

ВІДГУК

офіційного рецензента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника кафедри екології та збалансованого природокористування

Бордуна Ігоря Михайловича

на дисертаційну роботу АРІКОВА Владислава Вікторовича

«Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань

15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю

153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Актуальність теми дисертації.

Сучасні тенденції у розвитку терагерцових технологій диктують необхідність пошуку нових підходів до створення матеріалів і структур з унікальними електрофізичними параметрами, придатних для функціонування в надширокосмуговому спектральному діапазоні. Серед відомих матеріалів, які демонструють перспективні характеристики у ТГц-діапазоні, особливу увагу науковців привертає низькотемпературний арсенід галію (НТ-GaAs) завдяки його здатності до швидкої релаксації носіїв заряду, високому питомому опору та прозорості для терагерцового випромінювання.

Незважаючи на те, що молекулярно-променева епітаксія традиційно застосовується для формування НТ-GaAs, її висока вартість, складність реалізації та обмеженість у масштабуванні створюють перешкоди для широкого промислового використання. У зв'язку з цим виникає потреба у пошуку альтернативних, більш доступних методів формування відповідного матеріалу. Одним із таких підходів є низькотемпературна рідкофазна епітаксія (НТ-РФЕ), яка дає змогу отримувати кристалічні шари з підвищеною концентрацією рекомбінаційно-активних дефектів, необхідних для генерації імпульсного ТГц-випромінювання.

Особливої наукової ваги набуває дослідження процесів кристалізації в умовах динамічного охолодження перенасиченого галієвого розчину, що дозволяє впливати на структуроутворення та дефектоформування в шарі GaAs. Актуальність теми посилюється ще й тим, що легування рідкісноземельними домішками, зокрема диспрозієм, у поєднанні з елементами III групи (Al) відкриває нові можливості для регулювання типу провідності, досягнення високого питомого опору та формування гетероструктур без застосування термообробки або імплантації.

Важливим інноваційним аспектом є можливість використання терагерцового випромінювання як інструмента для післяростової обробки матеріалу — це відкриває перспективи керованої модифікації кристалічної решітки та активації глибоких центрів, що впливають на поведінку носіїв заряду.

Таким чином, обрана тема дисертації є актуальною як з точки зору фундаментальної науки — для глибшого розуміння процесів кристалізації напівпровідників в умовах сильної нерівноваги, — так і з огляду на прикладні аспекти, пов'язані з розробкою технологій для ТГц-фотоніки, сенсорних пристроїв і телекомунікаційного обладнання нового покоління. Результати дослідження мають потенціал для практичного впровадження в галузях, що потребують надшвидкої електроніки та високочастотної спектроскопії.

Ступінь наукової обґрунтованості результатів, сформульованих в роботі, їх наукова новизна.

Наукові положення, що сформульовані у дисертаційній роботі Владислава Арікова, вирізняються належним рівнем обґрунтованості та послідовною логікою викладення. Висновки базуються на цілісному комплексі експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень, що охоплюють ключові аспекти процесу кристалізації НТ-GaAs за допомогою рідиннофазної епітаксії у нерівноважних умовах.

Достовірність отриманих результатів забезпечена застосуванням сучасних і апробованих методик — зокрема Hall-вимірювань, смісно-частотної профілометрії, спектроскопії у терагерцовому діапазоні, а також морфологічного аналізу вирощених структур. Узгодженість експериментальних даних із результатами математичного моделювання, реалізованого у середовищі Mathcad, підтверджує валідність використаних підходів і дає змогу поширити встановлені закономірності на ширше коло епітаксійних матеріалів.

Варто підкреслити, що результати експериментів є статистично відтворюваними, що додатково засвідчує їхню надійність. Спостережений автором ефект інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$), реалізований шляхом легування Dy та Al без термообробки, підтверджений незалежними методами аналізу і є новим для обраного технологічного підходу.

Значну увагу приділено коректному зіставленню результатів між серіями зразків із варіативними технологічними параметрами, що дало змогу обґрунтувати вплив охолодження та концентрації домішок на ключові електрофізичні характеристики. Узагальнення результатів та їх інтерпретація

у контексті існуючих наукових джерел підтверджує, що автор глибоко орієнтується в предметі дослідження і здатен критично оцінювати власні напрацювання.

У дисертаційній роботі Владислава Арікова представлено низку принципово нових наукових результатів, що стосуються формування НТ-GaAs для використання в терагерцовій техніці. На відміну від традиційних підходів, автором запропоновано та реалізовано методику рідкофазної епітаксії з контрольованим динамічним охолодженням, що забезпечує формування кристалічних шарів з керованими електрофізичними характеристиками.

Вперше обґрунтовано та реалізовано технологічний підхід, що базується на інтенсивному охолодженні галієвого розчину-розплаву для досягнення глибокого перенасичення, що призводить до інтенсивного утворення точкових та кластерних дефектів, відповідальних за надшвидку рекомбінацію носіїв заряду ($\tau < 1$ пс). Уперше встановлено ефект інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) у НТ-GaAs шляхом легування диспрозієм (Dy) та алюмінієм (Al), а також визначено граничні концентрації, за яких забезпечується формування стабільних високоомних шарів із питомим опором понад 10^4 Ом·см. Побудовано узагальнену математичну модель процесу росту НТ-GaAs, яка враховує вплив температурного профілю, швидкості охолодження, геометрії кристалізатора та дифузійної поведінки компонентів, що дозволяє прогнозувати морфологічні та електрофізичні параметри вирощених шарів. Оптимізовано параметри процесу охолодження та легування, що забезпечує високу відтворюваність властивостей шарів, просторову однорідність та відповідність технологічним вимогам для ТГц-пристроїв. Надано комплексне експериментальне обґрунтування впливу морфології, концентраційного профілю та дефектної структури на прозорість у ТГц-діапазоні, електропровідність, тип і густина носіїв заряду, а також на функціональну придатність матеріалу в складі фотонних пристроїв.

Сукупність одержаних результатів значно розширює наукові уявлення про особливості кристалізації сполук A^3B^5 в умовах сильної нерівноваги та формує підґрунтя для подальшого розвитку технологій терагерцової фотоніки — зокрема сенсорів, комутаторів і детекторів на основі низькотемпературного GaAs.

Отже, поставлена наукова задача, яка стосується розробки та експериментального обґрунтування технології вирощування шарів низькотемпературного арсеніду галію методом низькотемпературної рідиннофазної епітаксії з керованими електрофізичними та оптичними властивостями для використання в приладових структурах терагерцового

діапазону, виконана повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

Дисертаційне дослідження Арікова Владислава Вікторовича було виконано у рамках реалізації наступних наукових напрямів кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка»: «Сенсори та перетворювальні прилади на основі напівпровідникових та діелектричних матеріалів і гетероструктур», «Фізико-хімічні процеси синтезу та контрольованої модифікації властивостей матеріалів функціональної, мікро- та наноелектроніки».

Отримані в ході дослідження результати є складовою частиною комплексної наукової діяльності, спрямованої на розвиток матеріалознавчих засад мікро- та наноелектроніки, і гармонійно вписуються у стратегічну лінію досліджень, що реалізується у вищезгаданих програмах. Це підтверджує як міждисциплінарний характер дисертаційної роботи, так і її відповідність пріоритетним напрямам розвитку прикладної та фундаментальної науки в Україні.

Структура і зміст дисертації.

Дисертація написана українською мовою, таблиці, рисунки і формули подано у належному вигляді. Зміст роботи викладено академічним науковим стилем з використанням сучасної термінології.

Дисертаційна робота Арікова В.В. складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 131 сторінці, вона містить 39 рисунків, 6 таблиць, у бібліографії наведено 108 літературних джерел.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, наведено методи дослідження та визначено наукову новизну і практичне значення роботи.

У *першому розділі* проведено літературний огляд публікацій, присвячених аналізу основних технологій, що використовуються для кристалізації низькотемпературного арсеніду галію. Визначено технологічні особливості кристалізації напівпровідникових матеріалів із малим часом життя нерівноважних носіїв заряду. Описано прилади терагерцового діапазону, що виготовляються на основі низькотемпературного арсеніду галію.

У *другому розділі* описано матеріали, методики одержання епітаксійних шарів та методи досліджень їх властивостей. Методи дослідження часу життя нерівноважних носіїв заряду поділено на фотогенераційні, оптичні, фототермічні і електричні методи. Виокремлено методики досліджень гальваномагнітних властивостей епітаксійних шарів GaAs, дослідження профілів розподілу носіїв заряду в епітаксійних структурах на основі GaAs з використанням C-V профілометрії, а також методика дослідження властивостей низькотемпературного арсеніду галію з використанням терагерцового випромінювання.

У *третьому розділі* описано дослідження структури і електрофізичних властивостей легованих структур низькотемпературного арсеніду галію. Комплексне легування рідкісноземельними елементами, зокрема ітербієм чи диспрозієм, у поєднанні з ізовалентною домішкою алюмінію, справляє значний вплив на кристалічну структуру GaAs, вирощеного при понижених температурах методом рідиннофазної епітаксії. Такий підхід дозволяє модифікувати не лише електрофізичні властивості матеріалу, але й безпосередньо впливати на формування решіткової структури та зменшення дефектності. Оптимізація концентрацій Yb або Dy та Al дозволяє не лише очищати GaAs від фонових домішок, але й впливати на мікроструктурні параметри кристалу, підвищуючи його придатність до використання в структурно чутливих приладах, зокрема фотодетекторах, гетеропереходах і структурах для терагерцового випромінювання. Це відкриває можливості для тонкого регулювання параметрів росту та селективного формування активних зон у приладових структурах на основі HT-GaAs.

У *четвертому розділі* наведено результати формування високоомного низькотемпературного арсеніду галію. Показано, що метод рідиннофазної епітаксії за низьких температур із легуванням диспрозієм і алюмінієм дозволяє формувати епітаксійні шари HT-GaAs з питомим опором до $4.7 \cdot 10^4$ Ом·см. Застосування такого легування сприяє глибокій компенсації фонових домішок, зменшенню концентрації носіїв та інверсії типу провідності за потреби. Це забезпечує стабільні характеристики шару при його подальшій інтеграції в приладові структури ТГц-діапазону. Підтверджено, що застосування змінної швидкості охолодження (5–14 °C/хв) у поєднанні з керованим легуванням забезпечує високу повторюваність параметрів шарів, що важливо для серійного виробництва ТГц-компонент. Вибір оптимальних концентрацій легуючих компонентів дозволяє формувати шари з прогнозованими характеристиками для конкретного типу приладу — джерела, приймача або модулятора.

Висновки за результатами виконання дисертації відповідають поставленим завданням, підтверджують наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про те, що під час виконання роботи Аріковим В.В. було проаналізовано результати сучасних наукових досліджень, які відповідають тематиці дисертації.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у розвиток спеціальності 153 «Мікрота наносистемна техніка» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування», а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична цінність результатів, отриманих у дисертаційній роботі Владислава Арікова, полягає у розробці ефективної та відтворюваної технології формування шарів HT-GaAs з наперед заданими електрофізичними й оптичними властивостями. Запропонована методика рідиннофазної епітаксії з динамічно керованим охолодженням дозволяє вирощувати високоомні шари HT-GaAs без застосування складного й дорогого обладнання, характерного для молекулярно-променевої епітаксії, або додаткових етапів термообробки й іонної імплантації. Такий технологічний підхід значно знижує вартість виготовлення матеріалу і може бути адаптований до умов масового виробництва пристроїв ТГц-електроніки, зокрема фотопровідних антен, комутаторів, сенсорів і модуляторів.

Встановлені автором функціональні залежності між технологічними параметрами росту (температура охолодження, температурний градієнт, концентрація легуючих елементів) і властивостями матеріалу (тип провідності, опір, густина носіїв заряду) відкривають можливості цілеспрямованого проектування функціональних структур з бажаними характеристиками.

Окремо слід відзначити реалізовану можливість інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) виключно за рахунок вибору складу легуючих домішок, без залучення додаткових технологічних операцій. Це створює передумови для виготовлення багат шарових гетероструктур типу $p-i-n$ або $n-i-p$ без ускладнення виробничого процесу — що особливо актуально для інтегральної ТГц-електроніки.

У цілому, результати дисертації мають значний прикладний потенціал і можуть бути використані для розробки нових поколінь матеріалів і структур у

галузі мікро- та наноелектроніки терагерцового діапазону, що підвищує її інноваційну цінність і практичну значущість.

Повнота відображення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих автором дисертації працях.

За матеріалами дисертації опубліковано 5 друкованих наукових праць, з яких 1 стаття у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових фахових виданнях України, що включені до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus) та 2 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях. Отже, наукові результати, які описано у дисертаційній роботі, висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності і відомості про дотримання академічної доброчесності.

Тематика дисертаційної роботи Владислава Арікова беззаперечно відповідає профілю спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Зміст дослідження охоплює актуальні науково-технічні аспекти, пов'язані з розробкою функціональних напівпровідникових матеріалів для пристроїв терагерцового діапазону, що повністю корелює з напрямками спеціальності, зокрема мікро- та наноелектронікою, сенсорною технікою, технологією матеріалів і структур нового покоління.

Методологія роботи базується на сучасному експериментальному і теоретичному апараті мікро- та наносистемної техніки: використано рідиннофазну епітаксію в умовах керованої нерівноваги, легування рідкісноземельними та ізовалентними домішками, методи спектроскопії у ТГц-діапазоні, математичне моделювання процесів кристалізації та комплексну електрофізичну діагностику. Такий міждисциплінарний підхід повністю відповідає як за тематикою, так і за обраними методами вимогам до досліджень у межах спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

У процесі ознайомлення з дисертацією не виявлено фактів порушення академічної доброчесності. Робота є результатом самостійної наукової діяльності здобувача. Усі теоретичні положення та експериментальні висновки підтверджені належними результатами. Запозичені дані наведені з дотриманням наукової етики та супроводжуються посиланнями на відповідні першоджерела. Оформлення дисертації відповідає вимогам академічного стандарту щодо цитування та авторства.

Таким чином, дисертаційне дослідження відповідає всім критеріям наукової спеціальності та демонструє високий рівень академічної відповідальності з боку автора.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

Незважаючи на наукову цінність результатів, представлених у дисертації, її добру експериментальну та теоретичну якість, у роботі можна виділити окремі моменти, що потребують уточнення або редакційного доопрацювання.

1. Недостатнє теоретичне обґрунтування процесів кристалізації. Доцільним видається розширення розділу, присвяченого механізмам кристалізації арсеніду галію в умовах перенасичення, зокрема зосередивши увагу на ролі локального температурного градієнта, глибини та тривалості переохолодження, а також кінетики утворення зародків. Це дозволило б повніше пояснити фізичні основи формування точкових і кластерних дефектів.
2. Недостатньо обґрунтовано вибір легуючих компонентів для синтезованих структур. Незважаючи на вдалі результати і обґрунтування застосування Du та Al як домішок, автору варто було б доповнити аналіз коротким порівнянням з іншими можливими допуючими елементами (наприклад, Er , In , Te), які потенційно можуть впливати на електрофізичні характеристики HT-GaAs за аналогічних умов росту.
3. У дисертації наведено рис. 2.7 і написано, що «Розраховані залежності (показані суцільними кривими) демонструють хорошу узгодженість з експериментальними результатами (позначеними точками), що підтверджує надійність обраної математичної моделі та коректність припущень щодо механізму росту шару в умовах змінної швидкості кристалізації». Проте, для 3 роглянутих розрахункових кривих є лише одна експериментальна точка для кривої 2 і дві експериментальні точки для кривої 3, які лише у певному наближенні можна порівнювати із теоретичними розрахунками. Тому поняття «хороша узгодженість» потребує більш глибокого обґрунтування і додаткової аргументації.
4. Параграф 3.1 присвячено дослідженню процесів формування однорідно легованих шарів арсеніду галію з низькою концентрацією носіїв під впливом легування ітербієм та алюмінієм. Параграф 4.1 присвячено вивченню процесів кристалізації високоомного низькотемпературного арсеніду галію з використанням легування алюмінієм та диспрозієм. Але

коли проаналізувати завдання до дисертації, то там зазначено лише легування диспрозієм та алюмінієм. Вважаю, що у завданнях до дисертації коректніше було би зазначити «легування алюмінієм та домішкою з групи рідкісноземельних елементів», що узагальнювало би результати, отримані автором дисертації.

5. У параграфі 3.1 дисертант пише: «Це підтверджується результатами дослідження структурної досконалості зразків № 1–4 за методом HRD (метод високороздільної дифракції), які наведені в таблиці 3 та на рис. 3.1.». Підпис до рис. 3.1: «Високороздільні ω -сканування відбиття (111) у режимі TCS (Topographic Channeling Spectroscopy)». Проте у використаних для проведення експериментальних досліджень методиках немає опису такого, далеко не тривіального, методу рентгенівських досліджень, як HRD. Дисертація лише би виграла, якщо б дисертант описав як обладнання для проведення цих вимірювань, так і використаний режим для досліджень.
6. Висновки до дисертації відповідають проведенням дослідженням, проте доцільно було б їх сформулювати відносно поставлених у роботі завдань. У дисертації є 8 завдань. Після їх виконання дисертантом мало би бути стільки ж висновків. Проте висновків є лише 6.
7. У дисертації зустрічаються описки і неточності у формулюванні речень. Додатково потрібно покращити оформлення графіків та ілюстрацій. Частина графічних матеріалів потребує технічного доопрацювання — зокрема, йдеться про дрібні або недостатньо контрастні написи, які ускладнюють сприйняття інформації. Не усі підписи на рисунках зроблено державною мовою (наприклад, рис. 3.2, 3.3, 4.4, 4.5). Підвищення якості візуального оформлення сприяло би кращому розумінню представлених результатів, особливо при аналізі кількісних залежностей.

Наведені зауваження мають здебільшого рекомендаційний, уточнюючий характер і не впливають на наукову новизну, достовірність або завершеність дисертаційного дослідження. Робота має значну цінність у контексті розвитку матеріалознавства та ТГц-технологій.

Загальний висновок

Вважаю, що дисертація Арікова Владислава Вікторовича на тему «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» є завершеним самостійним дослідженням, що має вагоме теоретичне та прикладне значення. У роботі повністю реалізовано цикл наукового дослідження: від обґрунтування актуальності

теми і до практичної реалізації запропонованих технологічних рішень і критичного аналізу отриманих результатів. У дисертації чітко простежується логічна структура, дотримано академічної доброчесності, обґрунтовано наукову новизну та підтверджено достовірність висновків комплексом сучасних експериментальних і аналітичних методів. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12 січня 2017 р. “Про затвердження Вимог до оформлення дисертації” (з наступними змінами) та “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 №44 від 12 січня 2022 р. (із урахуванням змін, внесених постановою КМ № 341 від 21.03.2022 р.) щодо порядку присудження ступеня доктора філософії, а її автор Аріков В. В. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Рецензент

доктор технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник
кафедри екології та збалансованого
природокористування
Національного університету
“Львівська політехніка”

Ігор БОРДУН

Підпис д.т.н., доцента
Ігоря БОРДУНА
“ЗАСВІДЧУЮ”

Вчений секретар
Національного університету
“Львівська політехніка”
К.Т.Н., доц.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ