

## Відгук

офіційного опонента – Кондратенка Сергія Вікторовича доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача кафедри оптики Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України на дисертацію **Цао Цзесяня** «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

**Актуальність теми дисертаційної роботи Цао Цзесяня** полягає в забезпеченні потреб сучасної оптоелектроніки, сенсорики та розвитку фундаментальної теорії поверхневих явищ в напівпровідникових структурах. Функціоналізовані композитні структури мають широке застосування в таких областях як сонячні батареї, сенсорні елементи, детектори ядерного випромінювання.

На особливу увагу заслуговують передові дослідження в області термодинамічних та кінетичних процесів модифікування гетеросистем на основі телуриду кадмію, а саме встановлення та опис закономірностей дифузії легуючих атомів та генераційно-релаксаційних процесів у дефектній підсистемі при наносекундному лазерному опроміненні CdTe та систем плівка металу/напівпровідник, коли реалізуються умови локальної часової та(або) просторової нерівноважності, зазнає сильного впливу фізичної та геометричної нелінійностей, оскільки це дозволяє опмізувати технологічні процеси та характеристики ки при практичних застосуваннях. Сказане підтверджує, що виготовлення та дослідження оптоелектронних властивостей тонких плівок CdTe є важливою і актуальною задачею. Дослідження в цій роботі термодинамічних та кінетичних процесів модифікування гетеросистем на основі телуриду кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання являється перспективним напрямком розвитку детектування детекторів випромінювання.

**Загальні відомості про структуру дисертації та аналіз її змісту.** Дисертація є завершеним науковим дослідженням, підкріпленим повним набором необхідних експериментальних даних, необхідних для доказу усіх отриманих результатів. Робота складається із анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 136 сторінок у тому числі: 117 сторінок основного тексту, 26 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел із найменувань на 18 сторінках У вступі наведено тему,



актуальність, мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність результатів.

**Перший розділ дисертації** присвячено огляду та аналізу літературних даних по темі дисертаційної роботи. Розглянуто фізико-хімічні властивості (структурні, оптичні та електричні, структурні дефекти)  $CdTe$  який є одним з технологічно важливих напівпровідникових матеріалів, що мають важливі області застосування оптоелектроніці, фотовольтаїці та сенсориці, Розглянуто та проаналізовано роботи стосовно модифікації фізичних властивостей  $CdTe$  при виготовленні структур і приладів різного призначення на їх основі.

**У другому розділі** описано методику основних експериментів. Наведено основні методи досліджень властивостей та створення досліджуваних структур на основі  $CdTe$ : технологічні процеси підготовки кристалів  $CdTe$  для досліджень і виготовлення діодних структур  $In/CdTe/Au$ ; хіміко-динамічна обробка поверхні кристалів; формування електродів; формування легованого шару, люмінесценція, фотопровідність, дослідження вольт-амперних характеристик створених діодних структур  $In/CdTe/Au$ .

**Третій розділ** присвячений результатам моделювання дифузійного руху наночастинок у кристалі  $CdTe$  при лазерно-індукованому легуванні. Застосування лазерного випромінювання для легування кристалів  $CdTe$  в аргоні доводить, що діоди  $In/CdTe/Au$  вироблені при енергетичній густині:  $170 \text{ мДж/см}^2$  мають дуже високі випрямні властивості. Зокрема, конструкція має дуже високий прямий струм при відносно малому струмі витоку. Це є проста і реалізуєма версія теорії технології легування кристалів і формування діодних структур. Підтверджено переваги лазерного легування кристалів  $CdTe$ .

Лазерне легування шляхом опромінення структури  $In/CdTe$  за допомогою наносекундних лазерних імпульсів – це твердофазний процес без нагрівання великої кількості кристалів  $CdTe$ , що дозволяє уникнути пошкодження кристала. Під дією лазера долається феномен самокомпенсації легуючих домішок і вводиться висока концентрація  $In$  в тонкий поверхневий шар  $CdTe$ . Отже, в області поверхні  $CdTe$ , можна отримати неглибокі і гострі  $p-n$  переходи. Підтверджена перевага лазерного легування з відносно товстою легуючою плівкою  $In$ . Однією з ключових особливостей лазерної технології для легування шару кристалічного  $CdTe$   $p$ -типу з дуже високою концентрацією домішок  $n$ -типу є використання відносно товстої легуючої плівки  $In$ .

Лазерно-індуковане легування забезпечує уникнення нагріву області товстої плівки  $In$  і кристалу  $CdTe$ , та термічно індукованих змін і погіршення структури, характеристик напівпровідника. Розроблена методика лазерно-індукованого легування і утворення  $p-n$  переходу в кристалах  $CdTe$  була успішно використана для виготовлення детекторів рентгенівських та  $\gamma$ -рентгенівських променів, які були використані в приладах з питань моніторингу та безпеки навколишнього середовища.



**Четвертий розділ** характеризує результати досліджень механізмів масопереносу індію в  $Cd(Zn)Te$  при дії наносекундних лазерних імпульсів. Отримано профіль розподілу атомів індію в телуриді кадмію  $p$ - типу після однократного опромінення структури  $In/CdTe$  з боку плівки індію товщиною 30 нм імпульсом ексімерного ( $\lambda = 248$  нм) лазера тривалістю  $\tau_p = 20$  нс при густині енергії  $E_{nad} = 100$  мДж/см<sup>2</sup>. Дана величина густини енергії є оптимальною для формування інверсного приповерхневого шару ( $n$ - типу). Проведено аналіз спектрів пропускання фотопровідності та фотолюмінесценції.

Виявлено, що глибина дифузії становить 100 нм і спостерігається пік при 6 нм, що вказує на перевищення дрейфової складової швидкості атомів за дифузійну. Встановлено, що коефіцієнт масопереносу атомів  $In$  в  $CdTe$  при наносекундному лазерному опроміненні структури плівка  $In/CdTe$  залежить від відстані від поверхні  $CdTe$  і зростає, що пов'язано зі швидкою зміною з часом неоднорідної деформації кристалічної решітки (наростанням та спадом  $gradP$ ) у процесі дифузії індію. Визначено коефіцієнти масопереносу індію в  $CdTe$  у різних областях при наносекундному опроміненні ексімерним лазером структури  $In/CdTe$ .

**У п'ятому розділі** розглянуто результати досліджень залежності порога плавлення  $CdTe$  від довжини хвилі та часу дії імпульсу лазерного випромінювання. Було знайдено що в діапазоні протяжності лазерних імпульсів в межах від 7 нс до 120 нс, поріг плавлення  $CdTe$  значно залежить від коефіцієнта поглинання  $\alpha(\lambda)$ . Завдяки тому що глибина теплової дифузії стає значно більше ніж глибина проникнення лазерного випромінювання в  $CdTe$  для імпульсів протяжністю довше ніж 1 мкс, вона починає залежати від спектральної залежності коефіцієнта відбивної здатності  $R(\lambda)$ . Було встановлено що поріг плавлення значно змінюється коли довжина хвилі випромінювання  $\lambda$  змінюється для більш коротших протяжностей лазерних імпульсів  $\tau_p$ . Було знайдено що зміни в параметрах нерівноважних надлишкових носіїв, таких як збільшення в швидкості поверхневої рекомбінації  $C$  від  $10^3$  м/с до  $10^5$  м/с і також в глибині дифузії  $L_D$  від 0,4 мкм до 2 мкм може змінювати поріг плавлення  $CdTe$  щонайменше на 25%. Модуляція протяжності імпульсів рубінового лазера в межах  $(20 \pm 5)$  нс приводить до 35% зміни відносного порога плавлення  $\Delta I_{th}/I_{th}$ . Обчислені значення порога плавлення  $CdTe$  добре співвідносяться добре з експериментальними даними відомими з літератур. Отримані результати були використані для оптимізації лазерно-стимульованої обробки поверхні і стимульованого легування кристалів  $CdTe$ .

**У шостому розділі** наведено результати досліджень процесів масопереносу індукованих лазерними наносекундними імпульсами та формування сильнолегованих шару в твердих розчинах на основі телуриду кадмію. Було встановлено, що домінуючим механізмом масопереносу при наносекундному лазерному твердофазному легуванні  $CdTe$  індієм є бародифузія. Відповідно, інтенсивне та швидке проникнення атомів індію в  $CdTe$  при наносекундному лазерному опроміненні структури  $In/CdTe$  обумовлене значними градієнтами термонапруг, що виникають за рахунок швидких процесів нагріву, плавлення, паро- і



плазмоутворення з «ударними» швидкостями протікання. Тому при формуванні різкого *p-n*-переходу на малій глибині у *CdTe* при створенні детекторів доцільним є забезпечення різких градієнтів тиску, а не значний нагрів. Показано, що механізми концентраційної дифузії індію в *CdTe* і зтягування атомів *In* фронтом лазерно-індукованої ударної хвилі при її виникненні та поширенні не є домінуючими та визначальними механізмами масопереносу індію в структурі *In/CdTe* з товщиною плівки *In* 30-400 нм при наносекундному лазерному опроміненні. Встановлено, що середня дрейфова швидкість переміщення атомів *In* в *CdTe* при наносекундному лазерному опроміненні структури *In/CdTe* при  $E_{nao} = 100$  мДж/см<sup>2</sup> становить за різними розрахунками 3...24 см/с. Атоми *In* дифундують під дією механічної сили градієнту деформацій. Зроблені теоретичні розрахунки в рамках даної роботи можуть бути застосовані до більшості структур плівка металу-напівпровідник для проведення аналізу масопереносу у поверхневих шарах та об'ємі структури при інтенсивному лазерному опроміненні в процесі виготовлення функціональних напівпровідникових структур різного роду застосування.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розробці методики лазерно-індукованого легування і утворення *p-n* переходу в кристалах *CdTe*. Під дією лазерного випромінювання долається феномен самокомпенсації легуючих домішок і вводиться висока концентрація *In* в тонкий поверхневий шар *CdTe* і можна отримати мілкі та різкі *p-n* переходи. Підтверджена перевага лазерного легування з відносно товстою легуючою плівкою *In*. Вищенаведена методика забезпечує лазерно-індуковане легування без нагріву області товстої плівки *In* і кристалу *CdTe*, уникаючи термічноіндукованих змін та погіршення структури і характеристик напівпровідника.

Встановлено, що домінуючим механізмом масопереносу при наносекундному лазерному твердофазному легуванні *CdTe* індієм є бародифузія. Відповідно, інтенсивне та швидке проникнення атомів індію в *CdTe* при наносекундному лазерному опроміненні структури *In/CdTe* обумовлене значними градієнтами термонапруг, що виникають за рахунок швидких процесів нагріву, плавлення, паро- і плазмоутворення з «ударними» швидкостями протікання.

Показано, що механізми концентраційної дифузії індію в *CdTe* і зтягування атомів *In* фронтом лазерно-індукованої ударної хвилі при її виникненні та поширенні не є домінуючими та визначальними механізмами масопереносу індію в структурі *In/CdTe* з товщиною плівки *In* 30-400 нм при наносекундному лазерному опроміненні.

**Практична цінність дисертаційної роботи** полягає у тому, що розроблену методику лазерно-індукованого легування і утворення *p-n* переходу в кристалах *CdTe* можна використовувати для виготовлення детекторів рентгенівських та  $\gamma$ -рентгенівських променів в приладах з питань моніторингу та безпеки навколишнього середовища.

**Ступінь обґрунтованості отриманих результатів** у дисертаційній роботі є повним. Всі зроблені спостереження та експериментальні дані мають адекватні підтвердження, отримані різними методами. Поставлена мета роботи, яка полягала у дослідженні термодинамічних та



кінетичних процесів модифікування гетеросистем на основі телуриду кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання., була успішно досягнута дисертантом. Всі зроблені твердження та пояснення підтримані необхідним набором досліджень. Рисунки, таблиці та схеми оформлені ретельно, лаконічно та змістовно.

**Академічна доброчесність.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 5 статтях у фахових вітчизняних та міжнародних наукових журналах (3 з них включені до міжнародної науково-метричної бази SCOPUS , (2 статті у 3 квартилі, 1 – стаття у 4 квартилі), 2 статті у збірнику наукових праць) та 4 тези доповідей на конференціях. Зміст анотації, поставлені мета та задачі відповідають ключовим положенням представленої дисертаційної роботи. Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що робота *Цао Цзесяна* є результатом оригінальних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, плагіату та запозичень. Наведені в дисертації ідеї, результати та тексти інших авторів мають необхідне посилання на відповідне першоджерело.

#### **Зауваження та загальна оцінка роботи.**

Однак, є кілька зауважень і запитань до дисертаційної роботи:

1. У якому програмному продукті проводили моделювання процесів лазерно-індукованого легування? Це була власна програма чи якась інша?
2. Не деталізовано яким чином було визначено швидкість поверхневої рекомбінації та підставі чого зроблено висновок про її збільшення від  $10^3$  м/с до  $10^5$  м/с після опромінення наносекундними лазерними імпульсами.
3. Було б доцільно більш детально навести в чому полягала оптимізація методу легування у порівнянні з іншими варіантами технологічних процесів лазерно-індукованого легування.
4. Зміна форми ВАХ структури In/CdTe/Au до (1) та після (2) опромінення (рис.6.5.) вказує на суттєву зміну механізму електропровідності. В роботі не наведено аналізу форми прямої гілки ВАХ і не враховано можливість висоти потенціального бар'єру.
5. В тексті роботи наявні граматичні і стилістичні помилки.

Варто зазначити, що згадані недоліки не стосуються наукових результатів, отриманих у роботі. Вони не впливають на позитивне враження від даної роботи, яка виконана та оформлена ретельно та логічно. Зміст роботи повністю відповідає темі дисертаційного дослідження. Робота виконана на високому науковому рівні та викладена українською мовою.

**Висновок про відповідність дисертації умовам положення.** Загалом, дисертаційна робота є повноцінним та завершеним дослідженням, яке відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. №261 (зі змінами) та вимогам Порядку присудження ступеня

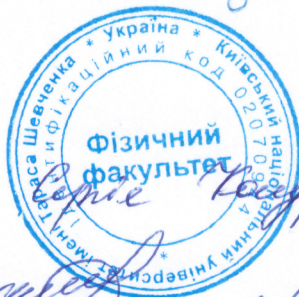


доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому Постановою КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022 р.), а її автор **Цао Цзесян** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри оптики  
Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка МОН України,

*СХ*  
Сергій КОНДРАТЕНКО



*Відгук д.ф.-м.н.*

*Відгук на рішення завідувача:*  
*проф. фах.в. Ірина Каленя*