

ВІДГУК

Офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету Білинського Ігоря Васильовича на кваліфікаційне дослідження *«Теорія електронних станів та електрон-фононної взаємодії у структурних елементах квантових каскадних детекторів»* Верешко Євгенії Юріївни, яка здобуває науковий ступінь доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Актуальність теми виконаної роботи.

Після створення перших квантових каскадних лазерів і детекторів (біля 20 років тому) кількість експериментальних робіт, у яких вивчалися фізичні процеси в наноприладах, щорічно збільшується. Незважаючи на високу вартість створення квантових каскадних лазерів і детекторів, їх ексклюзивні фізико-технічні характеристики постійно приваблюють увагу дослідників з метою вивчення умов покращення функціонування й оптимізації робочих параметрів цих наноприладів. Головна перевага квантових каскадних лазерів і детекторів перед подібними приладами, що працюють на інших принципах, не лише у тому, що вони повністю перекривають весь актуальний інфрачервоний діапазон шкали електромагнітних хвиль, а й у тому, що вони винятково компактні, споживають дуже малі струми та стійкі у роботі, навіть при кімнатній температурі. Основне завдання конструювання квантових каскадних лазерів і детекторів – правильний підбір розмірів шарів-ям і шарів-бар'єрів, які є робочими елементами каскадів цих наноприладів, щоб вони працювали у потрібній області частот електромагнітного поля. Оптимальний вибір геометричного дизайну повинна забезпечити теорія електронного транспорту крізь відкриті наносистеми. Незважаючи на інтенсивні експериментальні дослідження, відсутня повна та послідовна теорія фізичних процесів у ККД. У більшості теоретичних робіт досліджуються лише електронні спектральні характеристики та фотоактивний транспорт через

ізотропні та анізотропні елементи нанопристроїв. Фононна підсистема в цих роботах не враховується. Отже, побудова адекватної теорії спектра електронів і транспортних властивостей відкритих багат шарових резонансно-тунельних системах у зовнішніх постійних і високочастотних полях, як базових елементах наноприладів – безумовно **актуальне** завдання, яке виконане у даній кваліфікаційній роботі.

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

Напрямок дослідження відповідає програмі наукової тематики кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Дослідження спектрів квазічастинок, перенормованих взаємодіями з електромагнітними та квантованими полями в низько розмірних і 3d системах із метою оптимізації параметрів наноприладів» (номер Держреєстрації 0116U004083, 2016-2020pp.) та «Квантова теорія фізичних явищ і процесів у низьковимірних системах різної симетрії як основних елементах сучасних наноприладів» (номер Держреєстрації 0121U109823, 2021-2025pp.).

Нові факти, отримані здобувачем та їх **наукова новизна** полягають в тому, що:

- Дисертантка запропонувала модель каскаду широкопasmового ККД далекого ІЧ діапазону з двоямною активною зоною та шестиямним екстрактором. Виконала квантово-механічний розрахунок спектральних параметрів такої системи і показала, що за довільних температур основний внесок у перенормування електронних станів зумовлений взаємодією з гілками високоенергетичної смуги інтерфейсних фононів, а вплив обмежених фононів виявляється на порядок меншим.
- На основі розвиненої теорії електронних станів у наноструктурі закритого типу з довільною кількістю каскадів самостійно виконала розрахунок, енергетичного спектру електрона з квазідискретними смугами у багатокаскадній наносистемі. Вперше виявила, що кількість рівнів у ній дорівнює кількості каскадів.

- Самостійно досліджено еволюцію резонансних енергій та резонансних ширин квазістаціонарних станів електрона у відкритих багатокаскадних резонансно-тунельних наносистемах від товщин внутрішніх каскадів і міжкаскадних потенціальних бар'єрів. Вперше виявила такі конфігурації, за яких структуру можна вважати закритою.
- Приймала активну участь у обговоренні, постановці та розробці нових підходів і методів розв'язання задач. Виконувала аналіз отриманих результатів формуючи обґрунтовані висновки.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена тим, що матеріали дисертації опубліковані у високореєтингових міжнародних журналах, які рецензуються фаховими науковцями. До розв'язання задач застосовувалися сучасні потужні методи теоретичної фізики. Коректність висновків та рекомендацій базуються на аналітичній перевірці задач, які розв'язуються точно, а розв'язані наближеними методами – перевірені на збіжність і несуперечливість фізичним міркуванням та основним принципам. Професійних огляд наукової літератури з усіх тем дослідження та рівень їх розв'язання свідчать про те, що дисертантка повністю володіє необхідною методологією наукового дослідження.

Наукове і практичне значення роботи полягає в тому, що:

- ✓ Знайдені геометричні конфігурації двоямної активної зони ККД далекого ГЧ-діапазону, за яких виявлений ефект найбільше проявляється і може впливати на ефективність функціонування наноприладу.
- ✓ Запропонована теорія електронних станів у багатокаскадних наносистемах виявила неоднорідні розподіли густин імовірностей знаходження електрона у різних каскадах структури, що може бути однією з причин низької ефективності переважної більшості експериментальних ККД.
- ✓ Розвинені теорії стаціонарних і квазістаціонарних станів електрона у багатокаскадних наносистемах, які дозволяють оцінити енергії та часи життя електронних станів, а також інтенсивності квантових переходів,

можуть бути важливі у задачах про оптимізацію дизайнів каскадів ККД з метою підвищення їх ефективності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність. Кваліфікаційна робота Верешко Є. Ю. має загальний обсяг 185 сторінок машинописного тексту та структурно складається з анотацій двома мовами, списку опублікованих праць автора, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (193 позицій) і Додатку (список публікацій здобувачки за темою дисертації).

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми кваліфікаційного дослідження, вказано його зв'язок з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету і завдання роботи, висвітлено її наукове та практичне значення, наведено інформацію про публікації й особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи, її структуру й обсяг.

Перший розділ присвячений огляду наукової літератури, а саме як експериментальним, так і теоретичним дослідженням квантових каскадних детекторів. Крім аналізу експериментально створених квантових каскадних детекторів інфрачервоного та терагерцового діапазонів, звернута увага на оптимізацією геометричного дизайну каскадів, через підбір нових систем напівпровідникових матеріалів. Вивчено основні теоретичні підходи і методи дослідження. Вказано, що у працях цього напрямку, як правило, дослідження виконуються або на основі спрощеної моделі окремої області каскаду, або у підході ідеалізованої нескінченної надґратки.

Вивчення одночасного впливу всіх гілок обмежених та інтерфейсних фононів на спектральні характеристики електронних станів при побудові квантово-механічної теорії електрон-фононної взаємодії у багат шаровій наноструктурі як каскаді квантового каскадного детектора присвячений **другий** розділ. На прикладі восьмиймної наноструктури GaAs/Al_{0.33}Ga_{0.67}As як каскаду експериментального широкосмугового ККД далекого ІЧ-діапазону з двоямною активною зоною досліджено еволюцію енергій електронних станів, перенормованих взаємодією зі всіма гілками обмежених

та інтерфейсних фононів, залежно від товщини потенціального бар'єра в активній зоні при зміні температури у широкому інтервалі від криогенної до кімнатної. Отримані результати дозволили не лише встановити ступінь узгодження теоретичної моделі з експериментом, але й виявити фізичні ефекти, зумовлені електрон-фононною взаємодією.

У **третьому** розділі розглядається побудова теорії стаціонарних станів електрона і сил осциляторів квантових переходів у закритій багатокаскадній наносистемі як основному структурному елементі квантового каскадного детектора та досліджуються властивості спектральних характеристик наносистеми, сформованих оптичними переходами між електронними станами. На основі розвиненої теорії досліджено властивості електронних станів і сил осцилятора квантових переходів у багатокаскадному основному структурному елементі експериментального квантового каскадного детектора, що дозволило виявити особливості формування смуги поглинання приладу у далекій ІЧ-області. Здійснено порівняльний аналіз еволюції властивостей електронних станів залежно від кількості каскадів і від їх геометричної конфігурації у закритій та надгратковій моделях.

У **четвертому** розділі у наближенні ефективних мас і прямокутних потенціалів із застосуванням методу трансфер-матриці отримані точні аналітичні вирази для S-матриці розсіювання, функції розподілу густини ймовірності та коефіцієнта прозорості у відкритій багатокаскадній резонансно-тунельній наноструктурі, що дозволило розвинути у трьох підходах теорію спектральних характеристик (резонансних енергій та резонансних ширин) квазістаціонарних станів електрона у багатокаскадному елементі квантового каскадного детектора.

Кваліфікаційна наукова праця Верешко Є. Ю. чітко структурована, здобувач логічно систематизувала матеріал, що дозволило створити цілісну модель дослідження. Авторка кожен розділ будує так, щоб комплексно висвітлити його тематику. Наукова праця містить ґрунтовні висновки,

співвідносними з поставленими завданнями. Висновки підтверджують одержані результати та авторський підхід до розв'язання порушених питань.

Дисертаційні положення та побажання щодо вдосконалення змісту дисертації. Позитивно оцінюючи отримані результати дослідження, їх наукову новизну та практичну значущість, водночас, вважаю за доцільне звернути увагу на деякі аспекти.

1. У дисертації обчислення проводилися для конкретних гетероструктур (наприклад GaAs-ямами та $Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ -бар'єрами або $In_{0.52}Ga_{0.48}As$ -ямами та $In_{0.53}Al_{0.47}As$ -бар'єрами), очевидно взятих з експериментальних досліджень. Вибором концентрації алюмінію визначається потенціальний рельєф як бар'єрів так і ям. Було б цікавим вивчити при яких конкретних значеннях концентрації чи алюмінію чи індію отримаємо деякий новий структурний елемент, який певним чином вплине на отримані висновки. Тому виникає запитання: чи не можна здійснити ще більше узагальнення і побудувати найзагальнішу теорію, варіюючи не лише розміри потенціальних ям, та відстані між бар'єрами екстрактора, але й матеріали як ями так і бар'єру для забезпечення ефективного фонон-супровідного тунелювання електронів між активними зонами каскадів.
2. У дисертаційній роботі вивчалася взаємодія електрона з фононами різного типу. Як відомо на квантово-механічні стани зарядів досить суттєво впливають електрон-деформаційний (особливо для неоднорідно-деформованої гетеромежі гетероситеми індію та галію), поляризаційний, домішковий потенціали. Якщо так, то яких змін у властивостях перенормованих спектрів варто очікувати.
3. Як видно з дисертаційного дослідження аналітичні розрахунки розвиненої теорії досить складні. Бажаним виглядає вказати у тексті дисертації основні параметри розрахунків, виконуваних на основі кожної з теорій: яке програмне забезпечення використовувалось (власне чи сертифіковане), числові методи (можливо і сам програмний код, що ще більше переконало б опонента у правильності отриманих результатів), причому деякі масивні

розрахунки, що мають загальний характер можна було б розмістити у додатках.

Відсутність порушення академічної доброчесності. Кваліфікаційне дослідження є самостійною науковою працею автора. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують наукову новизну кваліфікаційного дослідження, одержані автором особисто. При використанні праць інших вчених для аргументації актуальних положень дослідження обов'язково вказано посилання на відповідні праці.

Загальний висновок. Кваліфікаційна наукова робота Верешко Євгенії Юріївни «Теорія електронних станів та електрон-фононої взаємодії у структурних елементах квантових каскадних детекторів» за актуальністю, науковою новизною, загальним переліком отриманих результатів, а також їх взаємозв'язком та повнотою їх викладу в журнальних публікаціях та апробацією цілком відповідає вимогам “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 року №44 зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №341 від 21 березня 2022 року, а також “Вимогам до оформлення дисертації”, затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 року, а авторка кваліфікаційної наукової роботи Верешко Євгенія Юріївна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри фізики та методики її навчання
Криворізького державного
педагогічного університету



Ігор Білінський