

РЕЦЕНЗІЯ

На дисертаційну роботу

Цао Цзесяна

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

подану на захист на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали
з галузі знань 10 Природничі науки

Актуальність теми дисертації.

Актуальність дослідження термодинамічних та кінетичних процесів модифікації CdTe та гетеросистем на його основі під впливом наносекундного лазерного випромінювання обумовлена зростаючою потребою в удосконаленні технологій формування функціональних напівпровідникових структур для оптоелектроніки, сенсорики та детекторів рентгенівського й гамма-випромінювання.

CdTe є перспективним матеріалом для детекторів та сонячних елементів. Одним з ефективних методів управління властивостями напівпровідників є метод лазерної обробки, який в залежності від співвідношення енергії фотона лазерного випромінювання і ширини забороненої зони дозволяє трансформувати його приповерхневі або об'ємні властивості. Робота присвячена встановленню та опису закономірностей термодинамічних та кінетичних процесів у телуриді кадмію та гетеросистемі «плівка металу/*CdTe*» при потужному короткодіючому лазерному опроміненні у різних середовищах.

Основна ідея полягає в тому, що короткочасне лазерне опромінення призводить до суттєвих змін у структурі напівпровідника через механізми

локального нагрівання, фазових перетворень та масопереносу легуючих атомів. Автор розглядає такі процеси:

- Термодинамічні зміни. Локальне нагрівання матеріалу під дією лазерного імпульсу викликає фазові переходи, включаючи плавлення, сублімацію та перекристалізацію.
- Кінетичні процеси масопереносу. Встановлено, що основним механізмом проникнення легуючих елементів у структуру CdTe є бародифузія, яка виникає внаслідок значних градієнтів термонапруг.
- Дефектоутворення та зміна електрофізичних характеристик. Лазерне опромінення дозволяє змінювати концентрацію точкових дефектів, впливаючи на електричні та фотоелектричні властивості матеріалу.

Варто зазначити, що у роботі аналізується поведінка напівпровідникових структур при значних відхиленнях від термодинамічної рівноваги, що сприяє нетепловим механізмам легування та модифікації матеріалу.

Визначення закономірностей і характеристик означених процесів має сприяти вирішенню проблеми формування та керованої зміни фізичних (електричних, фотоелектричних, оптичних) властивостей поверхневих шарів даних напівпровідників при реалізації умов істотного відхилення від термодинамічної рівноваги.

У роботі представлено комплексний підхід, що включає теоретичний аналіз, експериментальні методи дослідження, а також моделювання фізичних процесів масопереносу, сегрегації домішок та фазових перетворень. При теоретичному описі експериментальних результатів було враховано часову та просторову нелокальність у кінетичних явищах переносу. Все це сприяє покращенню характеристик структур на основі *CdTe* при практичних застосуваннях.

Результати дисертації дозволяють отримати контрольовані модифікації поверхневих шарів CdTe, що є перспективним для створення

напівпровідникових структур з покращеними характеристиками для оптоелектронних пристроїв та детекторів випромінювання. З огляду на це, тематика дисертаційної роботи Цао Цзєсяна є безумовно важливою і актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Розроблена методика лазерно-індукованого легування в кристалах *CdTe* і отримання неглибоких гострих *p-n* переходів. 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*, що убезпечує від термічно індукованих змін та погіршення структури і характеристик напівпровідника.

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

Визначено залежність порогу плавлення *CdTe* від довжини хвилі лазерного випромінювання та його тривалості. Було показано, що при зміні параметрів лазерного імпульсу можна регулювати температуру плавлення матеріалу. Було знайдено що в діапазоні тривалості лазерних імпульсів від 7 нс до 120 нс поріг плавлення *CdTe* значно залежить від коефіцієнта поглинання $\alpha(\lambda)$, а для імпульсів довше ніж 1 мкс починає залежати від спектрального коефіцієнта відбивної здатності $R(\lambda)$. λ змінюється для більш

коротших протяжностей лазерних імпульсів τ_p .

Встановлено, що домінуючим механізмом масопереносу при наносекундному лазерному твердофазному легуванні *CdTe* індієм є бародифузія. Інтенсивне та швидке проникнення атомів індію в *CdTe* зумовлене 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-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.

Описано механізми ультрашвидких фазових переходів у напівпровідниках, які відбуваються за часи, співмірні зі швидкістю поширення концентраційних збурень. Виявлено та описано ефект “замороження” активованих атомів, який дозволяє стабілізувати електрофізичні характеристики модифікованих шарів.

Отримані результати були отримані завдяки узгодженим ґрунтовному теоретичному та якісному експериментальному дослідженням, використанню сучасних методів моделювання, що підтверджує експериментальні результати, та встановленню оптимальних умов створення експериментальних зразків.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання дослідження термодинамічних та кінетичних процесів модифікації *CdTe* та гетеросистем на його основі під впливом наносекундного лазерного випромінювання

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 прикладну фізику, зокрема, технології напівпровідникових матеріалів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, 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.

Оцінка основного змісту, структури і оформлення дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел інформації. Загальний обсяг дисертації 136 сторінок.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, визначення мети та завдань досліджень, формулювання наукової новизни та практичного значення одержаних результатів. Виділено особистий внесок здобувача в досягнення результатів, представлених в дисертаційній роботі, та надано інформацію про апробацію роботи та публікації автора.

У першому розділі викладено огляд літератури за тематикою дисертації, який включає властивості $CdTe$ та області практичного застосування у 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 розглянуті експериментальні методики, що застосовувались в роботі. Основні методи досліджень властивостей та створення досліджуваних структур на основі $CdTe$ включали: технологічні процеси підготовки кристалів $CdTe$ для досліджень і виготовлення діодних структур $In/CdTe/Au$; хіміко-динамічна обробку поверхні кристалів; формування електродів; формування легованого шару, люмінесценцію, фотопровідність, дослідження вольт-амперних характеристик створених діодних структур $In/CdTe/Au$.

У третьому розділі наведено результати моделювання дифузійного руху наночастинок у кристалі $CdTe$ при лазерно-індукованому легуванні. Це є достатньо простою в реалізації технологією легування кристалів і формування діодних структур. Підтверджено переваги лазерного легування кристалів $CdTe$. За допомогою лазерного легування шляхом опромінення структури $In/CdTe$ за допомогою наносекундних лазерних імпульсів в області поверхні $CdTe$, можна отримати неглибокі і гострі $p-n$ переходи. Підтверджена перевага лазерного легування з відносно товстою легуючою плівкою In , яке дозволяє уникнути термічно індукованих змін та погіршення структури і характеристик напівпровідника.

В четвертому розділі наведено результати досліджень механізмів масопереносу індію в $Cd(Zn)Te$ при дії наносекундних лазерних імпульсів. Отримано профіль розподілу атомів індію в телурид кадмію p - типу після однократного опромінення структури $In/CdTe$ з боку плівки індію. Проведено аналіз спектрів пропускання фотопровідності та фотолюмінесценції.

Встановлено, що коефіцієнт масопереносу атомів *In* в *CdTe* при наносекундному лазерному опроміненні структури плівка *In/CdTe* залежить від відстані від поверхні *CdTe*, 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*.

В п'ятому розділі представлено результати досліджень залежності порогу плавлення *CdTe* від довжини хвилі та часу дії імпульсу лазерного випромінювання. Було знайдено що в діапазоні протяжності лазерних імпульсів поріг плавлення *CdTe* значно залежить від коефіцієнта поглинання $\alpha(\lambda)$. Було встановлено що поріг плавлення значно змінюється коли довжина хвилі випромінювання λ змінюється для більш коротших протяжностей лазерних імпульсів τ_p . 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*.

В шостому розділі наведено результати досліджень процесів масопереносу індукованих лазерними наносекундними імпульсами та формування інверсійних і варизонних шарів 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. Зроблені розрахунки в рамках даної роботи можуть бути застосовані до більшості структур плівка металу-напівпровідник для аналізу масопереносу (дифузійних процесів) у різних частинах об'єму структури при імпульсному лазерному опроміненні в процесі виготовлення

різноманітних функціональних напівпровідникових структур. Наведені електричні властивості опромінених структур *In/CdTe*.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 5 статтях у фахових вітчизняних та міжнародних наукових журналах: 2 статті в журналах, що мають квартиль Q3 в SCOPUS та WoS; 1 стаття – Q4 в SCOPUS та WoS, 2 статті у фаховому вітчизняному журналі. Також результати дисертації були апробовані на 4-х конференціях.

Науковий рівень публікацій здобувача разом із співавторами є високим і відповідає сучасному стану наукового напрямку на світовому рівні. В цих наукових працях, виконаних за темою дисертації, матеріали дисертації і основні наукові положення **викладені достатньо повним чином.**

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

- Наявна значна кількість граматичних помилок та синтаксичних помилок, що роблять деякі речення важкими для розуміння.
- Обмежена порівняльна база з альтернативними методами модифікації CdTe. У дисертації розглядається бародифузія, проте варто порівняти її ефективність із іншими підходами, такими, наприклад, як магнетронне розпилення, лазерне структурування квантових точок CdTe та ін.
- Недостатній аналіз довготривалої стабільності модифікованих структур. Було б корисно оцінити, як змінюються електрофізичні характеристики CdTe через тривалий період після лазерної модифікації.
- Обмежена експериментальна вибірка. Проведення додаткових експериментів дозволило б краще валідувати отримані висновки.

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.

Враховуючи актуальність, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота Цао Цзесяня «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2022р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанові КМ від 12.01.2022р. №44 «Про затвердження порядку присудження та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» із змінами і доповненнями, внесеними постановами Кабінету Міністрів України від 21 березня 2022 року N 341, від 19 травня 2023 року N 502 та від 3 травня 2024 року N 507, а її *автор Цао Цзесян заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали.*

Рецензент:

кандидат технічних наук,
доцент кафедри прикладної фізики
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Доцент



«02» червня 2025 року