



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Іван ДЕМИДОВ

22 " 05 2025 р.

Висновок

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для
приладових структур терагерцового діапазону»**

здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю

153 Мікро- та наносистемна техніка

(галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування)

Владислава АРІКОВА

міжкафедрального наукового семінару Навчально-наукового

Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та

електронної інженерії

1. Актуальність теми дисертації

Підвищення ефективності фотонних пристроїв терагерцового (ТГц) діапазону є одним із ключових завдань сучасної оптоелектроніки, твердотільної електроніки та нанотехнологій. Основною вимогою до матеріалів, які застосовуються у модуляторах, випромінювачах і детекторах ТГц-випромінювання, є поєднання високого питомого опору з надзвичайно коротким часом життя нерівноважних носіїв заряду. Найбільш перспективним матеріалом, що відповідає цим вимогам, залишається низькотемпературний арсенід галію (НТ-GaAs), отриманий шляхом кристалізації за умов глибоко нерівноважного росту.

Найпоширенішим методом отримання такого матеріалу є низькотемпературна молекулярно-променева епітаксія, яка забезпечує вбудовування надлишкового нестехіометричного арсеніду у кристалічну решітку, утворюючи точкові дефекти типу As_{Ga} , V_{Ga} та As_i . Ці дефекти створюють глибокі енергетичні рівні в забороненій зоні та слугують ефективними центрами безвипромінювальної рекомбінації. Результатом є формування матеріалу з питомим опором до 10^8 Ом·см і часом життя носіїв на рівні ~ 1 пс. Однак такі шари характеризуються високим рівнем кристалічної недосконалості, значними внутрішніми напруженнями та термічною нестабільністю.

Альтернативою нерівноважному росту є метод низькотемпературної рідкофазної епітаксії (НТ-РФЕ), який дозволяє поєднати переваги рівноважного механізму кристалізації з можливістю введення складних легуючих домішок. Завдяки застосуванню диспрозію та алюмінію як легуючих елементів до галієвого розплаву, вдається забезпечити контрольовану зміну електрофізичних параметрів матеріалу — зниження концентрації та рухливості носіїв заряду при збереженні високої омності. Водночас, на відміну від методів газофазної епітаксії, НТ-РФЕ не вимагає екстремальних умов вакууму та є стабільнішою щодо введення рідкісноземельних елементів.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню технологічних процесів формування низькотемпературних шарів GaAs методом рідкофазної епітаксії, аналізу впливу морфологічних і електронних дефектів на фотопровідні властивості матеріалу, а також оптимізації легування з метою отримання структур із заданими електрофізичними характеристиками. У роботі вивчається формування точкових дефектів у режимах надлишкового арсеніду, досліджується вплив типу та концентрації легуючих домішок на рівень компенсації та локалізацію рівня Фермі, а також аналізуються релаксаційні процеси носіїв заряду в умовах високої дефектності. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні технологічної платформи для виготовлення високоякісних ТГц-активних матеріалів, придатних для використання у фотоніці, сенсоріці та пристроях надшвидкої електроніки.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертаційне дослідження «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» виконано відповідно до пріоритетних наукових напрямів кафедри напівпровідникової електроніки та Національного університету «Львівська політехніка» у галузі 15 – Автоматизація та приладобудування. Зокрема, тема дисертації узгоджується з такими напрямами:

«Сенсори та перетворювальні прилади на основі напівпровідникових матеріалів і гетероструктур»;

«Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей функціональних матеріалів мікро- та наноелектроніки»;

«Фотоніка та приладобудування терагерцового діапазону».

Окремі результати дослідження виконано в межах держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України «Розроблення наукових і технологічних основ створення елементів мікро- і наносистемної техніки на основі базових сенсорних напівпровідникових кристалів та наноструктур» (2020–2022 рр., номер державної реєстрації 0120U102202).

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Основні наукові та практичні результати дисертації отримано за безпосередньої участі автора, або автором самостійно. Формулювання теми, мети, завдань досліджень, а також обговорення, аналіз та інтерпретацію основних результатів експериментів здобувач здійснював спільно з науковими керівником д.т.н., професором Круковським С.І. Приготування та відбір серії

зразків для досліджень їх структури і електрофізичних властивостей здобувач проводив особисто. Експерименти з використанням методу низькотемпературної рідинно-фазної епітаксії здійснено за безпосередньої участі здобувача, або здобувачем самостійно.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Експериментальні результати отримано, використовуючи спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення. Чисельні результати отримано за допомогою перевірених та апробованих математичних методів, які базуються на фундаментальних законах математики і фізики. Проведені експерименти були багаторазово повторені за різних умов, що підтверджує відтворюваність результатів. Обґрунтованість висновків підтверджується їх відповідністю сучасним теоретичним уявленням. Результати роботи демонструють узгодженість між собою, а також корелюють з матеріалами публікацій інших авторів за даною тематикою.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Наукова новизна отриманих результатів досліджень полягає у комплексному вивченні технологічних та фізико-хімічних аспектів формування низькотемпературного арсеніду галію (HT-GaAs), придатного для застосування в терагерцових фотонних пристроях. Вперше реалізовано та експериментально обґрунтовано методику вирощування HT-GaAs методом рідиннофазної епітаксії за умов динамічно змінюваної швидкості охолодження, що забезпечує формування нерівноважних кристалічних структур із підвищеною густиною точкових та комплексних дефектів. Запропоновано новий підхід до створення високоомних шарів HT-GaAs шляхом комплексного легування розплаву диспрозієм і алюмінієм без застосування іонної імплантації та термічної обробки.

Вперше встановлено критичні концентрації легуючих домішок, за яких відбувається інверсія типу провідності ($n \rightarrow p$) і утворення зон з питомим опором понад 10^6 Ом·см, що дозволяє формувати електронно контрольовані області у напівізоляційних структурах. Побудовано узагальнену математичну модель процесу кристалізації в умовах змінної швидкості охолодження, яка враховує особливості дифузії арсену, термодинаміку переохолодженого розплаву та геометрію ростового зазору, що дозволяє здійснювати чисельне прогнозування параметрів епітаксійних шарів у виробничих умовах.

Уперше досліджено вплив швидкості охолодження на ефективний коефіцієнт сегрегації легуючих домішок і профіль розподілу носіїв заряду, в результаті чого встановлено можливість формування різких електричних меж типу s.i. GaAs/n-GaAs без потреби в додаткових технологічних стадіях. Експериментально підтверджено можливість післяростової модифікації електрофізичних параметрів HT-GaAs під дією терагерцового випромінювання, що вперше продемонструвало зміну концентрації носіїв і питомого опору

внаслідок іонізації глибоких енергетичних рівнів або перебудови кластерних дефектів.

Отримано шари НТ-GaAs із унікальним поєднанням характеристик — питомим опором понад 10^6 Ом·см, субпікосекундним часом життя носіїв заряду, прозорістю в терагерцовому діапазоні до 85% і стабільним керуванням типу провідності — що раніше не досягалось в умовах рідкофазної епітаксії без додаткових термічних процедур. Отримані результати відкривають нові можливості для створення високоякісних терагерцових сенсорів, модуляторів і детекторів, що потребують керованих та стабільних електрофізичних параметрів.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основні положення, результати та висновки дисертації викладено у 5 наукових публікаціях, з яких 3 — у наукових періодичних виданнях (у тому числі 2 статті у журналі, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus, кuartиль Q3), та 2 — у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Наведені нижче праці розміщено за ступенем значущості.

1. Krukovskiy S. I., **Arikov V.**, Voronko A. O., Antonyuk V. S. Features of low-temperature GaAs formation for epitaxy device structures. J. Nano-Electron. Phys. 2022. Vol. 14, No. 2. Article ID 02016. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(2\).02016](https://doi.org/10.21272/jnep.14(2).02016). (індексовано у Scopus, кuartиль Q3). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, проведення експериментів з вирощування епітаксійних структур GaAs, обговорення результатів, підготовка статті до друку.*
2. Круковський С. І., Ваків М. М., Яцишин Є. М., **Аріков В. В.**, Воронько А. О., Новіков Д. О., Вербіцький Д. О., Кривець О. І. Властивості низькотемпературного GaAs, отриманого методом РФЕ, для пристроїв терагерцового діапазону. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. 2025. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347024080041>. ((індексовано у Scopus, кuartиль Q3). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, опрацювання результатів експериментів, підготовка статті до друку.*
3. Krukovskiy S., Arikov V. Peculiarities of low-temperature gallium arsenide crystallization under varying cooling rates. Comput. Probl. Electr. Eng. 2024. Vol. 14, No. 2. P. 11-16. (фахове видання України, серія «Б»). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, проведення експериментів, обговорення результатів та підготовка статті до друку.*
4. Krukovskiy S., **Arikov V.** Crystallization of low-temperature gallium arsenide for device structures in the terahertz range // Abstract book of International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO–2023), August 16–19, 2023, Ukraine – Bukovel, 2023.— P. 245. (публікація в матеріалах міжнародної конференції). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментів, обговорення і апробація отриманих результатів на конференції.*
5. Vakiv M., Krukovskiy S., **Arikov V.**, Voronko A., Novikov D., Verbitskiy D.

Investigation of the Properties of Low-Temperature GaAs Doped with Rare Earth and Isovalent Elements Obtained by the LPE Method // Abstract book of “Innovative Materials and NanoEngineering” (IMNE’2024) September 13-16, 2024, Dovgoluka, Ukraine 2024.– P. 39. (публікація в матеріалах міжнародної конференції). *Особистий внесок здобувача: приготування зразків для досліджень, аналізування та обговорення результатів, апробація отриманих результатів на конференції.*

Опубліковані праці повною мірою відображають основні положення та результати роботи.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні результати дисертації було апробовано на таких міжнародних наукових конференціях:

- International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials”, м. Буковель, Україна, 16–19 серпня 2023 р.;
- 4th International conference “Innovative materials and nanoengineering”, м. Довголука, Україна, 13–16 вересня 2024 р.

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Наукові результати дисертаційної роботи мають вагоме значення для розвитку сучасної твердотільної електроніки, оптоелектроніки та технологій терагерцового діапазону. Отримані автором результати щодо керованого формування низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) методом рідиннофазної епітаксії з використанням складного легування (Dy, Al) відкривають нові перспективи для розробки функціональних матеріалів із заданими електрофізичними характеристиками — високою омністю, субпікосекундним часом життя носіїв та прозорістю у ТГц-діапазоні.

Ці результати може бути впроваджено у навчальний процес на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» у формі лабораторних і практичних занять в межах дисциплін:

- «Фізико-хімічні основи технологій напівпровідникових матеріалів»;
- «Мікро- та нанотехнології в електроніці»;
- «Технології функціональних матеріалів»;
- «Фізика і технологія твердотільних сенсорів»;

а також в спеціалізованих курсах для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Отримані результати можуть бути використані у навчальних модулях, що стосуються:

- епітаксійного вирощування матеріалів;
- твердотільних сенсорів і фотонних структур;
- моделювання процесів кристалізації та дифузії в умовах

переохолодженого розплаву;

- дослідження фізики дефектів у напівпровідниках;

Таким чином, дисертаційна робота сприяє посиленню міждисциплінарної інтеграції знань у напрямках фізичної електроніки, матеріалознавства та сенсорної техніки, а також формуванню нових навчальних компонентів в освітньо-наукових програмах.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Практична цінність дисертаційного дослідження полягає у створенні науково обґрунтованої та відтворюваної технології формування високоомних шарів низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) з контрольованими електрофізичними властивостями, що є критично важливими для функціонування фотонних і сенсорних пристроїв у терагерцовому діапазоні. Запропоновані методи рідиннофазної епітаксії із застосуванням комплексного легування (Dy, Al) дозволяють формувати матеріали з субпікосекундним часом життя носіїв, високою прозорістю в ТГц-діапазоні та можливістю електронного керування типом провідності.

Отримані результати можуть бути безпосередньо використані в проєктуванні та виробництві:

ТГц-детекторів, модуляторів і випромінювачів для спектроскопії, бездротових комунікацій та безконтактної діагностики;

сенсорів нового покоління з підвищеною швидкодією;

високочастотних ключових елементів твердотільної електроніки.

Технологічні рішення можуть бути впроваджені в діяльність науково-виробничих підприємств і дослідницьких лабораторій, що спеціалізуються на розробці компонентів для ТГц-фотоніки та нанотехнологій, зокрема таких, як:

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут прикладних проблем фізики і біофізики» (м. Харків),

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ), компанії, що працюють у сфері сенсорної електроніки та приладобудування, наприклад, ТОВ «Адроміка» або «Елтест» (м. Львів).

Запропонована технологія також є перспективною для адаптації у сфері оборонних розробок, телекомунікацій та медичної діагностики, де потрібні надшвидкі, високочутливі елементи з точно контрольованими параметрами.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація має чітку й логічно побудовану структуру, що відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України до оформлення кваліфікаційних наукових праць. Загальний обсяг рукопису дисертації – 144 сторінки. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Кожен розділ логічно пов'язаний з попереднім та відображає етапи виконання дослідження — від постановки задачі й аналізу літератури до опису експериментальних методик, отриманих результатів і їх інтерпретації. Мова дисертації є науковою, граматично та стилістично коректною. Виклад матеріалу здійснено послідовно, чітко і зрозуміло, з

використанням відповідної термінології. Стиль написання відповідає вимогам академічної доброчесності, без порушення логіки викладу.

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

11. З урахуванням зазначеного, на міжкафедральному науковому семінарі Навчально-наукового Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії ухвалили:

11.1. Дисертація Арікова Владислава Вікторовича «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» є завершеною науковою працею, у якій вирішено актуальне наукове завдання формування високоомних НТ-GaAs-шарів із заданими електрофізичними властивостями на основі керованої рідкофазної епітаксії за умов динамічного охолодження. Розроблено технологічний підхід до створення структур з високою прозорістю в терагерцовому діапазоні, низькою концентрацією носіїв та субпікосекундним часом їхнього життя, що є принципово важливим для сенсорних, модуляційних та детекційних елементів фотоніки терагерцового діапазону. Отримані результати мають істотне значення для галузі знань 15 – *Автоматизація та приладобудування*, зокрема в напрямі розробки функціональних матеріалів для твердотільних приладів новітньої генерації.

11.2. Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

11.3. У 5 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 1 стаття у наукових фахових виданнях України, 2 статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз, 2 публікації в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

11.4. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами).

11.5. Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

11.6. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Арікова Владислава Вікторовича дисертація «Кристалізація низькотемпературного

арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

за	-	18 (вісімнадцять)
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Головуючий на міжкафедральному
науковому семінарі ІКТЕ
д.ф.-м.н., проф.

 Орест МАЛИК

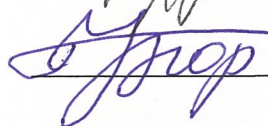
зав. кафедри НПЕ,
д.т.н., професор

 Анатолій ДРУЖИНІН

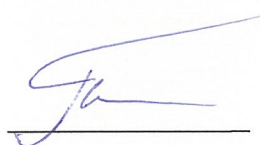
Рецензенти:
д.т.н., професор

 Юрій ХОВЕРКО

д.т.н. доцент

 Ігор БОРДУН

Відповідальний у ІКТЕ
за атестацію PhD
д.т.н. проф.,

 Ігор ОСТРОВСЬКИЙ

" 16 " 05 2025 р.
