів іонізуючого випромінювання дозволяє значно зекономити матеріальні ресурси, зменшує затрати енергії та робочого часу. Зокрема можна проводити модельні дослідження електрофізичних та детекторних властивостей GaAs, CdTe, CdZnTe, не застосовуючи дорогих матеріалів та устаткування, без залучення великої кількості персоналу лабораторій. Тому є актуальним застосування математичного та комп'ютерного моделювання для визначення впливу глибоких рівнів енергії на електрофізичні та детекторні властивості GaAs, CdTe, CdZnTe, що необхідно для розробки і одержання радіаційно стійких матеріалів спектрометричної якості.

Роботи, що увійшли в дисертацію, виконувалися за поточними темами ННЦ ХФТІ: «Програма проведення фундаментальних досліджень по атомній науці і техніці ННЦ ХФТІ на 2001-2005 рік», що виконувалась за розпорядженням КМУ від 13.09.2001 р №421-р, № держреєстрації 080901UP0009; Державна програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» на 2006–2010 рр, яка виконується згідно з розпорядженням КМУ від 13.06.2005 №421-р, державний реєстраційний номер 080906UP0010; Державна програма «Ресурс 2004», НАНУ тема «Розробка та створення сенсорних приладів широкого спектру 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; Проектна угода з Українським науково-технологічним центром № 1810 (2002–2003 рр) «Прогнозування змін властивостей напівпровідникових матеріалів для використання в екстремальних умовах»; Багатогалузева науково-технічна програма «Програма проведення фундаментальних досліджень по атомній науці і техніці ННЦ ХФТІ на 2011-2015 рік», що виконувалась згідно з постановою Бюро відділення ЯФЕ НАН України від 07.10.2010 р., протокол №7(76), державний реєстраційний номер 0111U008993.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій

Для виконання поставленої мети та вирішення відповідних задач комп'ютерного моделювання були використані добре перевірені фізичні моделі, які знайшли надійні експериментальні підтвердження, опубліковані в науково-технічній літературі. Автор дисертаційної роботи використав апробовані моделі та поняття, формули та рівняння зонної теорії твердого тіла, статистичної теорії

вільних носіїв заряду в напівпровідниках, статистики рекомбінації електронів та дірок на глибоких рівнях, елементи кінетичної теорії явищ переносу, розсіювання електронів на локальних центрах, фонах та скупченнях дефектів в кристалічній решітці. Це доводить обґрунтованість наукових положень та висновків дисертації.

Результати та висновки модельних досліджень, отримані автором дисертаційної роботи, добре корелюють з обчисленнями та результатами експериментів, одержаних іншими авторами, що доводить їх достовірність. Матеріали дисертаційної роботи були представлені, обговорені та отримали позитивну оцінку на багатьох міжнародних конференціях. Результати роботи повністю відображено в 18 наукових працях, в тому числі у 11 статтях, і 7 тезах доповідей на наукових конференціях. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 статтях, які задовольняють вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України.

Дисертаційна робота представляє собою завершену працю, що базується на ретельному огляді літератури за означеною проблемою, чітко сформульованій меті і пов'язаними з нею задачами дослідження, використанні апробованих фізичних та математичних моделей, аналізі одержаних результатів та їх критичному співставленні з результатами інших дослідників, формулюванні обґрунтованих висновків. Таким чином обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, не викликають сумніву.

Наукова новизна. До найбільш вагомих наукових результатів, вперше одержаних автором, слід віднести наступні:

1. Побудована модель електричної компенсації для довільної кількості різнотипних домішок і дефектів, яка у поєднанні з алгоритмом обчислення електронної рухливості μ_n , питомого опору ρ , рівня Фермі F , часу життя нерівноважних носіїв заряду τ дозволяє визначати електрофізичні властивості напівпровідників типу A_3B_5 і A_2B_6 , а також ефективність збору зарядів η детекторів іонізуючих випромінювань на основі цих сполук в залежності від концентрації багатозарядних донорів та акцепторів, амфотерних домішок типу DA, DDA, DAA, їх енергетичного положення в забороненій зоні напівпровідника і температури.

2. Зроблена поправка в модель Брукса-Херрінга шляхом введення додаткового екранування глибокими іонізованими рівнями розсіювальних

локальних заряджених центрів у GaAs, CdTe і CdZnTe та показано, що парціальну рухливість для непружного розсіювання електронів на полярних оптичних фонах у GaAs можна представити аналітичним виразом без необхідності чисельного вирішення рівняння Больцмана.

3. Встановлено, що залежності ρ і $\rho \cdot \tau \cdot \mu_n$ для $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ від концентрації мілких донорів проходять через максимум і визначений склад детекторного матеріалу для досягнення максимальних ρ , τ , μ_n ; показано, що для збільшення ефективності збору зарядів матеріал детекторів на основі CdZnTe може складатися з двох різних за домішковим складом частин: з $p_0 \gg n_0$ біля анода та з $p_0 \geq n_0$ біля катода.

4. Встановлено, що в результаті рентгенівського опромінення CdTe:Cl та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, а також γ -опромінення $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ збільшується вміст електрично активних акцепторів, що демонструється зменшенням залежності питомого опору ρ від концентрації мілкового донора N_d в бік більших N_d ;

5. При значних дозах (сотні кГр) опромінення деградація електрофізичних властивостей відбувається через зменшення ρ , а зменшення ефективності збору зарядів η – за рахунок захоплення нерівноважних носіїв заряду глибоким рівнем радіаційного дефекту. При малих дозах (кілька кГр) опромінення $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ збільшується ρ і η , внаслідок чого покращуються реєструвальні властивості детектора.

6. Визначена причина високої радіаційної стійкості CdZnTe, яка пов'язана з меншою швидкістю утворення акцепторних радіаційних дефектів, а також зниженням захоплення носіїв заряду акцепторним радіаційним дефектом J ($E_v + 0.53$ eV) внаслідок впливу глибокого донора, концентрація якого зростає при опроміненні, відсуваючи рівень Фермі в середину забороненої зони та збільшуючи питомий опір.

Значення отриманих результатів для практики

Практичне значення отриманих результатів та використаного підходу полягає в тому, що вони можуть полегшити підбір режимів технологічних процесів глибокого рафінування Cd, Zn, Te та визначати оптимальні умови вирощування детекторних матеріалів, так як вже відомі технологічні прийоми, що дозволяють досягати граничної чистоти кристалів і в певній мірі керувати вмістом електрично активних домішок і власних дефектів. Результати роботи можуть використовуватись при одержанні детекторів іонізуючих випромінювань, коли

необхідно знати конкретні причини несприятливого впливу домішок, технологічних та радіаційних дефектів структури, комплексів та скупчень дефектів на електронну рухливість, час життя нерівноважних носіїв заряду, ступінь компенсації, питомий опір, а також на детекторні властивості GaAs, CdTe, CdZnTe. Використаний алгоритм обчислення електрофізичних та детекторних властивостей, що базується на моделі компенсації для довільної кількості багатозарядних та амфотерних центрів дозволяє працювати не тільки з досліджуваними матеріалами, але й з широким класом напівпровідникових сполук типу A_3B_5 і A_2B_6 . Застосований підхід дозволяє значно зекономити час та матеріальні ресурси в процесі розробки та одержання матеріалів детекторної якості.

Отримані результати модельних досліджень узгоджуються з опублікованими експериментальними даними, одержаними в провідних лабораторіях світу, доповнюють сучасні уявлення про механізми протікання фізичних процесів в твердотільних детекторах на основі прямозонних напівпровідників, допомагають інтерпретувати відомі результати експериментів і можуть значно прискорити одержання детекторів, придатних для задач спектроскопії та дозиметрії, як на стадії їх розробки, так і в процесі виготовлення.

Зауваження до тексту та змісту дисертації.

В ході вивчення тексту дисертації були помічені ряд недоліків.

В тексті дисертації є посилання на експериментальні роботи та модельні дослідження детекторів на основі CdTe і CdZnTe, які проводилися іншими авторами в ННЦ ХФТІ, але відсутній детальний аналіз цих робіт в літературному обзорі.

В розділі 2 при описанні фізичних та математичних моделей обґрунтовується нехтування міжзонною рекомбінацією та підкреслюється вирішальна роль статистики рекомбінації Шоклі-Ріді-Холла. В зв'язку з важливістю такого механізму впливу на властивості детекторів бажано записати його у вигляді окремого висновку до розділу 2.

В розділі 3 бажано скомпонувати у вигляді окремого підрозділу текст, в якому фактично розглядається апробація прийнятих фізичних та математичних моделей, а саме: відповідність результатів використаних обчислень, експериментальним результатам, одержаним з незалежних джерел.

Важко сприймається різниця між графіками а) і б) рисунка 5.6.

Важкі для сприйняття результати експериментів, що відображені в таблицях 5.2 і 5.3. Якщо вказані таблиці замінити відповідними графічними схематичними зображеннями, то в такому разі наведені дані виглядали б більш наочно і сприймалися ясніше.

Однак вказані недоліки не знижують науково-практичної цінності виконаної дисертаційної роботи і не впливають на її позитивну оцінку.

Дисертаційна робота Кондрика Олександра Івановича виконана на високому науковому рівні і присвячена вирішенню важливої наукової задачі – визначенню механізмів впливу домішок та дефектів різної природи на електрофізичні та детекторні властивості GaAs, CdTe, CdZnTe.

По актуальності, науковому рівню і практичному значенню одержаних результатів дисертаційна робота Кондрика О.І. «Вплив радіаційних і фонових дефектів на властивості GaAs, CdTe, CdZnTe і детекторів іонізуючих випромінювань на їх основі» повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України, зокрема пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів».

Вважаю, що Кондрик Олександр Іванович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.21 – радіаційна фізика і ядерна безпека.

Офіційний опонент,
директор Інституту електрофізики і радіаційних
технологій НАН України

член-кореспондент НАН України,

член Бюро відділення ядерної фізики та енергетики

НАН України

доктор фізико-математичних наук, професор,

В.Ф. Клепиков

Підпис д.-ра фіз.-мат. наук, проф. Клепикова В.Ф.

ЗАСВІДЧУЮ

вчений секретар

Інституту електрофізики і радіаційних технологій

НАН України

