

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри напівпровідникової електроніки
Національного університету «Львівська політехніка»,

доктора технічних наук, професора

ХОВЕРКА Юрія Миколайовича

на дисертацію

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

Розвиток терагерцових (ТГц) технологій — одного з найперспективніших напрямів сучасної мікро- та наноелектроніки — вимагає високоефективних фотонних і оптоелектронних матеріалів з унікальними електрофізичними та оптичними властивостями. Серед них особливе місце посідає низькотемпературний арсенід галію (НТ-GaAs), який завдяки надкороткому часу життя нерівноважних носіїв заряду, високому питомому опору та прозорості в терагерцовому діапазоні, є ключовим матеріалом для створення фотопровідних антен, ТГц-детекторів, оптичних комутаторів та інших пристроїв надшвидкої дії.

Традиційним методом формування НТ-GaAs є низькотемпературна молекулярно-променева епітаксія (НТ-МПЕ), що, попри свої переваги у точності та контролі дефектної структури, характеризується значною складністю, високою вартістю обладнання, низькою швидкістю росту та обмеженою масштабованістю. Альтернативні методи, зокрема металоорганічна епітаксія (MOCVD), також мають обмеження щодо реалізації необхідного рівня нерівноважності при низьких температурах.

У цьому контексті актуальним постає дослідження можливостей низькотемпературної рідиннофазної епітаксії (НТ-РФЕ) — простішого та дешевшого методу, здатного забезпечити формування шарів НТ-GaAs з високою концентрацією рекомбінаційно-активних центрів і контрольованими електрофізичними параметрами. Особливий інтерес викликає застосування динамічно контрольованого охолодження перенасиченого галієвого розчину, що дозволяє ініціювати інтенсивне утворення точкових і кластерних дефектів, необхідних для реалізації короткого часу релаксації носіїв.

Водночас використання рідкісноземельних елементів, зокрема диспрозію (Dy), а також алюмінію (Al), як легуючих домішок - відкриває можливість для формування високоомних шарів, різного типу провідності та модифікації їх електрофізичних характеристик.

Таким чином, тематика дисертаційної роботи Арікова Владислава Вікторовича є надзвичайно актуальною як у контексті фундаментального вивчення фізико-хімічних закономірностей кристалізації напівпровідників у нерівноважних умовах, так і з прикладної точки зору — розробки доступної, масштабованої технології для створення функціональних структур терагерцового діапазону. Запропоновані підходи дозволяють розширити спектр матеріалів для ТГц-фотоніки та сприятимуть подальшому розвитку сенсорики, телекомунікацій, біомедичних досліджень і безконтактного контролю в терагерцовій області.

Ступінь обґрунтованості, повноти та достовірності наукових положень і висновків

Наукові положення та висновки, викладені в дисертаційній роботі, ґрунтуються на узгодженому поєднанні експериментальних, теоретичних і чисельно-аналітичних досліджень, що охоплюють усі етапи процесу кристалізації низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) методом рідкофазної епітаксії. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням апробованих методик вимірювання електрофізичних, оптичних та морфологічних характеристик вирощених шарів, а також внутрішньою логічною узгодженістю експериментальних даних з теоретичними моделями.

Вірогідність висновків підтверджена багаторазовим повторенням експериментів із відтворюваними параметрами, проведенням Hall-вимірювань, C-V профілометрії, терагерцової спектроскопії, а також застосуванням математичних моделей, що описують вплив температурного градієнта, ступеня переохолодження та швидкості охолодження на морфологію і електрофізичні властивості НТ-GaAs. Спостережений ефект інверсії типу провідності (n→p) та формування високоомних шарів з питомим опором понад 10^6 Ом·см отримано при чітко контрольованих умовах та підтверджено комплексом незалежних методів аналізу.

Коректність висновків також підтверджується взаємною відповідністю результатів між різними серіями зразків, зокрема при варіації концентрацій легуючих елементів (Dy, Al) і зміні параметрів охолодження. Узгодженість між експериментальними даними та результатами математичного

моделювання, реалізованого у середовищі Mathcad, засвідчує валідність побудованих моделей і дозволяє поширити отримані закономірності на ширший клас епітаксійних структур.

Додаткову достовірність забезпечує порівняння отриманих результатів із сучасними літературними джерелами, що охоплюють фізику НТ-GaAs, особливості його кристалізації та використання в ТГц-електроніці. Такий підхід дозволив авторові критично оцінити власні дані в контексті актуальних наукових досліджень і підтвердити їх значущість для розвитку нових технологій формування напівпровідникових структур терагерцового діапазону.

Матеріали дисертації, наукові положення і висновки пройшли необхідну апробацію та обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях. Основні результати дослідження висвітлені у 5 наукових працях, серед яких 1 стаття у фаховому журналі, 2 матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз.

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

Дисертаційну роботу виконано в межах пріоритетних наукових напрямів досліджень кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка», зокрема за тематиками:

«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 результати та теоретичні напрацювання дисертаційної роботи органічно інтегровані в загальну стратегію розвитку мікро- та наносистемної техніки, що реалізується в межах вказаних програм.

Наукова новизна

У дисертаційній роботі Арікова Владислава Вікторовича встановлено взаємозв'язок між електрофізичними характеристиками низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs), вирощеним методом рідиннофазної епітаксії (НТ-РФЕ) з динамічно змінюваною швидкістю охолодження та параметрами керованої сегрегації домішок в матеріалі під час процесів вирощування, що дозволяє формувати епітаксійні шари із

заданими властивостями для застосування в пристроях терагерцового діапазону.

Основні наукові результати, що визначають новизну роботи, полягають у наступному: вперше запропоновано підхід до створення умов глибокого перенасичення галієвого розчину-розплаву за рахунок інтенсифікованого охолодження, що забезпечує підвищену генерацію точкових та кластерних дефектів у кристалі, необхідних для реалізації надшвидкої рекомбінації носіїв заряду ($\tau < 1$ пс). Вперше встановлено можливість керованої інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) у тонких шарах GaAs, легованих диспрозієм (Dy) та алюмінієм (Al) під час низькотемпературної рідинно-фазної епітаксії, що виключає застосування дороговартісних процесів імплантації. Визначено критичні концентрації легуючих елементів, за яких досягається стабільне формування високоомних структур з питомим опором понад 10^6 Ом·см. Побудовано узагальнену математичну модель процесу кристалізації НТ-GaAs, що враховує параметри охолодження, температурний градієнт, геометрію ростового зазору, ступінь переохолодження та дифузію компонентів у розплаві. Модель дозволяє прогнозувати розподіл носіїв та морфологічні характеристики шару залежно від технологічних умов. Обґрунтовано можливість застосування ТГц-структурування як етапу післяростової модифікації матеріалу. Оптимізовано параметри легування та охолодження, що дозволило забезпечити відтворюваність характеристик вирощених структур, просторову однорідність шару та відповідність вимогам до матеріалів для ТГц-пристроїв. Систематично проаналізовано вплив морфології, концентраційного профілю та дефектної структури шарів на їх прозорість у ТГц-діапазоні, питомий опір, тип і концентрацію носіїв заряду. Отримано експериментальні підтвердження функціональної придатності шарів у складі фотонних пристроїв.

Сукупність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, розширює наукові уявлення про кристалізацію сполук типу A^3B^5 у нерівноважних умовах та створює підґрунтя для впровадження нових технологій виготовлення терагерцових сенсорів, комутаторів та детекторів на основі НТ-GaAs.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає у створенні науково обґрунтованих технологічних рішень для вирощування низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) з заданими електрофізичними та оптичними характеристиками, що придатні для

застосування в терагерцових фотонних і мікроелектронних пристроях мікро- та наносистемної техніки.

Запропонована методика рідиннофазної епітаксії з динамічно контрольованим охолодженням дає змогу формувати високоомні шари НТ-GaAs без потреби у дорогому вакуумному обладнанні, складній іонній імплантації чи термообробці, що значно спрощує технологічний процес і знижує його собівартість. Такий підхід може бути адаптований для масового виробництва ТГц-детекторів, фотопровідних антен, надшвидких оптичних комутаторів та модуляторів.

Отримані залежності між технологічними параметрами (швидкість охолодження, концентрація легуючих елементів, температурний градієнт) та електрофізичними характеристиками епітаксійних шарів дають змогу прогнозувати та цілеспрямовано керувати властивостями матеріалу, включаючи тип провідності, рівень опору, концентрацію носіїв заряду та час їх життя.

Зокрема, реалізована можливість інверсії провідності ($n \rightarrow p$) без додаткових операцій відкриває перспективи створення функціональних гетероструктур $p-i-n$ та $n-i-p$ типу без етапів дифузії або імплантації, що є важливим для інтегральної ТГц-електроніки.

Таким чином, результати роботи мають не лише теоретичну, але й прикладну цінність, оскільки формують науково-технічне підґрунтя для впровадження нових технологій у галузі мікро- та наноелектроніки терагерцового діапазону.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності, відсутність порушень академічної доброчесності

Представлена дисертаційна робота повністю відповідає профілю наукової спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Тематика дослідження охоплює ключові аспекти створення і вдосконалення технологій вирощування напівпровідникових матеріалів та структур для функціонування в терагерцовому діапазоні. Основна увага приділена розробці методу кристалізації низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) для фотонних та сенсорних застосувань, що прямо корелює з пріоритетними напрямками спеціальності — мікро- і наноелектронікою, сенсорною технікою, технологією функціональних матеріалів.

У роботі використано типовий для сучасної мікро- та наносистемної техніки арсенал методів: рідиннофазну епітаксію в умовах нерівноваги, легування рідкісноземельними домішками, спектроскопію в терагерцовому

діапазоні, аналіз електрофізичних параметрів, математичне моделювання кристалізаційних процесів. Це підтверджує як тематичну, так і методичну відповідність дисертації профілю спеціальності.

Порушень академічної доброчесності у виконаній роботі не виявлено. Дисертація є самостійною науковою працею здобувача, усі положення та результати належним чином обґрунтовано й підтверджено експериментально. Запозичені матеріали проілюстровано коректними посиланнями, що зафіксовано у списку використаних джерел. Дотримано вимог наукової етики, правил цитування та авторства.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

Попри високий рівень наукової новизни, повноту дослідження та якість експериментальної бази, до роботи можна висловити низку уточнюючих та редакційних зауважень:

1. У дисертації доцільно було б розширити теоретичний розділ щодо механізмів кристалізації GaAs у перенасичених розчинах при інтенсивному охолодженні. Зокрема, варто більш детально пояснити вплив локального температурного градієнта, тривалості переохолодження та густини зародків на формування точкових і кластерних дефектів.
2. Обґрунтування вибору домішок (Dy, Al) та їхньої концентрації викладено загалом коректно, однак було б корисно додати порівняння з іншими легуючими елементами, які потенційно можуть впливати на електрофізичні параметри при збереженні високого питомого опору.
3. У тексті роботи подекуди трапляються незначні граматичні та стилістичні неточності, зокрема пропущені цитування у тексті до номеру [6] у списку використаних джерел. Однак ці неточності не впливають на розуміння основного змісту.
4. Частина графічного матеріалу, зокрема підписи до графіків і легенди – має занадто дрібний шрифт або недостатню контрастність.

Зазначені зауваження не знижують загальної наукової оцінки дисертації та не впливають на достовірність викладених положень і висновків.

Висновок про відповідність дисертації вимогам, які пред'являються до наукового ступеня доктора філософії

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича на тему «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових

структур терагерцового діапазону”, представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 “Мікро- та наносистемна техніка”, є актуальним, самостійним і завершеним науковим дослідженням.

У дисертації послідовно й логічно викладено теоретичні засади, методологію експериментальних досліджень, аналіз результатів та обґрунтовані наукові висновки, що засвідчує високий рівень наукової підготовки здобувача. Робота відповідає основним вимогам до дисертаційних досліджень зокрема за змістом, структурою, науковою новизною, практичним значенням та достовірністю результатів.

Дисертація повністю відповідає Наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”, постанові Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р. №44 “Порядок присудження ступеня доктора філософії”, із урахуванням змін, внесених постановою КМ №341 від 21.03.2022 р.

На підставі змістовної та наукової оцінки робота “Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону” може бути рекомендована до захисту у разовій спеціалізованій раді, а її автор Аріков Владислав Вікторович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 “Мікро- та наносистемна техніка”.

Рецензент

Професор кафедри напівпровідникової електроніки

Національного університету
“Львівська політехніка”

д.т.н., проф.

Підпис д.т.н., професора

Юрія ХОВЕРКА

“ЗАСВІДЧУЮ”

Юрій ХОВЕРКО

Вчений секретар
Національного університету
“Львівська політехніка”

к.т.н., доц.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ