

БЕРДЯНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет фізико-математичної, комп'ютерної та технологічної освіти
Кафедра фізики, математики та методики навчання

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедрою
д.п.н., проф. Олександр ШКОЛА
«12» грудня 2025 р.

**СТРУКТУРНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ
ALGAAS/GAAS**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконавець: здобувач другого рівня вищої освіти,
групи м2пфн

Спеціальність: 105 Прикладна фізика та
наноматеріали

Освітньо-професійна програма: Прикладна фізика
та наноматеріали

ПІБ: Дмитро САБУРОВ

Керівник: д.техн.н., проф. Ярослав ЖИДАЧЕВСЬКИЙ

Рецензент: д.техн.н., проф. Яна СИЧІКОВА

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сабуров Дмитро Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Структурні та оптичні властивості гетероструктури AlGaAs/GaAs»

Керівник роботи: Жидачевський Я.А., д. техн. н., професор
затверджені наказом по університету від «24» листопада 2025 року № 692с.

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: синтез гетероструктури AlGaAs/GaAs електрохімічним методом та дослідження її структурних і оптичних властивостей з метою оцінки перспектив використання в оптоелектронних і фотонних пристроях.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- проаналізувати сучасний стан досліджень гетероструктур AlGaAs/GaAs та методів їх синтезу;
- підготувати поверхню монокристалічної підкладки GaAs до електрохімічного осадження;
- синтезувати шар AlGaAs на поверхні GaAs з використанням електрохімічного осадження;
- дослідити морфологічні особливості гетероструктури методом скануючої електронної мікроскопії;
- визначити елементний склад синтезованої гетероструктури методом EDX-аналізу;
- проаналізувати кристалічну структуру та фононні властивості матеріалу за допомогою раманівської спектроскопії;
- дослідити оптичні властивості гетероструктури методом фотолюмінесцентної спектроскопії.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) (за необхідністю):

6. Консультанти розділів роботи (якщо передбачені):

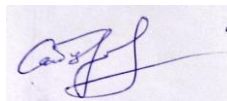
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 27.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формулювання теми кваліфікаційної роботи, підготовка вступу, складання плану роботи.	жовтень – грудень 2024 р.	
2.	Аналіз літературних джерел за темою дослідження, уточнення базових понять дослідження. Підготовка розділу 1.	лютий – квітень 2025 р.	
3.	Підготовка розділу 2.	травень – вересень 2025 р.	
4.	Підготовка розділу 3.	жовтень – листопад 2025 р.	
5.	Оформлення підсумкового варіанту кваліфікаційної роботи відповідно до чинних вимог.	08.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти:



(підпис)

Дмитро САБУРОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи:



(підпис)

Ярослав ЖИДАЧЕВСЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.	5
Розділ 1. Сучасний стан досліджень гетероструктур AlGaAs/GaAs. ...	8
Розділ 2 Матеріали та методи дослідження.	10
Розділ 3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення.	12
3.1. Морфологічні особливості гетероструктури AlGaAs/GaAs.	12
3.2. Елементний склад гетероструктури.	13
3.3. Структурні та фононні властивості за даними раманівської спектроскопії.	15
3.4. Оптичні властивості гетероструктури за даними фотолюмінесценції.	17
3.5. Узагальнений аналіз впливу електрохімічного синтезу на властивості гетеро структури.	18
Висновки.	21
Список використаних джерел.	23

ВСТУП

Розвиток сучасної оптоелектроніки, фотоніки та високошвидкісної електроніки тісно пов'язаний із дослідженням і впровадженням напівпровідникових гетероструктур на основі сполук III–V. Серед них гетероструктури AlGaAs/GaAs посідають особливе місце завдяки можливості керування шириною забороненої зони шляхом варіювання вмісту алюмінію, високій рухливості носіїв заряду та добрій сумісності з різноманітними оптоелектронними пристроями — світлодіодами, лазерними діодами, фотодетекторами та високочастотними транзисторами.

Актуальність дослідження гетероструктур AlGaAs/GaAs зумовлена також переходом від традиційних планарних плівок до наноструктурованих систем, у яких проявляються квантово-розмірні ефекти та зростає роль поверхневих і міжфазних явищ. Формування наноструктурованих шарів дозволяє суттєво змінювати оптичні та електронні властивості матеріалу, розширюючи можливості його практичного застосування.

Традиційні методи отримання гетероструктур AlGaAs/GaAs, такі як молекулярно-променева або рідкофазна епітаксія, забезпечують високу якість матеріалу, однак потребують складного вакуумного обладнання, високих температур і значних енергетичних витрат. У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних, більш простих і економічно ефективних технологій, зокрема електрохімічних методів, які дозволяють формувати наноструктуровані шари з контрольованою морфологією.

У цьому контексті дослідження структурних і оптичних властивостей гетероструктури AlGaAs/GaAs, синтезованої електрохімічними методами, є науково актуальним і практично значущим, оскільки сприяє розширенню уявлень про можливості низьковартісних технологій у створенні функціональних матеріалів для сучасної оптоелектроніки.

Об'єкт дослідження: напівпровідникові гетероструктури на основі сполук III–V, сформовані на підкладці GaAs.

Предмет дослідження: структурні, морфологічні та оптичні властивості гетероструктури AlGaAs/GaAs, отриманої методом електрохімічного осадження.

Мета роботи: синтез гетероструктури AlGaAs/GaAs електрохімічним методом та дослідження її структурних і оптичних властивостей з метою оцінки перспектив використання в оптоелектронних і фотонних пристроях.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень гетероструктур AlGaAs/GaAs та методів їх синтезу.
2. Підготувати поверхню монокристалічної підкладки GaAs до електрохімічного осадження.
3. Синтезувати шар AlGaAs на поверхні GaAs з використанням електрохімічного осадження.
4. Дослідити морфологічні особливості гетероструктури методом скануючої електронної мікроскопії.
5. Визначити елементний склад синтезованої гетероструктури методом EDX-аналізу.
6. Проаналізувати кристалічну структуру та фононні властивості матеріалу за допомогою раманівської спектроскопії.
7. Дослідити оптичні властивості гетероструктури методом фотолюмінесцентної спектроскопії.

Наукова новизна отриманих результатів

- **вперше** синтезовано наноструктуровану гетероструктуру AlGaAs/GaAs методом електрохімічного осадження з формуванням розгалужених кристалічних утворень на поверхні GaAs;
- **удосконалено** підхід до формування шару AlGaAs шляхом попереднього електрохімічного модифікування поверхні підкладки, що дозволяє керувати морфологією та структурою шару;

- **набули подальшого розвитку** уявлення про взаємозв'язок між морфологією, складом і оптичними властивостями гетероструктур AlGaAs/GaAs, сформованих невакуумними методами.

Практична значимість роботи. Отримані результати можуть бути використані при розробці та оптимізації технологій виготовлення гетероструктур AlGaAs/GaAs для оптоелектронних, фотонних і високочастотних електронних пристроїв. Запропонований електрохімічний метод синтезу є технологічно простим, економічно ефективним і потенційно масштабованим, що робить його перспективним для лабораторних досліджень, навчального процесу та подальших прикладних розробок.

Розкриття факту делегування завдань генеративному ШІ

Автори заявляють про використання генеративного ШІ у процесі дослідження та підготовки рукопису. Відповідно до таксономії GAIDeT (2025), наведені нижче завдання були делеговані інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду:

- Визначення мети дослідження
- Формулювання дослідницьких питань і гіпотез
- Розроблення експериментальних або дослідницьких протоколів
- Вичитування та редагування

Використаний інструмент генеративного ШІ: ChatGPT-5.

Повну відповідальність за фінальний рукопис несуть автори.

Інструменти генеративного ШІ не зазначаються як автори та не несуть відповідальності за кінцеві результати.

Декларацію подав(ла): САБУРОВ Дмитро

Розділ 1. Сучасний стан досліджень гетероструктур AlGaAs/GaAs

Арсенід алюмінію галію (AlGaAs) — це напівпровідниковий матеріал, який привернув значну увагу в галузі електронних компонентів і технологій матеріалів завдяки своїм унікальним властивостям і різнобічним застосуванням [1, 2]. Цей складний напівпровідник утворюється сплавом арсеніду галію (GaAs) з арсенідом алюмінію (AlAs), що дозволяє змінювати його заборонену зону шляхом зміни вмісту алюмінію [3, 4]. Здатність адаптувати свої електронні властивості робить AlGaAs особливо важливим у сфері оптоелектроніки та високошвидкісної електроніки [5]. Крім того, чудова рухливість електронів AlGaAs є ключовою у високочастотних додатках, включаючи радіочастотні (РЧ) і мікрохвильові компоненти, де швидкість і ефективність є найважливішими [6].

У контексті стійких і портативних енергетичних рішень AlGaAs займає особливе місце. Його придатність для високоефективних сонячних елементів, особливо в портативних форматах, підкреслює його актуальність у пошуках екологічних технологій [7, 8].

Останні наукові дослідження перемістили центр уваги з традиційних плівок на наноструктури, такі як дроти, вуса та наноголки [9, 10]. Цей перехід обумовлений перспективами наноструктур у досягненні чудового контролю над електронними та оптичними властивостями, прокладаючи шлях до проривів у наноелектроніці та нанофотоніці [11]. Наноструктури AlGaAs пропонують більше співвідношення поверхні до об'єму та потенційні квантові ефекти, які є вигідними для підвищення продуктивності пристроїв, включаючи підвищене поглинання світла в сонячних елементах і покращену ефективність світлодіодів і лазерних діодів [12].

Паралельно з композиційним налаштуванням, наноструктурування поверхні з'явилося як ще одна ефективна стратегія для модуляції властивостей матеріалу [13]. Було добре задокументовано, що навіть прості електрохімічні процеси можуть суттєво впливати на макро- та

мікроархітектуру поверхонь напівпровідників, що призводить до змінених і часто покращених властивостей [14]. Однак корисність арсеніду галію з його шириною забороненої зони приблизно 1,42 eV дещо обмежена через цю властивість.

Одночасно зростає інтерес до напівпровідників з широкою забороненою зоною (WBG) через їхній потенціал революціонізувати силову електроніку, створюючи компоненти, які є меншими, швидшими, надійнішими та ефективнішими [15, 16]. Ці матеріали, як правило, демонструють вищу рухливість електронів і швидкість насичення, що сприяє вищим частотам перемикання [17], і можуть працювати при вищих напругах і температурах порівняно з традиційними напівпровідниковими матеріалами [18].

Для розширення забороненої зони GaAs були запропоновані такі методи, як молекулярно-променева епітаксія, рідкофазна епітаксія та вакуумне осадження, які зазвичай включають складне обладнання, тривалий час обробки та роботу в умовах високих температур і вакууму [19]. Незважаючи на ефективність цих високотехнологічних методів, їх складність і ресурсоемність перешкоджають широкому промислому застосуванню. Навпаки, більш прості та економічно ефективні методи, такі як електрохімічне та хімічне травлення, електрохімічне осадження та їх комбінації, привернули значну увагу [20]. Переваги цих методів полягають у доступності, простоті та швидкості обробки [21, 22]. Однак ці методи часто стикаються з такими проблемами, як обмежений контроль процесу та більша ймовірність забруднення поверхні продуктами реакції [23], що підкреслює необхідність подальшого вдосконалення електрохімічних методів.

У нашому дослідженні ми повідомляємо про синтез потрібної сполуки $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на підкладці GaAs шляхом електрохімічного осадження з попередньою обробкою, що включає електрохімічне текстурування поверхні GaAs.

Розділ 2. Матеріали та методи дослідження

Основним субстратом для вирощування гетероструктури AlGaAs/GaAs слугував монокристалічний арсенід галію (GaAs) n-типу провідності, легований сурмою (Sb). Використання саме n-GaAs зумовлене його високою електронною рухливістю, стабільними електрофізичними характеристиками та широким застосуванням у високошвидкісних і оптоелектронних пристроях. Легування сурмою забезпечує необхідний рівень провідності та сприяє покращенню відтворюваності електрохімічних процесів під час осадження.

Початкова підготовка підкладок GaAs включала багатостадійне хімічне очищення з метою видалення поверхневих забруднень, оксидних і пасивуючих шарів, що могли утворитися під час зберігання зразків у повітряному середовищі. Очищення проводили шляхом занурення зразків у водний розчин соляної кислоти зі співвідношенням $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:5$ протягом 30 хвилин при кімнатній температурі. Така обробка забезпечує ефективне хімічне полірування поверхні та видалення природного оксидного шару Ga_2O_3 , що є критично важливим для забезпечення рівномірного електрохімічного осадження.

Після кислотної обробки зразки ретельно промивали в суміші оцту та етилового спирту, що дозволяло видалити залишки реакційних продуктів і запобігти повторному утворенню поверхневих дефектів. Завершальне промивання також сприяло знежиренню поверхні та підвищенню її хімічної активності. З метою мінімізації окислення очищеної поверхні GaAs підкладки негайно використовували у подальшому експериментальному процесі без тривалого контакту з повітрям.

Формування наноструктурованих кристалітів AlGaAs здійснювали методом електрохімічного осадження з використанням водного електроліту на основі хлориду алюмінію (AlCl_3). Електроліт готували шляхом розчинення безводних кристалів AlCl_3 у дистильованій воді у масовому співвідношенні

2:3 при температурі 25°C із безперервним перемішуванням за допомогою магнітної мішалки. Такий режим приготування забезпечував повне розчинення солі та однорідність електроліту, що є необхідною умовою стабільного електрохімічного процесу.

Підготовлені підкладки GaAs занурювали в електроліт і розміщували в електрохімічній комірці з триелектродною конфігурацією. Робочим електродом слугувала пластина GaAs, протиелектродом — платиновий електрод (Pt), а електродом порівняння — електрод срібло/хлорид срібла (Ag/AgCl). Така конфігурація дозволяє точно контролювати електрохімічні параметри процесу осадження. Конструкція комірки включала модифікований тефлоновий тигель із вбудованою мішалкою, що забезпечувало рівномірний розподіл електроліту, запобігало локальним градієнтам концентрації та сприяло видаленню газових бульбашок з поверхні зразка.

Для запобігання можливому забрудненню ростової зони продуктами електродних реакцій електрод порівняння був з'єднаний з електрохімічною коміркою через сольовий місток. Процес електрохімічного осадження проводили в імпульсному режимі, який включав цикли витримування зразка в електроліті протягом 2 хвилин при напрузі 3 В та 1 хвилину при напрузі 6 В. Загалом виконували три таких цикли. Зміна прикладеної напруги дозволяла керувати кінетикою осадження, сприяючи формуванню наноструктурованих кристалітів замість суцільної плівки.

Морфологічні характеристики синтезованих гетероструктур досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, що дозволяло отримати детальну інформацію про форму, розміри та розподіл наноструктур на поверхні GaAs. Компонентний склад поверхневих шарів визначали методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX), інтегрованої в той самий мікроскоп, що забезпечувало кореляцію морфологічних і хімічних даних.

Дослідження структурних властивостей гетероструктури проводили методом раманівської спектроскопії з використанням мікроспектрометра RENISHAW inVia Reflex при кімнатній температурі. Вимірювання здійснювали з довжиною хвилі лазерного збудження $\lambda = 532$ нм, дифракційною ґраткою 2400 ліній/мм у спектральному діапазоні 100–1000 см^{-1} . Час експозиції становив 10 с, кількість накопичень — 5, інтенсивність лазера — 5%, що дозволяло отримати спектри з високим співвідношенням сигнал/шум без пошкодження зразків.

Оптичні властивості гетероструктури AlGaAs/GaAs досліджували методом фотолюмінесцентної спектроскопії з використанням спектральної установки КСВУ-23. Як джерело збудження застосовували лазер з довжиною хвилі 450 нм, що забезпечувало ефективне збудження міжзонних переходів у GaAs та AlGaAs і дозволяло аналізувати особливості рекомбінаційних процесів у гетероструктурі.

Розділ 3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

3.1. Морфологічні особливості гетероструктури AlGaAs/GaAs.

Рисунок 3.1 демонструє SEM-зображення поверхні утвореної структури. Можна бачити щільне заростання поверхні GaAs наноструктурованими кристалітами AlGaAs. Поверхнева морфологія демонструє конгломерат гранчастих пластинчастих кристалічних утворень. Ці наноструктури, які охоплюють кілька мікрометрів у довжину та ширину, демонструють неоднорідну збірку, потенційно вказуючи на нерівномірну динаміку росту під час процесу синтезу. Отримана топологія передбачає багатогранний фронт росту, де різні кристалографічні площини демонструють різні швидкості росту, що призводить до утворення цих пластинчастих наноструктур. У контексті застосувань, таких як оптоелектронні пристрої, спостережувана тут морфологія може мати значні наслідки. Збільшена площа поверхні, що забезпечується шорсткими гранчастими поверхнями, може

посилити поглинання світла та появу квантово-розмірних ефектів, що є перевагою для фотоелектричних та електронних застосувань. Спостережувані особливості також свідчать про складний механізм росту, який призводить до наявності різних кристалічних граней, що потенційно пропонує покращені функціональні властивості для електронних і фотонних застосувань.

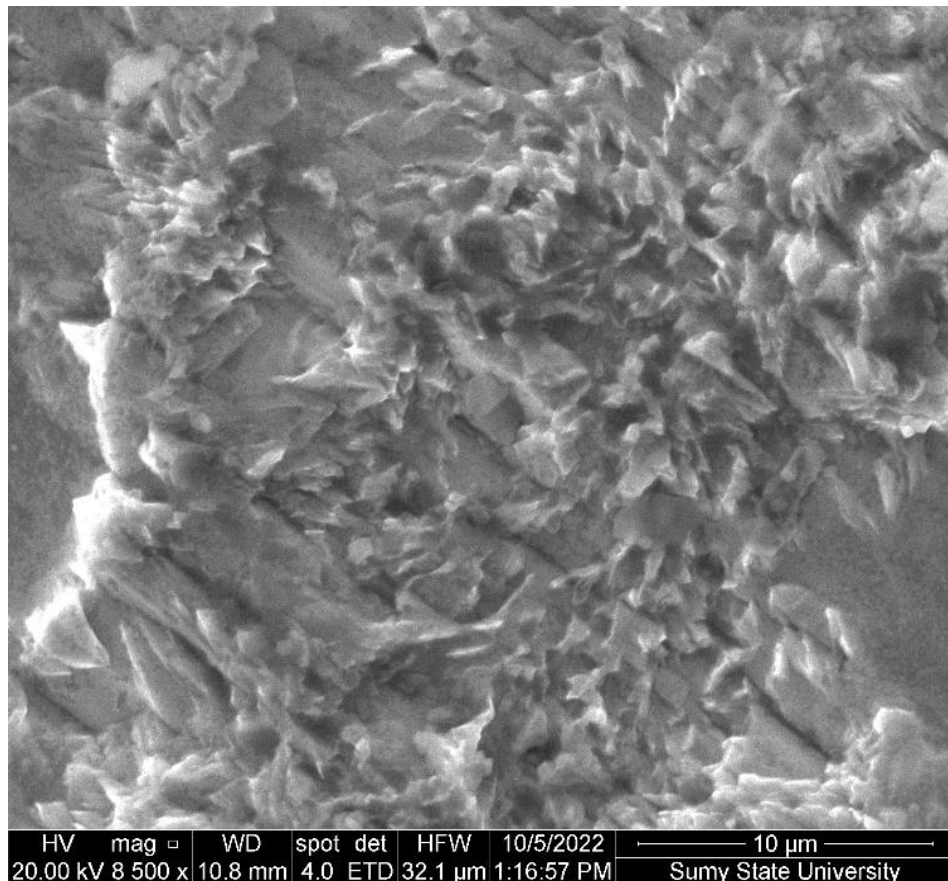


Рис. 3.1 SEM-зображення гетероструктури AlGaAs/GaAs

3.2. Елементний склад гетероструктури

Аналіз елементного складу поверхні гетероструктури AlGaAs/GaAs, проведений методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX), показав, що поверхневий шар містить переважно миш'як (As), галій (Ga) та алюміній (Al). Згідно з отриманими даними (таблиця 3.1), атомна частка миш'яку становить 42,69%, галію — 29,74%, алюмінію — 27,57%.

Таблиця 3.1 Компонентний склад поверхні

Елемент	Атомні відсотки, %
<i>As</i>	42.69
<i>Ga</i>	29.74
<i>Al</i>	27.57

Домінування миш'яку в елементному складі є характерним для поверхні гетероструктур на основі сполук III–V та може бути пов'язане з особливостями електрохімічного осадження і поверхневої сегрегації. Відомо, що в умовах електрохімічних процесів та після хімічної обробки поверхні GaAs атоми As можуть переважно зберігатися на поверхні або повторно адсорбуватися, що призводить до їх підвищеної концентрації у приповерхневому шарі. Крім того, слід враховувати поверхнево-чутливий характер EDX-аналізу, який фіксує усереднений склад у приповерхневій області, а не чітко розділені окремі шари гетероструктури.

Співвідношення галію та алюмінію ($Ga : Al \approx 1,08$) свідчить про формування змішаного шару AlGaAs на поверхні GaAs, що узгоджується з очікуваною структурою гетероструктури. Наявність обох металів у близьких атомних концентраціях підтверджує, що в процесі електрохімічного осадження відбувається не лише формування окремого шару AlGaAs, але й часткове міжшарове змішування на межі AlGaAs/GaAs. Такий ефект може бути зумовлений дифузійними процесами на межі поділу, а також особливостями імпульсного режиму осадження з чергуванням різних напруг.

Відсутність у спектрах сторонніх домішкових елементів або продуктів забруднення свідчить про високу чистоту поверхні після синтезу та підтверджує ефективність попередньої хімічної підготовки підкладок GaAs. Це є важливим чинником для формування якісних гетероструктур, оскільки

наявність неконтрольованих домішок може суттєво впливати на оптичні та електронні властивості матеріалу.

Слід також зазначити, що метод EDX не дозволяє безпосередньо визначити кристалічну фазу або точний профіль розподілу елементів по товщині гетероструктури. Проте отримані результати дають переконливе підтвердження формування поверхневого шару, збагаченого елементами AlGaAs та GaAs, і створюють основу для подальшої інтерпретації структурних і оптичних властивостей гетероструктури за даними раманівської та фотолюмінесцентної спектроскопії.

Таким чином, результати EDX-аналізу підтверджують успішне формування гетероструктури AlGaAs/GaAs електрохімічним методом і вказують на наявність змішаного приповерхневого шару, який може відігравати ключову роль у формуванні оптичних переходів та рекомбінаційних процесів у досліджуваній системі.

3.3. Структурні та фононні властивості за даними раманівської спектроскопії

Спектр комбінаційного розсіювання демонструє серію піків, характерних для коливальних мод, властивих гетероструктурним матеріалам AlGaAs/GaAs (рис. 3.2). Найінтенсивніший гострий пік при 271 см^{-1} є типовим для моди поздовжнього оптичного (LO) фонону в GaAs. Різкість і висока інтенсивність цього піку вказує на добре впорядковану кристалічну решітку та високоякісний матеріал, оскільки цей режим дуже чутливий до порядку та чистоти решітки.

Плече приблизно в 340 см^{-1} справді може свідчити про суперпозицію піків. Цю особливість можна віднести до шару AlGaAs, де фононна мода LO зміщена через присутність Al. Зсув і розширення цього піку може бути пов'язано зі зміною складу в шарі AlGaAs, оскільки вміст Al може змінити раманівський зсув. Це також може свідчити про наявність неупорядкованості

сплаву або градієнтів складу в шарі AlGaAs, що не є рідкістю в таких гетероструктурах.

Менш інтенсивні піки при 99 і 151 cm^{-1} можна віднести до акустичних фононних мод або, можливо, до комбінаційного розсіювання другого порядку, що включає комбінації або обертони фундаментальних коливань ґратки.

При 532 cm^{-1} спостережуваний широкий пік, ймовірно, пов'язаний із суперпозицією кількох піків, які, ймовірно, включають фононні моди як GaAs, так і AlGaAs. Ширина цього піку свідчить про згортання процесів розсіювання багатьох фононів і на нього можуть впливати такі фактори, як деформація, дефекти або варіації в складі сплаву. Деформація в решітці може викликати розширення та зміщення фононних мод, тоді як дефекти можуть вводити додаткові коливальні моди в спектр.

Загалом, спектр свідчить про чітко виражену підкладку GaAs, на що вказує сильний пік при 271 cm^{-1} . Наявність інших піків свідчить про те, що гетероструктура включає шар AlGaAs із змінним складом, враховуючи зрушення та розширення піків. Додаткові ознаки в спектрі можуть вказувати на наявність дефектів, розлад сплаву або ефекти деформації всередині матеріалу, усі з яких є важливими міркуваннями в контексті виготовлення та продуктивності пристрою. Точні сигнатури комбінаційного розсіювання GaAs і складна поведінка сплаву AlGaAs добре представлені, і загальна якість матеріалу виглядає хорошою, з потенційними областями для подальшого дослідження, виділеними менш інтенсивними та ширшими піками.

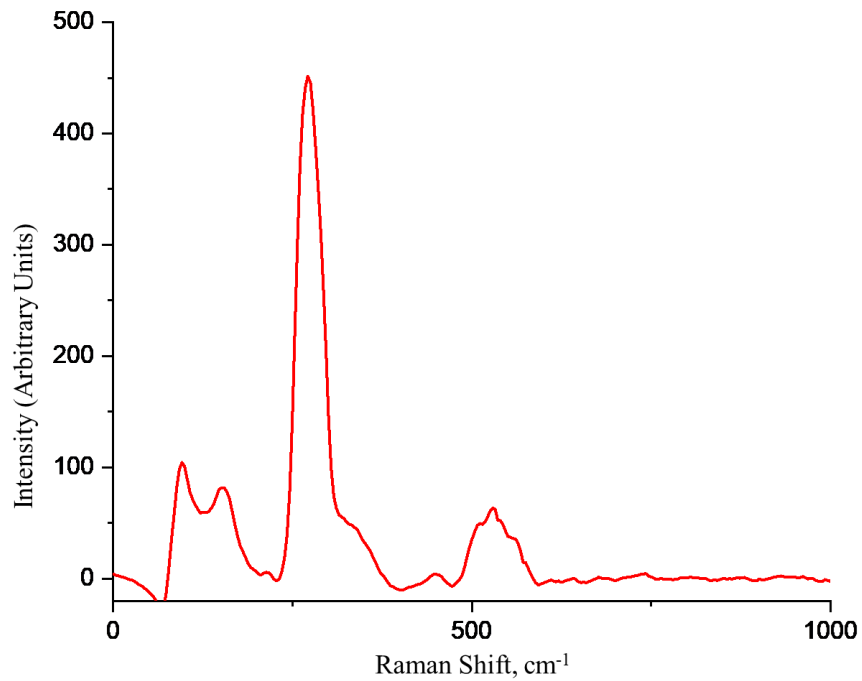


Рисунок 3.2. Раман спектр гетероструктури AlGaAs/GaAs

3.4. Оптичні властивості гетероструктури за даними фотолюмінесценції

У спектрі ФЛ гетероструктури AlGaAs/GaAs широкий пік при 875 нм свідчить про наявність складних оптичних переходів (рис. 3.3). Деконволюція цього широкого піку на три більш вузькі піки при 874 нм, 851 нм і 885 нм дає уявлення про специфічні переходи всередині гетероструктури.

Пік при 874 нм дуже близький до основного піку і, ймовірно, відповідає крайовій емісії GaAs. Енергія цього піку відповідає прямій забороненій зоні GaAs при кімнатній температурі, яка, як відомо, становить приблизно 1,42 еВ. Це випромінювання зазвичай відбувається внаслідок рекомбінації електронів і дірок у матеріалі GaAs.

Пік при 851 нм можна віднести до рекомбінації в шарі AlGaAs з більшим вмістом Al, оскільки додавання Al до GaAs збільшить енергію забороненої зони. Цей пік свідчить про те, що в гетероструктурі є області, де вміст Al вищий, що призводить до цього вищого випромінювання енергії.

Пік довшої довжини хвилі при 885 нм може бути пов'язаний з переходами в областях GaAs, які знаходяться під напругою або мають меншу заборонену зону через потенційні ефекти квантової ями або явища викривлення смуги на межах розділу. Це також може вказувати на наявність домішок або дефектів у шарі GaAs, які створюють локалізовані стани в забороненій зоні.

Широкий характер початкового піку при 875 нм вказує на те, що існує розподіл енергетичних станів, які сприяють сигналу PL. Це розширення може бути наслідком флуктуацій складу в шарі AlGaAs, змінами деформації в усій гетероструктурі або комбінацією різних процесів рекомбінації, що відбуваються в матеріалі.

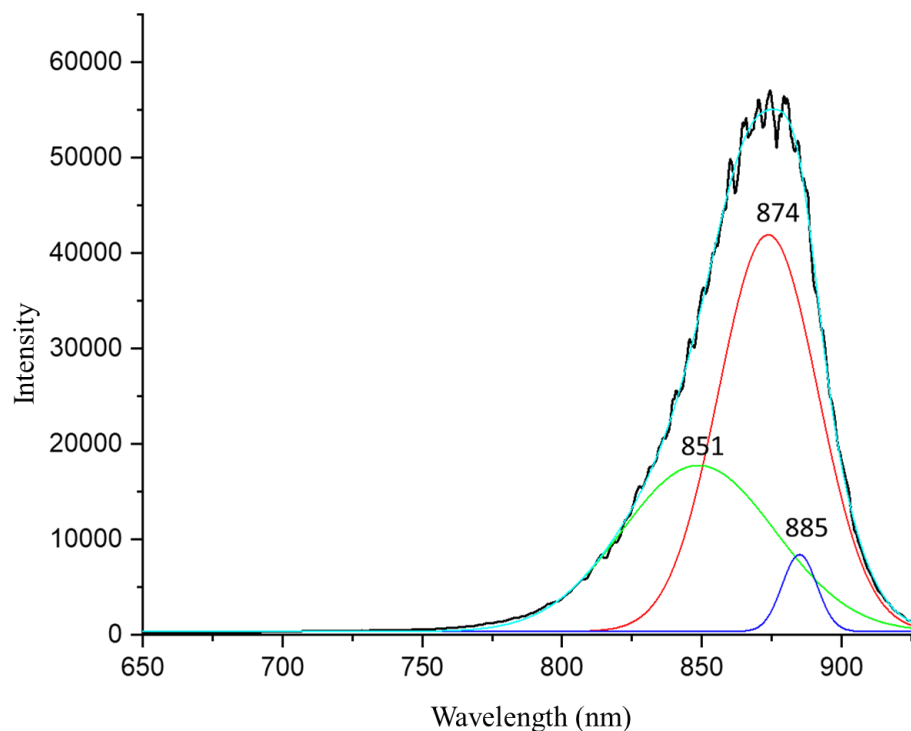


Рисунок 3.3 – PL спектр гетероструктури AlGaAs/GaAs

3.5. Узагальнений аналіз впливу електрохімічного синтезу на властивості гетероструктури

Синтезована гетероструктура AlGaAs/GaAs має значні перспективи для різноманітних застосувань у передовій електроніці. Здатність гетероструктури до точного налаштування за допомогою точного контролю

вмісту алюмінію в шарі AlGaAs становить особливий інтерес для світлодіодної технології, де довжину хвилі випромінювання можна адаптувати до конкретних потреб. Крім того, висока теплопровідність і міцність GaAs роблять цю гетероструктуру придатною для використання в електроніці високої потужності та в додатках управління температурою.

Технологія синтезу нашої гетероструктури також має ряд переваг. Метод електрохімічного осадження з водного розчину AlCl₃ є відносно простим і недорогим методом, що робить його доступним для великомасштабного виробництва. Гнучкість цього методу дозволяє регулювати електрохімічні параметри для контролю морфології та складу кристалітів AlGaAs. Ця гнучкість є перевагою для виготовлення пристроїв, які вимагають точних властивостей матеріалу, таких як пристрої та датчики поверхневих акустичних хвиль (SAW), які дуже чутливі до структурних характеристик п'єзоелектричних матеріалів, що використовуються в їх конструкції.

Економічна ефективність є критичним фактором у конкурентному середовищі виробництва електронних компонентів. Простота та економічність приготування електроліту в поєднанні з можливістю масштабування процесу електрохімічного осадження є переконливими аргументами для впровадження цієї технології в промислових умовах. Крім того, здатність методу запобігати забрудненню завдяки використанню з'єднання сольового містка з електродом порівняння забезпечує високу чистоту отриманої гетероструктури, що має першочергове значення для роботи квантової електроніки та кріоелектроніки.

Враховуючи перспективність синтезованої гетероструктури та переваги технології синтезу, існує значний потенціал для подальших досліджень. Майбутня робота може бути зосереджена на вдосконаленні контролю над морфологією наноструктури, детальнішому вивченні ефектів зміни електрохімічних параметрів і поширенні методу на інші напівпровідникові системи III-V. Дослідження інтеграції синтезованих

гетероструктур у конфігурації «система-на-чипі» та «система-в-пакеті» також може бути дуже корисним, як і дослідження їхнього потенціалу в нових галузях, таких як гнучка електроніка та графенові пристрої, де взаємозв'язки та функціональна інтеграція з різних матеріалів є ключовими.

Підсумовуючи, наноструктурована гетероструктура AlGaAs/GaAs, синтезована за допомогою електрохімічного осадження, є цінним доповненням до галузі сучасних електронних матеріалів. Її технологія синтезу пропонує простоту та економічну ефективність, життєво важливу для практичного застосування. Сумісність матеріалу з широким спектром електронних додатків і потенціал для подальших досліджень роблять його переконливою темою для вивчення в ширшому контексті розвитку розумних технологій.

Висновки

1. На основі аналізу сучасних наукових джерел встановлено, що гетероструктури AlGaAs/GaAs є одним із базових матеріальних платформ для оптоелектроніки та фотоніки завдяки керованій зонній структурі, високій якості гетеромежі та сприятливим оптичним властивостям. Показано, що поряд із традиційними епітаксійними методами актуальними є альтернативні невакуумні підходи, зокрема електрохімічні, які дозволяють формувати наноструктуровані поверхневі шари.

2. Реалізовано електрохімічний метод синтезу гетероструктури AlGaAs/GaAs із використанням попередньо підготовлених монокристалічних підкладок GaAs n-типу провідності. Запропонований підхід забезпечує формування наноструктурованого шару AlGaAs без застосування складного вакуумного обладнання та характеризується технологічною простотою й відтворюваністю.

3. За результатами скануючої електронної мікроскопії встановлено, що поверхня гетероструктури має розвинену наноструктуровану морфологію з кристалітами нерегулярної форми, рівномірно розподіленими по поверхні GaAs. Така морфологія створює передумови для модифікації оптичних властивостей матеріалу за рахунок збільшення ефективної поверхні та прояву квантово-розмірних ефектів.

4. Аналіз елементного складу методом EDX показав, що поверхневий шар гетероструктури містить миш'як, галій та алюміній у співвідношеннях, характерних для змішаного шару AlGaAs/GaAs. Домінування миш'яку та наявність галію й алюмінію підтверджують формування гетероструктури та свідчать про часткове міжшарове змішування в приповерхневій області.

5. Раманівська спектроскопія виявила характерні фононні моди, притаманні сполукам GaAs та AlGaAs, що підтверджує збереження

кристалічної структури основного матеріалу та формування шару AlGaAs. Зміни положення та інтенсивності спектральних ліній свідчать про вплив складу та можливих напружень у приповерхневому шарі.

6. Дослідження фотолюмінесцентних властивостей гетероструктури показало наявність інтенсивного випромінювання, пов'язаного з міжзонними переходами та рекомбінаційними процесами за участю поверхневих і міжфазних станів. Спектральні особливості ФЛ підтверджують вплив наноструктурованої морфології та складу AlGaAs на оптичні властивості системи.

7. Узагальнення результатів морфологічних, елементних і спектроскопічних досліджень дозволяє зробити висновок, що електрохімічно сформована гетероструктура AlGaAs/GaAs характеризується поєднанням структурної цілісності та модифікованих оптичних властивостей, що є перспективним для застосування в оптоелектронних і фотонних пристроях.

8. Отримані результати підтверджують доцільність використання електрохімічних методів для формування гетероструктур AlGaAs/GaAs і можуть бути використані як основа для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію складу, морфології та функціональних характеристик матеріалу.

Список використаних джерел:

1. E. Mobini, D. H. G. Espinosa, K. Vyas, and K. Dolgaleva, “AlGaAs Nonlinear Integrated Photonics”, *Micromachines*, vol. 13, no. 7, p. 991, 2022. <https://doi.org/10.3390/mi13070991>
2. X. Zhu et al., “Enhancing Performance of a GaAs/AlGaAs/GaAs Nanowire Photodetector Based on the Two-Dimensional Electron–Hole Tube Structure”, *Nano Lett.*, vol. 20, no. 4, pp. 2654–2659, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c00232>
3. N. A. Kalyuzhnyy et al., “Photovoltaic AlGaAs/GaAs devices for conversion of high-power density laser (800–860 nm) radiation”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 262, p. 112551, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112551>
4. L. Chang et al., “Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators”, *Nature Commun.*, vol. 11, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15005-5>
5. S. May, M. Clerici, and M. Sorel, “Supercontinuum generation in dispersion engineered AlGaAs-on-insulator waveguides”, *Scientific Rep.*, vol. 11, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81555-3>
6. P. Paramasivam, N. Gowthaman, and V. M. Srivastava, “Self-consistent Analysis for Optimization of AlGaAs/GaAs Based Heterostructure”, *J. Elect. Eng. & Technol.*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42835-023-01721-7>
7. W. Xie et al., “Ultrahigh-Q AlGaAs-on-insulator microresonators for integrated nonlinear photonics”, *Opt. Exp.*, vol. 28, no. 22, p. 32894, 2020. <https://doi.org/10.1364/oe.405343>
8. A. Aho et al., “Wide spectral coverage (0.7–2.2 eV) lattice-matched multijunction solar cells based on AlGaInP, AlGaAs and GaInNAsSb materials”, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, 2021. <https://doi.org/10.1002/pip.3412>
9. Y. Suchikova, S. Kovachov, A. Lazarenko, and I. Bohdanov, “Research of synthesis conditions and structural features of heterostructure AlXGa1-

XAs/GaAs of the “desert rose” type”, *Appl. Surf. Sci. Advances*, vol. 12, p. 100327, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100327>

10. D. Baretin et al., “Direct Band Gap AlGaAs Wurtzite Nanowires”, *Nano Lett.*, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c04184>

11. G. Boras et al., “Self-Catalyzed AlGaAs Nanowires and AlGaAs/GaAs Nanowire-Quantum Dots on Si Substrates”, *J. Physical Chemistry C*, vol. 125, no. 26, pp. 14338–14347, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c03680>

12. A. Mukherjee, D. Ren, P.-E. Vullum, J. Huh, B.-O. Fimland, and H. Weman, “GaAs/AlGaAs Nanowire Array Solar Cell Grown on Si with Ultrahigh Power-per-Weight Ratio”, *ACS Photon.*, vol. 8, no. 8, pp. 2355–2366, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.1c00527>

13. Y. Suchikova, S. Kovachov, and I. Bohdanov, “Formation of oxide crystallites on the porous GaAs surface by electrochemical deposition”, *Nanomaterials Nanotechnol.*, vol. 12, p. 184798042211273, 2022. <https://doi.org/10.1177/18479804221127307>

14. L. Alt, C. Reichl, M. Berl, W. Dietsche, and W. Wegscheider, “Gate induced quantum wires in GaAs/AlGaAs heterostructures by cleaved edge deposition”, *Scientific Rep.*, vol. 11, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01130-8>

15. Z. T. Karipbayev et al., “Optical, Structural, and Mechanical Properties of Gd₃Ga₅O₁₂ Single Crystals Irradiated with 84 Kr⁺ Ions”, *Phys. Status Solidi (B)*, p. 2100415, 2022. <https://doi.org/10.1002/pssb.202100415>

16. A. Usseinov et al., “Ab-Initio Calculations of Oxygen Vacancy in Ga₂O₃ Crystals”, *Latvian J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 58, no. 2, pp. 3–10, 2021. <https://doi.org/10.2478/lpts-2021-0007>

17. Y. Suchikova, A. Lazarenko, S. Kovachov, A. Usseinov, Z. Karipbaev, and A. I. Popov, “Formation of porous Ga₂O₃/GaAs layers for electronic devices”, in *2022 IEEE 16th Int. Conf. Adv. Trends Radioelectronics, Telecommun. Comput. Eng. (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, Feb. 22–26, 2022. IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/tcset55632.2022.9766890>

18. Y. Suchikova, S. Kovachov, I. Bohdanov, E. Popova, A. Moskina, and A. Popov, "Characterization of Cd_xTeyOz/CdS/ZnO Heterostructures Synthesized by the SILAR Method", *Coatings*, vol. 13, no. 3, p. 639, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13030639>
19. S. Bietti, F. B. Basset, A. Tuktamyshev, E. Bonera, A. Fedorov, and S. Sanguinetti, "High-temperature droplet epitaxy of symmetric GaAs/AlGaAs quantum dots", *Scientific Rep.*, vol. 10, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62248-9>
20. Y. A. Suchikova, V. V. Kidalov, and G. A. Sukach, "Influence of dislocations on the process of pore formation in n-InP (111) single crystals", *Semiconductors*, vol. 45, no. 1, pp. 121–124, 2011. <https://doi.org/10.1134/s1063782611010192>
21. S. Yana, "Porous indium phosphide: Preparation and properties," in *Handbook of Nanoelectrochemistry: Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques*, 2016, pp. 283–306.
22. Y. A. Sychikova, V. V. Kidalov, and G. A. Sukach, "Dependence of the threshold voltage in indium-phosphide pore formation on the electrolyte composition", *J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron Neutron Techn.*, vol. 7, no. 4, pp. 626–630, 2013. <https://doi.org/10.1134/s1027451013030130>
23. R. Jafari Jam et al., "Embedded sacrificial AlAs segments in GaAs nanowires for substrate reuse", *Nanotechnology*, vol. 31, no. 20, p. 204002, 2020. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab7680>