

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,
професора кафедри радіотехніки та інформаційної
безпеки Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
ПОЛІТАНСЬКОГО Руслана Леонідовича
на дисертацію «Кристалізація
низькотемпературного арсеніду галію для
приладових структур терагерцового діапазону»

АРІКОВА Владислава Вікторовича
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора філософії в галузі знань 15 «Автоматизація
та приладобудування» за спеціальністю
153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Актуальність теми

Дисертаційне дослідження Арікова Владислава Вікторовича присвячене формуванню низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) для приладових структур, що функціонують у терагерцовому діапазоні. У зв'язку з розширенням застосування ТГц-частот у сферах безконтактної діагностики, високошвидкісної передачі даних, спектроскопії та систем безпеки, зростає потреба у матеріалах із керованими електрофізичними параметрами, зокрема високим питомим опором, швидкою рекомбінацією носіїв заряду та високою структурною однорідністю.

Обґрунтування вибору рідкофазної епітаксії як базового методу кристалізації, із застосуванням режиму динамічного охолодження, свідчить про намагання вирішити не лише наукову, а й інженерно-технологічну задачу. Особливу увагу в роботі приділено ролі диспрозію та алюмінію як ефективних легуючих елементів для модифікації провідності та дефектної структури шару. Такий підхід узгоджується з актуальними тенденціями в дослідженні нерівноважних напівпровідникових систем.

Таким чином, тема дисертації є актуальною та відповідає сучасним науково-технічним викликам у галузі мікро- та наносистемної техніки,

зокрема в контексті розвитку фотонних і сенсорних приладів терагерцового діапазону.

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

Дисертаційне дослідження Арікова Владислава Вікторовича здійснювалося в рамках наукової діяльності кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка» та відповідає її стратегічним напрямам, зокрема в частині розвитку функціональних матеріалів для мікро- та наносистемної техніки.

Робота тісно пов'язана з виконанням науково-дослідних тем:
– «Сенсори та перетворювальні прилади на основі напівпровідникових та діелектричних матеріалів і гетероструктур»,
– «Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної, мікро- та нанoeлектроніки».

Таким чином, тематика дисертації узгоджується з пріоритетними завданнями фундаментальних і прикладних досліджень у сфері мікроелектроніки та оптоелектроніки і сприяє формуванню науково-технічного підґрунтя для розвитку терагерцових приладових структур.

Наукова новизна

У дисертаційній роботі Арікова Владислава Вікторовича представлено комплексне дослідження, результати якого мають істотну новизну у сфері низькотемпературного вирощування напівпровідникових матеріалів для терагерцових приладових структур.

Запропоновано та реалізовано підхід до рідкофазної епітаксії арсеніду галію (GaAs) із динамічно регульованою швидкістю охолодження, що дозволяє цілеспрямовано формувати високодефектні епітаксійні шари з підвищеною швидкістю рекомбінації носіїв — ключовим параметром для надшвидких ТГц-пристроїв. Обґрунтовано механізми формування низки електрофізичних властивостей НТ-GaAs: інверсія провідності, утворення стабільних високоомних шарів з питомим опором понад 10^6 Ом·см, які виникають під впливом комплексного легування диспрозієм (Dy) та алюмінієм (Al), встановлено критичні концентраційні межі для формування цих шарів. На основі математичної моделі кристалізації низькотемпературного GaAs, яка враховує ключові технологічні

параметри — температурний градієнт, швидкість охолодження, геометрію реакційного простору та ступінь переохолодження, виконані розрахунки морфології утвореного шару та профілі розподілу носіїв заряду. Експериментально продемонстровано придатність сформованих НТ-GaAs шарів до використання у фотонних ТГц-структурах, що свідчить про прикладну спроможність запропонованих технологічних рішень.

У сукупності отримані результати суттєво доповнюють сучасні уявлення про кристалізаційні процеси у сполуках типу A^3B^5 за істотно нерівноважних термодинамічних умов та окреслюють нові напрямки створення функціональних матеріалів для терагерцової оптоелектроніки.

Практичне значення отриманих результатів

Результати дисертаційної роботи Арікова Владислава Вікторовича мають прикладну орієнтацію і можуть бути використані для вдосконалення технологій формування функціональних матеріалів на основі низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs), орієнтованих на застосування у пристроях терагерцового (ТГц) діапазону.

До основних практичних аспектів, які впливають з дослідження, слід віднести:

- Розробку технології рідко фазної епітаксії GaAs із динамічно контрольованим охолодженням, що дозволяє отримувати високоомні епітаксійні шари без застосування складного вакуумного устаткування — потенційно зменшуючи складність виробничого циклу.
- Імплементацію механізму інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) шляхом легування диспрозієм і алюмінієм, що відкриває можливість побудови гетероструктур типу $p-i-n$ або $n-i-p$ без необхідності в додаткових технологічних етапах.
- Застосування імпульсного ТГц-опромінення як засобу післяростової модифікації матеріалу — зокрема, для керованого впливу на глибокі рівні та дефектну структуру, що потенційно розширює функціональні можливості технологічного процесу.
- Підвищення відтворюваності електрофізичних характеристик завдяки оптимізації температурних параметрів та концентрацій

легуючих домішок, що сприяє поліпшенню стабільності роботи приладових структур.

- Перспективу практичного застосування отриманих матеріалів у фотонних і сенсорних компонентах терагерцового спектрального діапазону — зокрема у фотопровідних антенах, детекторах, комутаторах та елементах спектроскопічних систем для біомедичних задач.

Крім того, окремі елементи дослідження можуть бути використані в освітньому процесі при підготовці фахівців у галузі мікро- та наноелектроніки, матеріалознавства і фізики напівпровідників, зокрема в межах курсів, присвячених технологіям вирощування напівпровідникових матеріалів та інженерії ТГц-пристроїв.

Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» виконана у формі рукописної кваліфікаційної наукової праці, обсяг і зміст якої відповідають вимогам, визначеним чинним нормативним забезпеченням до дисертацій, що подаються на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Робота логічно структурована, складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг тексту становить 131 сторінку, включає 39 рисунків, 6 таблиць і бібліографію зі 122 найменувань.

У вступі чітко окреслено актуальність теми, мету і завдання дослідження, об'єкт і предмет, сформульовано наукову новизну, практичну значущість та наведено загальну структуру роботи.

Перший розділ містить ґрунтовний огляд сучасного стану досліджень у галузі вирощування низькотемпературного GaAs, включаючи особливості нерівноважної кристалізації, підходи до модифікації електрофізичних

властивостей та перспективи використання в ТГц-фотоніці. Сформульовано наукову проблему, що лягла в основу дослідження.

Другий розділ присвячено опису експериментальних методик. Ретельно подано конструктивні особливості епітаксійних комірок, схеми охолодження, методи легування Dy та Al, підходи до визначення температурних градієнтів, а також способи постобробки шарів терагерцовим випроміненням. На основі моделі кристалізації Ga-As розраховані максимальні товщини вирощеної плівки для різної швидкості охолодження і температури переохолодження розчину. Проведені масштабні дослідження концентрації носіїв заряду методом вимірювання ефекту Холла.

У третьому розділі систематизовано результати експериментальних досліджень морфології, оптичної прозорості у ТГц-діапазоні та електрофізичних характеристик. Детально проаналізовано вплив технологічних параметрів на тривалість життя неосновних носіїв, зміну типу провідності, питомий опір і глибокі рівні. Показано, що отримані профілі концентрації носіїв заряду у різних шарах структури співпадають із результатами, отриманими методом вимірювання ефекту Холла.

У четвертому розділі поєднуються аналітичний підхід моделювання процесу кристалізації, і експериментальне дослідження структури кристалізованих шарів. Це дає можливість співставити одержані експериментально профілі концентрації носіїв заряду із тими процесами, що відбуваються під час кристалізації GaAs в умовах динамічного охолодження. У кінцевому підсумку таким чином виявлений вплив просторово-часового розподілу температури, на механізми зародження і росту кристалічної фази під впливом легуючих домішок. Це підтверджено порівнянням модельних передбачень і результатів експерименту.

У висновках узагальнено основні результати, відображено реалізацію поставлених завдань та досягнення наукової мети. Окремі положення дисертації апробовані на наукових конференціях, а частина результатів впроваджена у навчальний процес.

У цілому, структура та зміст дисертації відповідають логіці наукового дослідження та стандартам підготовки здобувача ступеня доктора філософії.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича є результатом самостійного виконання дослідження, що має ознаки цілісної, завершеної наукової праці. Усі ключові наукові положення, експериментальні дані, аналітичні висновки та узагальнення обґрунтовано автором на основі особисто проведених теоретичних і практичних досліджень.

У процесі підготовки дисертації дотримано основних принципів академічної доброчесності відповідно до вимог законодавства України, нормативних актів МОН України та етичних стандартів наукової спільноти. Порушень, що могли б свідчити про наявність плагіату, фабрикації або фальсифікації результатів, у тексті дисертації не виявлено.

Запозичені положення з наукових джерел належно оформлені з коректними бібліографічними посиланнями, що свідчить про уважне ставлення автора до питань наукової етики та цитування.

Таким чином, дисертаційна робота відповідає встановленим етичним, методологічним і процедурним нормам академічної доброчесності, прийнятим у вищій освіті та науці.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Арікова Владислава Вікторовича, загалом можна вважати обґрунтованими, внутрішньо узгодженими та логічно виведеними з проведених досліджень.

Достовірність результатів підтверджується використанням комплексу взаємодоповнюючих методик, що охоплюють як експериментальні, так і теоретичні підходи: оптичні та електрофізичні вимірювання (включаючи Hall-метрологію, аналіз C–V характеристик), профілометричні дослідження, терагерцова спектроскопія. Таке поєднання дозволяє багатофакторно оцінити структуру та властивості низькотемпературного арсеніду галію (HT-GaAs).

Результати вимірювань відтворювані, представлені в узагальненій формі та підтверджені чисельним моделюванням процесів кристалізації,

що реалізовано з використанням середовища Mathcad. Це підвищує рівень довіри до зроблених висновків. Зіставлення отриманих результатів із літературними даними демонструє їхню відповідність сучасним уявленням у сфері епітаксійних технологій і ТГц-оптоелектроніки.

Загалом, обсяг проведених досліджень, ретельність аналізу даних і застосування перевірених методів свідчать про належний ступінь наукової обґрунтованості й достовірності положень, викладених у дисертації.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

У процесі вивчення дисертаційної роботи Арікова Владислава Вікторовича привернули увагу окремі аспекти, які, на мій погляд, заслуговують на подальше уточнення або розширення в межах подальших досліджень:

1. У розділі, що описує процес рідиннофазної епітаксії, акцент зроблено на впливі температурного профілю та швидкості охолодження на характеристики кристалу. Водночас питання утворення кластерних дефектів у режимах глибокого переохолодження, доцільно було б розширити з урахуванням термодинамічних підходів до фазових переходів у нерівноважних умовах.
2. При розгляді явища інверсії типу провідності варто було б приділити більше уваги альтернативним поясненням спостережуваних ефектів, зокрема ролі глибоких рівнів, домішкових комплексів або можливій участі внутрішніх електростатичних полів. Також було б доцільним обговорити довготривалу стабільність сформованих р-шарів за різних умов експлуатації.
3. Теоретична модель кристалізації, викладена в четвертому розділі, є важливою складовою дослідження. Разом з тим, окремі параметри моделі (наприклад, коефіцієнти дифузії або рівні перенасичення) варто підкріпити чисельною оцінкою або посиланням на експериментальні/літературні дані, що забезпечило б її більшу прикладну цінність.

Зазначені коментарі носять рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка демонструє

належний рівень наукової зрілості, методологічної обґрунтованості та практичної орієнтованості.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича на тему «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» демонструє високий рівень наукового опрацювання актуальної проблеми, пов'язаної з розвитком матеріалознавчих основ для терагерцової оптоелектроніки та сенсорики. Робота вирізняється науковою новизною, що полягає у застосуванні рідиннофазної епітаксії з контрольованим охолодженням для формування шарів HT-GaAs із заданими електрофізичними параметрами, виявленні ефекту інверсії типу провідності, а також вивченні впливу імпульсного ТГц-опромінення на структурні властивості матеріалу. Представлені результати є обґрунтованими, експериментально підтвердженими та апробованими у наукових публікаціях і доповідях.

Зміст, структура та оформлення дисертації повністю відповідають встановленим вимогам, а саме:

- Порядку присудження наукового ступеня доктора філософії та скасування рішення про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами згідно з постановою КМУ № 507 від 03.05.2024 р.);
- Вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом МОН України від 12.01.2017 р. № 40.

Враховуючи зазначене, вважаю, що Аріков Владислав Вікторович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Руслан ПОЛІТАНСЬКИЙ
завідувач



М. С. Федорук