

## ВІДГУК

### офіційного опонента

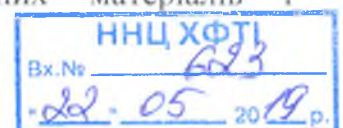
на дисертаційну роботу Кондрика Олександра Івановича «Вплив радіаційних і фонових дефектів на властивості GaAs, CdTe, CdZnTe і детекторів іонізуючих випромінювань на їх основі», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико - математичних наук за спеціальністю 01.04.21 - Радіаційна фізика і ядерна безпека.

#### Актуальність теми

Зростаюча роль атомної енергетики, поширення ядерних технологій, які містять джерела радіаційної небезпеки, ставлять завдання розвитку радіаційної діагностики в розряд пріоритетних та висувають нові вимоги до контролю іонізуючих випромінювань. Задоволення цих вимог можна забезпечити розробкою і вдосконаленням електронних приладів на основі напівпровідникових матеріалів. Телурид кадмію і потрійні сполуки на його основі знайшли застосування в приладах радіаційного моніторингу – детекторах іонізуючих випромінювань. Як альтернативний матеріал для детекторів розглядається арсенід галію.

Внаслідок дії іонізуючих випромінювань на детекторні напівпровідникові сполуки (GaAs, CdTe, CdZnTe) в їх об'ємі виникають активні радіаційні дефекти, які негативно впливають на властивості детекторів шляхом зниження питомого опору  $\rho$ , часу життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau$ , електронної рухливості  $\mu_n$  і ефективності збору зарядів  $\eta$  внаслідок зменшення ступеня компенсації, захоплення електронів та дірок, дрейфуючих в міжелектродному проміжку, енергетичними рівнями дефектів. Вимірювання параметрів та ідентифікація енергетичних рівнів дефектів ускладнені через високий питомий опір ( $10^9$ – $10^{11}$  Ом·см) та різні умови компенсації в напівізолюючих детекторних матеріалах, тому залишається нез'ясованим питання про конкретний вплив радіаційно-стимульованих і фонових дефектів на  $\mu_n$ ,  $\rho$ ,  $\tau$ , в GaAs, CdTe, CdZnTe і ефективність збору зарядів детекторів іонізуючих випромінювань як неопромінених, так і під дією агресивного радіаційного середовища. Розуміння механізмів цього впливу необхідне при розробці радіаційно-стійких детекторних матеріалів, а методи моделювання дозволяють замінити частину експериментальних досліджень завдяки значному скороченню витрат часу і засобів.

Таким чином є вельми актуальним розрахункові методи та математичне моделювання для з'ясування впливу дефектів, що виникають під впливом джерел ядерної енергії, іонізуючого випромінювання та технологій одержання на електрофізичні властивості напівпровідникових детекторних матеріалів і



характеристики створених на їх основі приладів радіаційної дозиметрії.

Актуальність теми дисертації підтверджується також широким застосуванням досліджуваних напівпровідників як детекторів, широким поширенням готових приладів на них і постійним пошуком нових конструкцій приладів і способів отримання якісних кристалів. Про це говорить велика кількість публікацій і конференцій по твердотільним детекторам, що експлуатуються при кімнатних температурах. Крім того, роботи, що увійшли в дисертацію, виконувалися за поточними темам ННЦ ХФТІ і є складовою частиною ряду наукових програм:

- багатогалузева науково-технічна програма «Програма проведення фундаментальних досліджень по атомній науці і техніці ННЦ ХФТІ на 2001-2005 рік», яка виконувалася за розпорядженням КМУ від 13.09.2001 г №421-р, державний реєстраційний номер 080901UP0009;
- державна програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» на 2006-2010 р, яка виконується згідно з розпорядженням КМУ від 13.06.2005 №421-р, державний реєстраційний номер 080906UP0010;
- державна програма «Ресурс 2004», НАНУ тема «Розробка і створення сенсорних приладів широкого спектру дії для радіаційного та ядерного технологічного контролю в системі АЕС на основі радіаційно-стійких напівпровідникових сенсорів з CdTe, CdZnTe і штучних алмазних плівок», державний реєстраційний номер 0104U007429-2004;
- проєктна угода з Українським науково-технологічним центром № 1810 (2002-2003 р.) «Прогнозування змін властивостей напівпровідникових матеріалів для використання екстремальних умовах»;
- багатогалузева науково-технічна програма «Програма проведення фундаментальних досліджень з атомної науки і техніки ННЦ ХФТІ на 2011-2015 рік», яка виконувалася за постановою Бюро відділення ЯФЕ НАН України від 07.10.2010 р., протокол №7(76), державний реєстраційний номер 0111U008993.

**Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Обґрунтованість наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, базується на аналізі літературних джерел, з якого органічно випливає постановка мети і задач дослідження, використанні добре перевірених фізичних моделей, критичному співставленні отриманих результатів з відомими експериментальними даними, аргументованому формулюванні остаточних висновків. Наукова обґрунтованість дисертаційної роботи досягалася

застосуванням відомих уявлень та апробованих моделей і теорій про кінетику і термодинаміку власних, домішкових і радіаційних дефектів в напівпровідниках. Автор використовує уявлення про зонну структуру напівпровідників, теорію Шоклі-Ріда-Холла для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду, сучасні уявлення про їх розсіянні на фонах і структурних дефектах, апробовані емпіричні залежності. Достовірність отриманих результатів підтверджується високим ступенем кореляції отриманих розрахункових результатів з експериментальними даними опублікованими в науково-технічній літературі.

Основні положення й висновки дисертаційної роботи добре відповідають змісту отриманих результатів і є цілком **обґрунтованими і достовірними**.

**До основних нових наукових результати дисертації слід віднести наступні:**

1. Побудована модель електричної компенсації для довільної кількості різнотипних домішок і дефектів у поєднанні з апробованими моделями розсіювання та рекомбінації дозволяє обчислювати електронну рухливість, питомий опір, положення рівня Фермі, час життя нерівноважних носіїв заряду для напівпровідників типу  $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$ , а також ефективність збору зарядів  $\eta$  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. Вперше 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 замість чисельного вирішення рівняння Больцмана.

3. Встановлено, що залежності  $\rho$  і  $\rho \cdot \tau \cdot \mu \cdot n$  для  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  від концентрації мілких донорів проходять через максимум і визначений склад детекторного матеріалу для досягнення максимальних  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\mu_n$ .

4. Показано, що для збільшення ефективності збору зарядів матеріал CdZnTe детекторів повинен складатися з двох різних частин: з  $p_0 \gg n_0$  біля анода та з  $p_0 \geq n_0$  біля катода.

5. Вперше встановлено, що в результаті рентгенівського опромінення CdTe:Cl та  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ , а також  $\gamma$ -опромінення  $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$  збільшується вміст електрично активних акцепторів, що демонструється зміщенням залежності питомого опору  $\rho$  від концентрації мілкового донора  $N_d$  в бік більших  $N_d$ ; при значних дозах (сотні кГр) опромінення деградація електрофізичних властивостей відбувається через зменшення  $\rho$ , а зменшення ефективності збору зарядів  $\eta$  – 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  $\rho$  і  $\eta$ .

6. Вперше з'ясована причина високої радіаційної стійкості  $\text{CdZnTe}$ , 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  $\rho$ .

**Практичне значення** одержаних результатів полягає насамперед в тому, що вони можуть використовуватись для розробки нових детекторних матеріалів на основі напівпровідникових сполук  $A_{III}B_V$  і  $A_{II}B_{VI}$ . Розроблений обчислювальний алгоритм дає можливість встановити оптимальний склад домішок та дефектів у напівпровідникових сполуках  $A_3B_5$  і  $A_2B_6$  з необхідними електрофізичними та детекторними властивостями. Розроблений підхід та одержані результати, які обґрунтовують необхідні умови застосування  $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CdZnTe}$  як матеріалів для приладів, що використовуються в ядерній дозиметрії, а також в мікро та оптоелектроніці. Сукупність одержаних результатів і сформульованих висновків про динаміку поведінки електрофізичних властивостей вихідних і опромінених  $\text{GaAs}$ ,  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CdZnTe}$  може стати основою для прогнозування змін характеристик детекторів іонізуючих випромінювань під впливом агресивного радіаційного середовища, що повинно сприяти розробці нових детекторних матеріалів для застосування в дозиметрії ядерного й іонізуючого випромінювання.

Розроблено підхід, придатний для проведення модельних досліджень напівпровідникових сполук кубічної симетрії типу  $A_{III}B_V$  і  $A_{II}B_{VI}$  з метою розробки матеріалів, які використовуються в приладах різного призначення.

Основні результати роботи **в повному обсязі** опубліковані у 18 наукових працях, з них 11 наукових статей у фахових журналах та 7 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. Автореферат **повно** та **точно** відображає зміст дисертації.

**По тексту та змісту дисертації можна зробити наступні зауваження:**

1. Зауваження стосуються здебільшого стилістики, однаковості позначень, також були вказані друкарські помилки.
2. У висновку до розділу 3 є пояснення того, чому електронна рухливість у

CdTe і CdZnTe мало залежить від концентрації домішок та дефектів за умови їх рівномірного розподілу в об'ємі кристалу. Бажано, щоб це важливе пояснення було в одному з висновків до всієї дисертаційної роботи.

## ВИСНОВОК

Вказані недоліки не знижують наукової і практичної значимості роботи, виконаної дисертантом.

На підставі викладеного вище слід зробити висновок про те, що дисертація Кондрика Олександра Івановича «Вплив радіаційних і фонових дефектів на властивості GaAs, CdTe, CdZnTe і детекторів іонізуючих випромінювань на їх основі» є завершеною науковою працею, де були отримані нові науково обгрунтовані результати, які в сукупності є суттєвими для розвитку напрямку, пов'язаного з проектуванням і створенням дозиметрів і спектрометрів іонізуючого випромінювання на основі високоомних напівпровідникових кристалів (GaAs, CdTe, CdZnTe и др.) і вирощуванням та обробкою цих кристалів.

Проведені в роботі дослідження відповідають паспорту спеціальності 01.04.21 – радіаційна фізика і ядерна безпека.

На мою думку, дисертація Кондрика О.І. відповідає всім вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, а також 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,

професор кафедри моделювання систем і технологій  
декан факультету комп'ютерних наук

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна  
доктор фізико-математичних наук, професор

В.Т. Лазурик

Підпис д-ра фіз.-мат. наук, проф. Лазурика

ЗАСВІДЧУЮ

вчений секретар

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна МОН України



Н.А. Віннікова