

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Цао Цзесяна

на тему «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань «10 природничі науки»  
за спеціальністю «105 прикладна фізика та наноматеріали»

### Актуальність теми дисертації.

Сучасні технології в оптиці, фотоніці, оптоелектроніці та сенсоріці потребують нових та ефективних рішень, де ключовим напрямом є розробка нових функціональних матеріалів з необхідними властивостями, тому однією з актуальних задач в цьому напрямку є розробка та створення нових матеріалів із наперед заданими фізичними властивостями. CdTe є перспективним матеріалом для детекторів та сонячних елементів. Для виготовлення детекторів використовується високоомний напівпровідник CdTe. Характеристики матеріалу, такі як атомний номер елементів сполуки (48, 52), густина матеріалу ( $7.3 \text{ г/см}^3$ ) та ширина забороненої зони (1.5 eV) сприяють сильному поглинанню високоенергетичних фотонів і, відповідно, високу ефективність детектування. Цьому також сприяють такі електронні властивості сполуки (час життя носіїв заряду, рухливість). Вищенаведені характеристики матеріалу і є тими перевагами, які роблять CdTe перспективним матеріалом для детекторних та сенсорних застосувань.

Одним з ефективних методів управління властивостями напівпровідників є метод лазерної обробки, використання якого дозволяє в залежності від співвідношення величини кванта лазерного випромінювання  $h\nu$  та ширини забороненої зони  $E_g$  трансформувати його приповерхневі ( $h\nu > E_g$ ) чи об'ємні ( $h\nu < E_g$ ) властивості. При лазерностимульованій модифікації поверхні напівпровідників є актуальним точне визначення порогу плавлення для оптимального контролю і керування фотоелектричними властивостями. Дисертаційні дослідження присвячені встановленню та опису закономірностей термодинамічних (нагрів, фазові переходи) та кінетичних (дифузія, масоперенос) процесів у телуриді кадмію та гетеросистемі плівка металу/CdTe при потужному наносекундному лазерному опроміненні у різних середовищах, і, відповідно, вирішенню проблеми формування та керованої зміни фізичних

(електричних, фотоелектричних, оптичних) властивостей поверхневих шарів даних напівпровідників при реалізації умов істотного відхилення від термодинамічної рівноваги.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження базується на детальному експериментальному та теоретичному описі процесів дифузії (масопереносу, дефектоутворення) з урахуванням часової та просторової нелокальностей при наносекундному лазерному опроміненні напівпровідників, які є базою функціональної фото- та оптоелектроніки – CdTe, систем плівка металу/CdTe, Si. У дисертації отримано наступні наукові результати, які слід віднести до наукової новизни:

Розроблено методику лазерно-індуваного 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 неглибокі і гострі *p-n* переходи. Підтверджена перевага лазерного легування з відносно товстою легуючою плівкою In. Розроблена методика забезпечує лазерно-індуковане легування без нагріву області товстої плівки In і кристалу CdTe, уникаючи термічно індукованих змін та погіршення структури і характеристик напівпровідника.

Визначено коефіцієнти масопереносу індію в CdTe у різних областях при наносекундному опроміненні ексимерним лазером структури In/CdTe. Отримано профіль розподілу атомів індію в телуридї кадмію *p*-типу після однократного опромінення структури In/CdTe з боку плівки індію імпульсом ексимерного ( $\lambda = 248$  нм) лазера, визначена оптимальна величина густини енергії для формування інверсного приповерхневого шару (*n*-типу). 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  $\tau_p$ . 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



зумовлене 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-ідукованої 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.

Отже, в дисертаційній роботі Цао Цзесяна поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Цао Цзесяна повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності **105 прикладна фізика та наноматеріали** та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «**Прикладна фізика**».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям Фізика напівпровідників, твердотільних магнітних та немагнітних наноструктур та конденсованого стану.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння (виявлено 8.01% подібностей), можна зробити висновок, що дисертаційна робота Цао Цзесяна є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою та містить анотацію написану українською та англійською мовами. Робота написана науковим стилем, послідовно і доступно. В дисертації використовується загальноприйнята у фізиці термінологія.

Дисертація 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** дисертаційної роботи визначено об'єкт та напрями дослідження, сформульовано мету і завдання, визначено методи дослідження, обґрунтовано актуальність та наукову новизну роботи, практичну цінність одержаних результатів та наведено дані про публікації та апробацію дисертаційних досліджень.

**Перший розділ** присвячено огляду та аналізу літературних даних по темі дисертаційної роботи. Розглянуто та проаналізовано роботи стосовно модифікації фізичних властивостей CdTe при виготовленні структур і приладів різного призначення на їх основі.

У **другому розділі** 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 вольтамперних характеристик створених діодних структур In/CdTe/Au.

У **третьому розділі** наведено результати моделювання дифузійного руху наночастинок у кристалі CdTe при лазерно-індукованому легуванні. Підтверджена перевага лазерного легування з відносно товстою легуючою плівкою In. Розроблена методика лазерноіндукованого легування і утворення *p-n* переходу в кристалах CdTe була успішно використана для виготовлення детекторів рентгенівських та  $\gamma$ -променів, які були використані в приладах з питань моніторингу та безпеки навколишнього середовища.

У **четвертому розділі** наведено 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  $E_{\text{пад}} = 100$  мДж/см<sup>2</sup>. 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 у процесі дифузії індію. Визначено коефіцієнти масопереносу індію в CdTe у різних областях при наносекундному опроміненні ексімерним лазером структури In/CdTe з товщиною плівки In 30 нм.

У **п'ятому розділі** наведено результати досліджень залежності порога плавлення CdTe від довжини хвилі та часу дії імпульсу лазерного випромінювання. В розділі встановлено, що поріг плавлення значно змінюється коли довжина хвилі випромінювання  $\lambda$  змінюється для більш коротших протяжностей лазерних імпульсів  $\tau_p$ . Отримані результати були використані для



оптимізації лазерностимульованої 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. В розділі встановлено, що домінуючим механізмом масопереносу при 10 наносекундному лазерному твердофазному легуванні CdTe індієм є бародифузія. Показано, що механізми концентраційної дифузії індію в CdTe і зтягування атомів In фронтом лазерно-ідукованої 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.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 5 статтях у фахових вітчизняних та міжнародних наукових журналах (2 статті - третій квартиль міжнародних науково-метричних баз SCOPUS та WoS; 1 стаття - четвертий квартиль міжнародних науково-метричних баз SCOPUS та WoS), 2 статті у фаховому вітчизняному журналі та 4 тезах доповідей на конференціях. Після перегляду всіх наукових публікацій за темою дисертаційної роботи Цао Цзесяна можна зробити висновок, що в роботах наведено результати самостійних оригінальних досліджень, самі публікації мають високий науковий рівень та написані з дотриманням принципів академічної доброчесності.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Цао Цзесяна не позбавлена недоліків, основними з яких є наступні:

1. В експериментальній частині дисертації (параграф «фотолюмінесценція», стор. 52) вказано, що «криві фотолюмінесценції були нормовані по інтенсивності власної смуги». Виходячи з такого формулювання, незрозуміло, яка за фізичною природою смуга випромінювальної рекомбінації є власною.

2. У параграфі «4.4 Фотолюмінесценція», стор. 87, вказується на стимульоване лазерним опроміненням підвищення інтенсивності дефектної

смуги ФЛ. Проте, фізична природа дефектів, які спричиняють цю смугу не наводиться.

3. Яка природа смуги при 1.675 еВ? Вона зовсім не аналізується. Чому саме на її інтенсивність зроблено нормування?

4. В роботі наявна незначна кількість друкарських помилок і неточностей, зокрема в кінці назв розділів і підрозділів, а також підписах під рисунками наявні крапки, що не допускається згідно з ДСТУ 3008:2015.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії **Цао Цзесяня** на тему «**Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання**» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі **10 природничі науки**.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач **Цао Цзесян** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань **10 природничі науки** за спеціальністю **105 Прикладна фізика та наноматеріали**.

### Офіційний опонент:

Заступник завідувача відділу  
Кінетичних явищ та поляритоніки  
Інституту фізики напівпровідників  
імені В.Є. Лашкарьова НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук



Юрій НАСЕСКА

«03» *червня* 2025 року

