

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи

Національного технічного

університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»

к.т.н. доц.

Тетяна ЖЕЛЯСКОВА



12 березня 2025 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 4 від 12 березня 2025 р. розширеного засідання

кафедри Прикладної фізики

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БУЛИ ПРИСУТНІ:

- 3 кафедри прикладної фізики:

1. Доктор фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри, Монастирський Г.Є.;
2. Доктор техн. наук, професор, Воронов С.О.;
3. Кандидат техн. наук, доцент, Іванова В.В.;
4. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Кондаков В.О.;
5. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Пономаренко С.М.;

6. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Гордійко Н.О.;
7. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Долгошей В.Б.;
8. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Кривенко-Еметов Я.Д.;
9. Кандидат фіз.-мат. наук, старший викладач, Катасонов А.А.;
10. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Гільчук А.В.;
11. Старший викладач, Бех С.В.;
12. Фахівець першої категорії, Ткач В.С.;
13. Д-р. філ., ас., Чиркова А.П.;
14. Д-р. філ., ас., Ольховик І.В.

- Запрошені з інших організацій:

1. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор Стронський О.В.;
2. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Кандидат техн. наук, ст. дослідник Левицький С.М.;

СЛУХАЛИ:

1. Повідомлення аспіранта кафедри прикладної фізики Цао Цзесяна за матеріалами дисертаційної роботи «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання» поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. Освітньо-наукова програма Прикладна фізика.

Тему дисертаційної роботи «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання» затверджено на засіданні Вченої ради Фізико-технічного інституту (протокол № 16 від “25” жовтня 2021 року).

Науковими керівниками затверджені:

1. Доктор фіз.-мат. наук, професор Стронський О.В.;
2. Кандидат техн. наук, ст. дослідник Левицький С.М.

2. Запитання до здобувача.

Запитання по темі дисертації ставили:

1. Доктор техн. наук, професор, Воронов С.О.:
 - У чому полягала практична цінність дисертаційної роботи?
 - Технологія отримання вихідного матеріалу?
 - Який профіль отриманого легованого шару?
 - Відмінності методу легування та формування легованого шару?
2. Кандидат техн. наук, доцент, Іванова В.В.:
 - Завдання, які ставились у дисертаційній роботі?
 - Переваги імпульсного лазерно-індукованого легування CdTe?
 - Пояснення збільшення сегрегації, дифузії і розчинності домішки?
 - Пояснення спектрів фотолюмінесценції p-CdTe?
 - Чи проводились тестові дослідження отриманих структур?
 - На якому програмному продукті проводили математичне моделювання процесів, що протікають?
3. Доктор фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри, Монастирський Г.Є.:
 - Аналіз ВАХ отриманих структур?
 - Обладнання, на якому проводились дослідження?
 - Аналіз спектрів фотопровідності отриманих структур?
 - Глибина формування легованого шару?

3. виступи за обговореною роботою.

В обговоренні дисертації взяли участь:

1. Доктор фіз.-мат. наук, професор Стронський О.В.;
2. Кандидат техн. наук, ст. дослідник Левицький С.М.;
3. Кандидат техн. наук, доцент, Іванова В.В.;
4. Доктор фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри, Монастирський Г.Є.;
5. Кандидат фіз.-мат. наук, доцент, Гордійко Н.О.;
6. Доктор техн. наук, професор, Воронов С. О.;

УХВАЛИЛИ:

ПРИЙНЯТИ такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження:

1. Актуальність теми дослідження:

Сучасні технології в оптиці, фотоніці, оптоелектроніці та сенсориці 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 заборонена зона (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). Вищенаведенні 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 $\hbar\omega$ та ширини забороненої зони E_g трансформувати його при поверхневій ($\hbar\omega > E_g$) чи об'ємній ($\hbar\omega < E_g$) 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. При теоретичному описі експериментальних результатів було враховано часову та просторову нелокальність у кінетичних явищах переносу.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі прикладної фізики Фізико-технічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України у відділах фізики оптоелектронних приладів та оптоелектроніки у рамках: держбюджетної науково-дослідної теми «Електричні, оптичні та фотоелектричні характеристики систем з наноструктурованими поверхнями та нанокристаллами, фізичні механізми перетворення випромінювання в сучасних оптоелектронних структурах для розроблення новітніх пристроїв оптоелектроніки, сенсорики, енергоощадних засобів освітлення, засобів реєстрації і збереження інформації» (ІІІ-04-21), державний реєстраційний номер 0121U107979; а також у рамках співпраці з підрозділом «Матеріали для енергетики та оптоелектроніка» лабораторії Сонгхан лейк матеріалс, Донггуан, Гуандонг 523808, Китай (Energy Materials and Optoelectronics Unit, Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China), договора про співпрацю Фізико-технічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (кафедра прикладної фізики) та Інституту фізики напівпровідників

ім. В.Є. Лашкарьова НАН України у відділах фізики оптоелектронних приладів та оптоелектроніки.

3. Наукова новизна отриманих результатів:

Новизна дисертаційних досліджень 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 було отримано *наступні наукові результати*:

Розроблена методика 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 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 телуриді 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 λ змінюється для більш коротших протяжностей лазерних імпульсів τ_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* обумовлене значними градієнтами термонапруг, що виникають за рахунок швидких процесів нагріву, плавлення, паро- і плазмоутворення з «ударними» швидкостями протікання. Тому при формуванні різкого р-п-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.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи:

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у тому, що розроблена методика лазерноіндукованого легування і утворення р-п переходу в кристалах *CdTe* була успішно використана для виготовлення детекторів рентгенівських та γ -рентгенівських променів, які були використані в приладах з питань моніторингу та безпеки навколишнього середовища.

Отримані результати показують можливість контрольованої модифікації фізичних властивостей *CdTe* при виготовленні структур і приладів різного призначення на їх основі шляхом зміни концентрації домішкових атомів і власних точкових дефектів у різних частинах об'єму *CdTe* при ІЛО та були використані для оптимізації лазерностимульованої обробки поверхні і стимульованого легування кристалів *CdTe*.

5. Апробація/використання результатів дисертації:

Результати досліджень доповідались та обговорювались на 8 всеукраїнських та міжнародних конференціях:

1. XI-th International Conference “Topical Problems of Semiconductors Physics” / Edited by Ihor Stolyarchuk. – Drohobych 2024.
2. IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН–9». Ужгород, Україна 22 - 26 травня 2023 року.
3. VIII Міжнародна науково-практична конференція «ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА: СТАН, ДОСЯГНЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ», м. Луцьк, 2024.

6. Дотримання принципів академічної доброчесності:

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Цао Цзесяна визнана оригінальною роботою, яка не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 9 наукових публікацій, у тому числі:

- 3 статті у виданнях, віднесених до першого – четвертого квартилів (Q1 – Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, чи одноосібних монографій, що відповідають зазначеним вимогам;
- 4 тез виступів на наукових конференціях;
- 2 статті, що додатково відображають результати дисертації (у наукових фахових виданнях України за іншою спеціальністю) та є міждисциплінарними відповідно до мети статті (поставленого завдання) та висновків відповідають темі дисертаційного дослідження.

1. S.M. Levytskyi, T. Zhao, Z. Cao, A.V. Stronski. Modeling of Diffusion Motion of in Nanoparticles in a *CdTe* Crystal during Laser-Induced Doping Physics and Chemistry of Solid State V. 22, No. 2 (2021) pp. 301-306 DOI: [10.15330/pcss.22.2.301-306](https://doi.org/10.15330/pcss.22.2.301-306) (Web of Science Core Collection, SCOPUS Q4).

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз лазерно-індукованого легування при поверхневого шару, проведено розрахунок температурного профілю при поверхневого шару, проведено аналіз та моделювання спектрів фотопровідності, проведено аналіз існуючих методів виготовлення детекторних структур.

2. LEVYTSKYI Serhii, CAO Zexiang, KOBA Alexander, KOBA Maria Dependence of the Melting Threshold of CdTe on the Wavelength and Pulse Lifetime of Laser Radiation Materials Reports 2024, Vol. 38, No. 7 22120127-1 - 22120127-6 DOI:[10.11896/cldb.22120127](https://doi.org/10.11896/cldb.22120127) . (Web of Science Core Collection, SCOPUS Q4).

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз процесів, що протікають під час впливу лазерного випромінювання на приповерхневі шари структури метал/напівпровідник, проведено розрахунок ударної та теплової хвилі, термодифузії, проведено аналіз та моделювання процесів легування та формування діодних структур

3. S. Levytskyi, Z. Cao, O. Koba, M. Koba Change of the Optoelectronic Properties of Semiconductor Compounds Induced by Nanosecond Laser Irradiation Pulses / *Physics and Chemistry of Solid State V. 25, No. 4 (2024) pp. 892—902*. DOI:[10.15330/pcss.25.4.892-902](https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.892-902) (Web of Science Core Collection, SCOPUS Q3).

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз спектрів пропускання та вольтамперних характеристик отриманих діодних структур, проведено розрахунок параметрів процесу легування при поверхневого шару, запропоновано метод твердофазного легування при поверхневого шару.

Особистий внесок здобувача полягає в опрацюванні результатів експерименту. Підготовка тез доповідей. Представлення матеріалів на конференціях.

4. Цао Цзесян, Дмитро Гнатюк, Сергій Левицький. Особливості фотоелектричних та електричних властивостей діодів на основі CdTe / 9-та Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції, Ужгород, 22 - 26 травня 2023, с. 342-343.

Здобувачем отримано експериментальні результати, визначені особливості фотоелектричних та електричних властивостей діодів та основі CdTe.

5. Cao Z., Levytskyi S.M., Stronski A.V. Features of the origin and propagation of a shock wave in semiconductors during nanosecond laser irradiation / Proceedings of the XI-th International Conference “Topical Problems of Semiconductors Physics” / Edited by Ihor Stolyarchuk. – Drohobych, MAY 27-31, 2024, p. 80

Здобувачем отримано експериментальні результати з особливостей виникнення та поширення ударної хвилі в напівпровідниках при наносекундному лазерному опроміненні.

6. Ц. Цао, С.М. Левицький, О.В. Стронський. Лазерно-стимульована модифікація напівпровідників / Матеріали VIII Міжнародна науково-практична конференція «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи», м. Луцьк, 18.10.2024 – 19.10.2024р., м. Луцьк: IBV ЛНТУ, 2024. С.147.

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз механізмів лазерно-стимульованої модифікації напівпровідників.

7. Ц. Цао, С.М. Левицький, О.В. Стронський. Акустичний відгук в напівпровідниках при лазерному опроміненні / Матеріали VIII Міжнародна науково-практична конференція «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи», м. Луцьк, 18.10.2024 – 19.10.2024 р., м. Луцьк: IBV ЛНТУ, 2024. С.148-149.

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз акустичного відгуку в напівпровідниках при лазерному опроміненні.

8. С.М. Левицький, Ц. Цао, О.В. Стронський. Механізми масопереносу індію в Cd(Zn)Te при дії наносекундних лазерних імпульсів. Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка, 2023, вип. 58 С.178-186/. doi: <https://doi.org/10.15407/iopt.2023.58.178> (Фахове видання категорії Б, спеціальність 105 відсутня).

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз механізмів масопереносу при імпульсному лазерному опроміненні (ІЛО) напівпровідникових матеріалів, проведено розрахунок теплових процесів, що виникають при ІЛО, проведено аналіз та моделювання механізмів масопереносу у при поверхневій області метал/напівпровідник.

9. С.М. Левицький, Ц. Цао, О.В. Стронський. Лазерно-індуковані наносекундними імпульсами процеси масопереносу та формування інверсійних і варізонних шарів в твердих розчинах на основі телуриду кадмію. Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка, 2024, вип. 59, С.124-132 <https://doi.org/10.15407/iopt.2024.59.124> (Фахове видання категорії Б, спеціальність 105 відсутня).

Здобувачем отримано експериментальні результати, проведено аналіз спектрів пропускання та фотолюмінесценції, проведено розрахунок порогу плавлення при поверхневого шару напівпровідникового матеріалу, проведено аналіз існуючих методів виготовлення детекторних структур.

Якість та кількість публікацій відповідають “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”.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Цао Цзесяна «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання», що подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали за своїм науковим рівнем, новизною отриманих результатів, теоретичною та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що пред'являють до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КПІ ім. Ігоря Сікорського Прикладна фізика зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

РЕКОМЕНДУВАТИ:

1. Дисертаційну роботу «Термодинамічні та кінетичні процеси модифікування гетеросистем на телуриді кадмію, ініційовані наносекундною дією інтенсивного лазерного випромінювання», подану Цао Цзесяном на здобуття наукового ступеня доктора філософії, до захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

2. Вченій раді КПІ ім. Ігоря Сікорського утворити разову спеціалізовану вчену раду у складі:

Голова:

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» **Воронов Сергій Олександрович**.

Члени:

Рецензенти:

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» **Іванова Вікторія Вікторівна;**

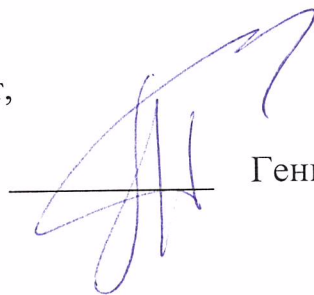
Доктор технічних наук, професор, декан фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» **Котовський Віталій Йосипович.**

Офіційні опоненти:

Доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри оптики Київського національного університету імені Тараса Шевченка **Кондратенко Сергій Вікторович;**

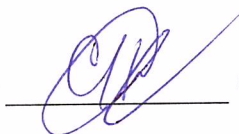
Доктор фізико-математичних наук, заступник завідувача відділу кінетичних явищ та поляризації Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України **Насека Юрій Миколайович.**

Головуючий на засіданні
доктор фіз.-мат. наук, доцент,
завідувач кафедри
прикладної фізики



Геннадій МОНАСТИРСЬКИЙ

Вчений секретар
кафедри прикладної фізики
кандидат фіз.-мат. наук, доцент



Сергій ПОНОМАРЕНКО