

ВІДГУК

офіційного опонента,
доктора технічних наук,

професора кафедри мікроелектроніки

Національного технічного університету України "Київського
політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського

ВЕРБИЦЬКОГО Володимира Григоровича

на дисертацію

АРІКОВА Владислава Вікторовича

«Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових
структур терагерцового діапазону»

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі
знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю

153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Актуальність теми

Предметом дисертаційної роботи Арікова В.В. є дослідження процесів формування низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) для застосувань у терагерцовому (ТГц) діапазоні. З огляду на стрімкий розвиток ТГц-фотоніки, оптоелектроніки та сенсорики, проблема створення високоефективних матеріалів з коротким часом життя носіїв, високим питомим опором і стабільними параметрами — є актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору.

Обґрунтоване відхилення від традиційної молекулярно-променевої епітаксії на користь рідиннофазної епітаксії (РФЕ) як потенційно доступнішої та масштабованої альтернативи свідчить про прагнення автора розв'язати прикладну задачу оптимізації технологічного процесу. Застосування динамічного охолодження та використання домішок (Dy, Al) для керування властивостями матеріалу є логічним продовженням сучасних тенденцій у матеріалознавстві нерівноважних напівпровідникових систем.

З урахуванням цього, слід визнати, що обрана тема повністю відповідає сучасному рівню розвитку галузі мікро- та наноелектроніки, а також запитам ТГц-інженерії. Робота спрямована на створення технологічних підходів, які можуть бути застосовані при виготовленні

сучасних систем ТГц-діапазону, зокрема фотопровідних антен, детекторів та модуляторів.

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

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича виконана в межах пріоритетних наукових напрямів кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету «Львівська політехніка», які передбачають розробку новітніх матеріалів і технологій для сенсорних та оптоелектронних приладів. Зокрема, дослідження відповідає таким науковим темам: «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».

Результати, отримані в процесі роботи, мають безпосереднє прикладне значення для розвитку терагерцової електроніки, фотоніки, сенсоріки та мікросистемних технологій. Таким чином, дисертація логічно вписується у загальну наукову стратегію закладу вищої освіти та сприяє вирішенню актуальних завдань галузі мікро- та наносистемної техніки.

Наукова новизна

У дисертації Арікова Владислава Вікторовича отримано нові науково обґрунтовані результати, що становлять собою істотний внесок у розвиток технологій вирощування і модифікації низькотемпературного арсеніду галію (HT-GaAs) для застосування в терагерцових оптоелектронних пристроях. Вперше реалізовано методику рідкофазної епітаксії GaAs з динамічно контрольованою швидкістю охолодження, що забезпечує формування шарів із підвищеною концентрацією рекомбінаційно-активних дефектів, необхідних для надшвидких ТГц-пристроїв. Також обґрунтовано можливість інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) у HT-GaAs шляхом комплексного легування диспрозієм (Dy) і алюмінієм (Al), визначено критичні концентрації легуючих елементів, за яких досягається стабільне формування високоомних шарів з питомим опором понад 10^6 Ом·см, що відповідає вимогам до матеріалів для ТГц-сенсоріки, побудовано універсальну математичну модель процесу кристалізації HT-GaAs, яка враховує температурний градієнт, швидкість

оохолодження, геометрію ростового зазору та ступінь переохолодження. Модель дозволяє прогнозувати морфологію шару, розподіл носіїв заряду по товщині шару. Вперше вивчено вплив імпульсного терагерцового опромінення на зміну електрофізичних властивостей шарів легованих одночасно диспрозієм та алюмінієм. Експериментально підтверджено функціональну придатність вирощених шарів НТ-GaAs для застосування у терагерцових пристроях, що засвідчує прикладну цінність запропонованої технології.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що результати дисертації розширюють наукові уявлення про кристалізацію A^3B -сполук у нерівноважних умовах і відкривають нові перспективи створення елементів терагерцової мікроелектроніки.

Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність результатів дисертаційної роботи Арікова Владислава Вікторовича полягає у розробці науково обґрунтованих методів формування низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs) з керованими електрофізичними параметрами для використання в терагерцових (ТГц) оптоелектронних пристроях.

Запропонована технологія рідиннофазної епітаксії з динамічним оохолодженням забезпечує:

- Створення високоомних шарів НТ-GaAs без застосування іонної імплантації або складного вакуумного обладнання, що спрощує виробничий процес і знижує витрати;
- Реалізацію інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$) за допомогою легування диспрозієм і алюмінієм, що відкриває перспективи створення гетероструктур $p-i-n$ / $n-i-p$ типу без додаткових технологічних операцій;
- Можливість адаптивного післяростового корегування властивостей шарів НТ-GaAs за допомогою імпульсного ТГц-опромінення, що є новим інструментом для керування іонізацією глибоких рівнів і дефектною структурою;

- Високу відтворюваність електрофізичних параметрів за рахунок оптимізації температурних градієнтів і концентрацій легуючих домішок, що дозволяє точно задавати потрібні характеристики приладових структур;
- Впровадження результатів у практику створення терагерцових сенсорів, фотопровідних антен, комутаторів і модулів телекомунікаційних систем, а також біомедичних приладів для спектроскопії в ТГц-діапазоні.

Одержані підходи можуть бути адаптовані до технологій масового виробництва мікро- та нанoeлектронних компонентів для ТГц-діапазону, а також використані в навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі мікроелектроніки, фізики напівпровідників і сенсорних технологій.

Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертація Арікова Владислава Вікторовича на тему «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» є завершеною рукописною кваліфікаційною науковою працею, що повністю відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка».

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного змісту, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 131 сторінка основного тексту, включаючи 39 рисунків, 6 таблиць і список літератури з 122 найменувань.

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

У **першому розділі** подано аналітичний огляд літературних джерел з проблематики вирощування низькотемпературного арсеніду галію, описано фізико-хімічні особливості кристалізації в умовах нерівноваги, технологічні підходи до модифікації матеріалу та його застосування в

терагерцових фотонних пристроях. Розділ завершується постановкою наукової проблеми.

Другий розділ присвячений методикам вирощування шарів НТ-GaAs методом рідиннофазної епітаксії з керованим охолодженням. Описано конструкції технологічних комірок, алгоритми охолодження, способи легування (диспрозієм, алюмінієм), вимірювання температурних градієнтів, а також методики опромінення терагерцовими імпульсами.

У **третьому розділі** наведено результати комплексного дослідження морфології, оптичних та електрофізичних властивостей вирощених шарів. Зокрема, охарактеризовано вплив параметрів охолодження на час життя носіїв, тип і концентрацію провідності, прозорість у ТГц-діапазоні. Показано ефект інверсії типу провідності та формування високоомних шарів із питомим опором понад 10 Ом·см.

Четвертий розділ містить теоретичну інтерпретацію отриманих результатів. Побудовано математичну модель кристалізації НТ-GaAs у динамічному температурному полі, що враховує геометрію ростового зазору, тепловий градієнт, перенасичення розчину та механізми дифузії. Модель дозволила пояснити спостережувані залежності морфології та електрофізичних характеристик від технологічних параметрів.

У **висновках** підсумовано основні результати дослідження, вказано ступінь реалізації поставлених завдань і досягнення мети роботи.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Дисертаційна робота є результатом самостійного наукового дослідження, виконаного Аріковим Владиславом Вікторовичем. Усі наукові положення, експериментальні результати, узагальнення та висновки сформульовано автором на основі власних досліджень.

У процесі підготовки дисертації було дотримано принципів академічної доброчесності, зокрема щодо самостійності виконання, достовірності представлених результатів, коректного оформлення запозичень та посилань на наукові джерела. Будь-які форми плагіату, фальсифікації чи фабрикації результатів у роботі відсутні.

Запозичені фрагменти літератури або аналітичних матеріалів подано з відповідними бібліографічними посиланнями, що засвідчує дотримання вимог наукової етики й чинного законодавства України у сфері академічної доброчесності.

Таким чином, дисертація відповідає всім етичним і методологічним нормам, що пред'являються до кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі Арікова Владислава Вікторовича, є обґрунтованими, логічно послідовними й базуються на комплексному аналізі теоретичних та експериментальних досліджень. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, зокрема профілометричних, оптичних, електрофізичних (зокрема Hall-вимірювань, C–V-характеристик), а також терагерцової спектроскопії, що дозволило багатоаспектно охарактеризувати властивості вирощених шарів низькотемпературного арсеніду галію (НТ-GaAs). Наукові висновки підтверджуються серіями експериментів з відтворюваними результатами, а також співставленням отриманих даних із результатами чисельного моделювання, реалізованого в середовищі Mathcad. Узгодженість теоретичних моделей із результатами вимірювань свідчить про валідність обраного методологічного підходу. Додаткову достовірність забезпечує порівняння отриманих характеристик із даними з наукової літератури, що охоплює сучасний стан досліджень у галузі нерівноважної епітаксії та терагерцової фотоніки. Застосування декількох незалежних аналітичних методів та підтвердження ефектів (наприклад, інверсії типу провідності, підвищення питомого опору, впливу ТГц-опромінення) дозволяє стверджувати про високу ступінь достовірності наукових положень, сформульованих у дисертації.

Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

У процесі ознайомлення з дисертаційною роботою Арікова Владислава Вікторовича було виявлено кілька положень, які заслуговують на уточнення або подальше розкриття з наукової точки зору:

1. У розділі, присвяченому процесу рідкофазної епітаксії (РФЕ) низькотемпературного арсеніду галію, автор приділяє значну увагу ролі температурного градієнта та швидкості охолодження. Разом з тим, механізми формування кластерних дефектів за умов глибокого переохолодження могли б бути пояснені докладніше з позицій термодинаміки фазового переходу.
2. У частині, що стосується ефекту інверсії типу провідності ($n \rightarrow p$), доцільно було б ширше обговорити можливі альтернативні механізми цього явища, зокрема вплив домішкових комплексів або активації глибоких рівнів, а також навести більше даних щодо стабільності сформованих p -шарів у часі та під дією зовнішніх полів.
3. Теоретична модель процесу кристалізації, представлена в роботі, є важливим елементом обґрунтування отриманих результатів. Однак певні параметри моделі (наприклад, коефіцієнти дифузії компонентів або точні умови перенасичення) подано без достатньої кількісної верифікації або порівняння з літературними даними, що ускладнює їх практичне використання.
4. У розділі висновків окремі формулювання є дещо узагальненими. Було б доречно посилити їх кількісними показниками — наприклад, змінами питомого опору, концентрації носіїв або ступеня пропускання у терагерцовому діапазоні — для наочнішого підкреслення досягнутого наукового результату.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, яка є завершеним і високоякісним науковим дослідженням.

Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам

Дисертаційна робота Арікова Владислава Вікторовича на тему «Кристалізація низькотемпературного арсеніду галію для приладових структур терагерцового діапазону» за актуальністю, науковою новизною, повнотою вирішення поставлених завдань, обґрунтованістю отриманих результатів, ступенем їх апробації та оформленням відповідає вимогам, визначеним:

- Порядком присудження ступеня доктора філософії, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (із змінами згідно з постановою КМУ № 507 від 03.05.2024 року);
- Вимогами до оформлення дисертацій, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 р. № 40.

У дисертації обґрунтовано нові підходи до інтенсифікації кристалізації в умовах глибокого перенасичення розплаву, розкрито механізми формування дефектної підсистеми під впливом легування диспрозієм та алюмінієм, виявлено можливість інверсії типу провідності, а також вперше досліджено вплив терагерцового опромінення на властивості низькотемпературного арсеніду галію кристалізованого низькотемпературною рідкофазною епітаксією.

На підставі викладеного 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 кафедри мікроелектроніки
Національного технічного університету України "Київського
політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського


Володимир ВЕРБИЦЬКИЙ

Підпис проф. Вербицького В.Г. засвідчую:

 Сергій Гонто



 Сергій Гонто