

Рецензія

на дисертаційне дослідження Верешко Євгенії Юріївни
*«Теорія електронних станів та електрон-фононої взаємодії у структурних
елементах квантових каскадних детекторів»*,
подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі
науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність дисертаційного дослідження

Дослідження теорії електронних станів та електрон-фононої взаємодії в структурних елементах квантових каскадних детекторів має ключове значення для поліпшення їхньої ефективності, чутливості та спектрального діапазону. Квантові каскадні детектори (ККД) знаходять широке застосування у різних областях науки, промисловості та оборони завдяки їхнім унікальним властивостям. Основні сфери застосування ККД включають: оптичні комунікації, медична діагностика, астрономія, забезпечення безпеки шляхом детектування небезпечних речовин, військові застосування. ККД можуть використовуватися для контролю якості продукції, де потрібно дослідження матеріалів і деталей на мікро- та нанорівнях, а також для багатьох наукових досліджень у фізиці, хімії, матеріалознавстві та інженерії.

Теоретичні дослідження у цій області сприяють розробці ККД покращеної конструкції, яка матиме необхідні для практичного застосування характеристики: більшу чутливість та необхідний спектр детектування. Це сприятиме розширенню застосувань квантових каскадних детекторів.

У дисертації досліджено перенормування оптичними фононами енергетичного спектра електрона у багатошаровому каскаді експериментального квантового каскадного детектора та виявлені такі особливості, які можуть впливати на робочі характеристики наноприладу. Запропоновано дизайн каскаду квантового каскадного детектора далекого ІЧ діапазону з оптимізованими активною областю та екстрактором. У реалістичних моделях багатокаскадних наноструктур розвинено теорії стаціонарних і квазістаціонарних станів електрона та на їх основі досліджено властивості спектральних характеристик багатокаскадних елементів квантових каскадних детекторів.

Практична цінність роботи

У даній роботі теоретичні дослідження виконуються в рамках реалістичної багатокаскадної моделі, яка на відміну від існуючих теорій, базованих на простій моделі окремого каскаду, дає важливі практичні рекомендації для дорогих експериментальних досліджень квантових каскадних детекторів. Дисертацію можна віднести до переліку тих робіт, які сприяють розширенню розуміння цілісної картини фізики квантових каскадних детекторів, а її результати, які отримані в реалістичних моделях, можуть бути

використані при конструюванні нових та оптимізації існуючих зразків наноприладів з нанорозмірними багатошаровими робочими елементами.

Розвинені у дисертаційному дослідженні підходи та методи, при належній модифікації, можуть бути використані для побудови теорії спектрів квазічастинок у багатошарових та багатокаскадних наноструктурах різних розмірностей.

Загальні теоретичні положення та висновки дисертації можуть бути використані у навчальному процесі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформованих у дисертації

Наукові положення, які представлені в дисертаційній роботі, є добре обґрунтованими, а також належно висвітлені у відповідних розділах дисертації. Основні результати, отримані здобувачем та винесені на захист, цілком відповідають меті та завданням роботи, обговорювалися на наукових семінарах кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання ННІФТКН, міжнародних конференціях й опубліковані у фахових виданнях України та зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Достовірність отриманих результатів і висновків обґрунтована застосуванням добре апробованих теоретичних методів розрахунку дисперсійних рівнянь для енергій електронів і фононів, сил осцилятора квантових переходів, S-матриці розсіювання, функції густини ймовірності та коефіцієнта прозорості, а також задовільним узгодженням теоретичних та експериментальних результатів.

При підготовці дисертації Верешко Є.Ю. опрацювала велику кількість фахової іноземної та української літератури. Це статті у високореєтингових журналах та книгах, що наведені у списку використаних джерел.

Наукова новизна

Основні наукові результати, які представлені в дисертаційній роботі Верешко Є.Ю. і складають наукову новизну, є такими:

- Розвинена теорія електрон-фононної взаємодії у каскаді квантового каскадного детектора дозволила виявити умови, за яких величини зміщень та затухань електронних станів, зумовлені взаємодією з оптичними фононами, різко зростають.
- Запропонована теорія електронних станів у багатокаскадних наносистемах закритого типу та з потенціалом Кроніґа-Пенні. Виявлено, що на відміну від безмежної періодичної структури, у закритій наносистемі скінченних розмірів для електрона характерні неоднорідні розподіли густин ймовірностей знаходження у різних каскадах структури, що може бути однією з причин низької ефективності переважної більшості експериментальних квантових каскадних детекторів.

- На основі аналітично розрахованих S-матриці розсіювання, функції густини ймовірності та коефіцієнта прозорості у трьох підходах розвинено теорію спектральних характеристик квазістаціонарних станів електрона у відкритій багатокаскадній наноструктурі. Досліджено еволюцію резонансних енергій та резонансних ширин квазістаціонарних станів електрона у залежності від товщин внутрикаскадних і міжкаскадних бар'єрів.

- Розвинені теорії стаціонарних та квазістаціонарних станів електрона у багатокаскадних наноструктурах, що дозволяють оцінити спектральні характеристики електронних станів, енергії та інтенсивності квантових переходів, можуть бути важливі у задачах про оптимізацію дизайнів каскадів квантових каскадних детекторів з метою підвищення ефективності їх функціонування.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Обраний напрям 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) та «Квантова теорія фізичних явищ і процесів у низьковимірних системах різної симетрії як основних елементах сучасних наноприладів» (номер Держреєстрації 0121U109823).

Структура і зміст дисертації

Дисертаційне дослідження складається з вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку зі списком праць.

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

У першому розділі виконано огляд наукової літератури, присвяченої експериментальним та теоретичним дослідженням квантових каскадних детекторів. Розглянуті основні теоретичні підходи і методи дослідження фотон- та фонон-супровідного тунелювання електронів крізь структурні елементи квантових каскадних детекторів.

Другий розділ присвячений побудові квантово-механічної теорії електрон-фононної взаємодії у багат шаровій наноструктурі, як каскаді квантового каскадного детектора, та вивченню малодослідженого одночасного впливу всіх гілок обмежених та інтерфейсних фононів на спектральні характеристики електронних станів.

Третій розділ присвячений побудові теорії стаціонарних станів електрона і сил осциляторів квантових переходів у закритій багатокаскадній наносистемі та дослідженню властивостей спектральних характеристик багатокаскадних структурних елементів квантових каскадних детекторів.

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 квазістаціонарних станів електрона у багатокаскадному елементів квантового каскадного детектора.

У висновках наведено основні результати, які складають наукову новизну. Список використаних джерел складає 193 позицій.

Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані автором

Основні положення і висновки дисертаційної роботи викладені у 7 наукових працях. Зокрема, всі вони індексовані у Scopus (дві Q=3, чотири Q=4), а 2 з них і в Web of Science. Матеріали дисертації доповідалися на міжнародних наукових конференціях, за результатами яких опубліковано 8 тез доповідей. Основні результати дисертації повною мірою викладені в зазначених публікаціях.

Це свідчить про те, що дисертаційна робота є самостійним завершеним науковим дослідженням, результати якого мають важливе значення для розвитку послідовної теорії властивостей нанорозмірних структурних елементів квантових каскадних детекторів.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

У дисертації та наукових публікаціях Верешко Є.Ю. відсутні порушення академічної доброчесності.

Зауваження до дисертації

1. В таблиці 2.1 наведено сили осцилятора квантових переходів з робочих станів 1 і 2 в усі збуджені стани. При цьому силу осцилятора квантового переходу між робочими станами 1 і 2 не наведено. Така інформація була б не зайвою, хоча б для перевірки правила сум Томаса-Райхе-Куна.

2. На рисунку 2.2 наведено енергетичний спектр наносистеми та розподіли ймовірностей знаходження електрона у каскаді ККД, які зображені схематично над відповідними енергетичними рівнями. Для пояснення цього рисунку використано фразу: «розподіли ймовірностей знаходження електрона у каскаді ККД нормовані на величини енергій відповідних станів», яка заплутує читача.

3. У формулі (2.9) використовується усереднена ефективна маса у станах n та n' , але в тексті дисертації не вказано як проводиться дане усереднення.

4. У першому розділі у формулах (1.1) та (1.16) напруженість електричного поля електромагнітної хвилі позначена різними буквами.

Зазначені зауваження не впливають на висновок про високий науковий рівень дисертаційного дослідження та його загальну позитивну оцінку.

Загальний висновок

Дисертаційна робота виконана на високому теоретичному рівні, матеріал дисертації викладено в логічній послідовності, він супроводжується великою кількістю табличних та графічних даних, які детально відображають результати проведених досліджень. Аналіз представлених даних глибоко розкриває сутність фізичних явищ та процесів, що, сприяє більш глибокому розумінню предмету дослідження. Усі сформульовані висновки отримали необхідну і достатню теоретичну аргументацію та є методологічно обґрунтованими.

Дисертаційна робота Верешко Євгенії Юріївни «Теорія електронних станів та електрон-фононої взаємодії у структурних елементах квантових каскадних детекторів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв'язанням проблеми, практичним значенням отриманих результатів, системністю викладення відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядком 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 від 12 січня 2022р. №44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №431 від 21.03.2022р.).

Вважаю, що Верешко Євгенія Юріївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Рецензент

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри термоелектрики та медичної фізики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ

Підпис *Головацького В.А.* засвідчую
Начальник відділу кадрів Чернівецького
національного університету
імені Юрія Федьковича
" 15 " 08 2023 р

