

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу БОЙКА Ігоря Володимировича «Теорія електронних процесів та взаємодії електронів з акустичними фононами у арсенідних та нітридних напівпровідникових наноструктурах», представленої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика

Актуальність теми дослідження

Дисертація Бойка Ігоря Володимировича присвячена теоретичному дослідженню електронних процесів і взаємодії електронів із акустичними фононами в багат шарових арсенідних та нітридних резонансно-тунельних структурах (РТС). Такі структури є основою сучасних нанопристроїв, включаючи квантові каскадні лазери (ККЛ), детектори (ККД) та інші оптоелектронні системи. Одночасне урахування ефектів розмірного квантування та механізмів взаємодії електронів із фононами є критично важливим для розробки високоефективних і стабільних наноприладів.

Робота зосереджується на дослідженні впливу різних фізичних чинників на електронні спектральні параметри, тунельний струм і взаємодію електронів із акустичними фононами. Важливість теми підтверджується тим, що такі процеси значно впливають на функціональні характеристики нанопристроїв. Запропоновані автором методи й аналітичні моделі дають можливість розробляти наноструктури з прогнозованими властивостями, оптимізуючи їх для роботи в різних умовах.

Значущість теми підкреслюється необхідністю вдосконалення методів мультичастотної генерації, оптимізації конструкцій РТС та аналізу впливу температурних і фізичних чинників на їхні характеристики. Запропоновані автором аналітичні моделі дозволяють не лише поглибити фундаментальне розуміння фізичних явищ у наноструктурах, але й сприяють розв'язанню практичних задач, пов'язаних із підвищенням ефективності нанопристроїв. З огляду на перспективи використання таких структур в оптоелектроніці, телекомунікаціях і приладах для квантових обчислень, результати роботи є надзвичайно важливими як для фундаментальної науки, так і для практичних застосувань.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя. Результати, які викладено в наукових працях, опублікованих на під час виконання досліджень, отримані в результаті виконання таких держбюджетних тем: “Квантова теорія електронного тунелювання крізь анізотропні резонансно-тунельні наноструктури” (№ держреєстрації 0117U001151), “Моделювання тепломасопереносу та адсорбції вуглеводнів в нанопористих цеолітних катализаторах систем нейтралізації відпрацьованих газів” (№ держреєстрації 0116U004744), “Високопродуктивні суперкомп'ютерні

технології ідентифікації нейро-біо- та нанопористих систем з когнітивними і зворотніми зв'язками ”(№ держреєстрації 0119U001324), “Методи та високопродуктивні технології математичного моделювання і функціональної ідентифікації складних багатокомпонентних систем і процесів (нанопористі і нанорозмірні структури, об’єкти безпечної енергетики, когнітивні системи)” (№ держреєстрації 0122U001979).

Структура і зміст роботи

Обсяг дисертації становить 474 сторінки, із яких основний текст — 407 сторінок. Вона складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. У вступі автор чітко формулює мету і завдання дослідження, обґрунтовує актуальність теми, окреслює наукову новизну та практичне значення роботи.

Кожен із розділів основної частини містить теоретичну частину, чисельні розрахунки, аналіз результатів та висновки. Наведу короткий опис змісту кожного розділу.

У *першому розділі* побудовано квантово-механічну теорію електронних процесів у резонансно-тунельних структурах, орієнтованих на мультиспонтну генерацію електромагнітного поля. Детально проаналізовано внесок двофотонних переходів, що досягає 37–38% сумарної величини провідності. Запропоновано методи для визначення конфігурацій наносистем із можливістю ефективною лазерної генерації.

Другий розділ присвячено вивченню впливу просторового заряду на електронні процеси. Розроблено квантову теорію динамічної провідності, враховуючи взаємодію електронів із електромагнітними полями. Виконано самоузгоджений розв'язок рівнянь Шредінгера і Пуассона для різних концентрацій носіїв заряду. Виявлено, що висока концентрація електронів змінює форму провідності, а максимуми прозорості спектру зміщуються у високоенергетичну область.

У *третьому розділі* розглядаються нітридні багат шарові структури. Автором запропоновано новий аналітичний метод для розрахунку потенціальних профілів і спектральних характеристик. Зокрема, досліджено геометричні конфігурації каскадів, які забезпечують максимальну інтенсивність квантових переходів. Цей метод має значні переваги перед числовими підходами, забезпечуючи швидшу збіжність до заданої точності.

Четвертий розділ зосереджено на математичному описі акустичних фононів у багат шарових структурах AlN/GaN та AlAs/GaAs. Побудовано теорію поперечних, флексуральних і ділататіональних мод акустичних фононів. Установлено зв'язок спектру фононів із геометрією наносистеми, а також вплив швидкостей поширення хвиль на спектральні характеристики.

У *п'ятому розділі* розвинено аналітичну теорію взаємодії електронів із акустичними фононами. Досліджено механізми температурного зсуву енергетичних рівнів електронів, викликаних як деформаційним, так і

п'єзоелектричним потенціалами. Показано, що ці ефекти значно впливають на динамічну провідність приладів, особливо за підвищених температур.

Шостий розділ присвячено теорії тунельного транспорту електронів у багат шарових системах із впливом акустичних фононів і мультичастотних електромагнітних полів. Вперше використано варіаційний метод для аналізу залежних від часу процесів. Показано, як зміна індукції магнітного поля дозволяє керувати енергіями електронних переходів і ширинами спектральних смуг.

У *сьомому розділі* досліджено екситонні стани в плоских багат шарових структурах. Побудовано аналітичну теорію взаємодії екситонів із фононами за різних температур. Встановлено закономірності температурного зсуву і перенормування спектру екситонів, а також показано домінування ефектів у структурах типу вюрциту.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

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, обговорювались на наукових семінарах, міжнародних конференціях та опубліковані у зарубіжних високореєтингових фахових виданнях. Достовірність отриманих результатів ґрунтується на використанні загальноприйнятих теоретичних підходів та методів досліджень та не викликає сумнівів. Під час виконання дисертаційного дослідження було проаналізовано велику кількість наукової літератури.

Наукова новизна

Дисертація пропонує низку фундаментальних результатів, що мають високу цінність:

- вперше побудовано аналітичну теорію мультичастотної генерації в резонансно-тунельних структурах;
- розроблено нову модель спектру акустичних фононів у нітридних структурах, включаючи вплив п'єзоелектричного ефекту;
- запропоновано методи для опису температурного зсуву енергетичних рівнів і згасання екситонів.

Практичне значення

Результати роботи мають безпосереднє прикладне значення:

1. Оптимізація конфігурації РТС для лазерів і детекторів із підвищеною ефективністю.
2. Можливість створення приладів із прогнозованими спектральними характеристиками для широкого температурного діапазону.
3. Використання мультичастотної генерації в сучасних оптоелектронних системах.

Зауваження

У процесі ознайомлення з дисертацією у мене виникли деякі запитання й зауваження, які наведено нижче:

1. Замість термінів "флексуральні" та "ділататональні" фонони доцільніше використовувати "згинові" та "розтягувальні" фонони. Термін "колапс рівнів", який використовується автором у дисертації, не зовсім адекватно відображає особливості енергетичного спектру квазічастинок у РТС. У науковій літературі частіше вживаються терміни "антикросинг" або "антиперетин рівнів".
2. Для визначення внеску двофотонного випромінення у динамічну провідність у порівнянні з однофотонним бажано обчислювати їх відносну різницю, поділяючи на однофотонну провідність. Такий показник більш точно характеризуватиме вклад двофотонного випромінення.
3. Потенціальні схеми на с.65 (рис. 1.5) та на с.109 (рис. 2.2) відповідають координатній залежності потенціальної енергії додатнього заряду при заданому напрямку напруженості електричного поля, хоча в тексті йде мова про електрон.
4. Не зовсім зрозуміло, чому для розв'язку рівнянь (1.39–1.40) було обрано підхід із лінійною апроксимацією ефективного потенціалу замість використання функцій Ейрі, якщо результати все одно отримуються числовим розрахунком. Кінцева формула є настільки складною, що переваги аналітичного виразу практично не можна реалізувати. Крім того, не вказано точність виконаних розрахунків і кількість розбиттів N , за яких ця точність досягалася.
5. Вигляд варіаційної функції екситона, поданий у формулі (7.18) на с.397, враховує сильну анізотропію, зокрема той факт, що розмірне квантування в напрямку осі Oz переважає енергію взаємодії електрона та дірки. У зв'язку з цим у показнику експоненти відсутня змінна z . Однак у випадку, коли потенціальна яма ширша за розміри екситона, така варіаційна функція може неточно описувати стан екситона. Необхідно більш чітко обґрунтувати вибір цієї варіаційної функції та зазначити межі її застосування.
6. В дисертації та авторефераті присутні описки, орфографічні та стилістичні помилки, перелік яких досить значний, але не впливає на їх зміст та наукову цінність результатів.

Однак дані зауваження не заперечують наукових результатів дисертації Бойка Ігоря Володимировича. Вони не впливають на висновок про високий науковий рівень дисертаційного дослідження, та його загальну позитивну оцінку.

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій

За результатами досліджень дисертантом опубліковано 42 публікації, з яких – 22 статей у наукових журналах, які індексуються в наукометричних базах даних Scopus та Web of Science Core Collection (7 статей Q1 та Q2; 9 статей Q3; 2 статті Q4), 4 статті – у наукових фахових періодичних виданнях України та 16 тез вітчизняних та міжнародних наукових конференцій, семінарів.

Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Представлені результати досліджень здобувачем в наукових працях та дисертації є новими та повністю відповідають вимогам академічної

доброчесності. Дисертант досить детально зазначив свій особистий внесок в публікаціях. Використані ідеї, теорії, методи, експериментальні та теоретичні результати і тексти інших авторів в наукових працях та дисертації мають посилання на відповідне джерело.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Бойка І.В. є завершеним науковим дослідженням, яке виконано автором самостійно на високому науковому рівні. У роботі дисертантом одержано багато нових результатів, які є достовірними та науково обґрунтованими, мають значний науковий та практичний інтерес. Тема та мета дисертаційної роботи відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота Бойка Ігоря Володимировича «Теорія електронних процесів та взаємодії електронів з акустичними фононами у арсенідних та нітридних напівпровідникових наноструктурах» за науковим рівнем, новизною та цінністю одержаних результатів і рекомендацій, а також значною кількістю профільних публікацій за темою дисертації, дотриманням принципів академічної доброчесності повністю відповідає вимогам Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197).

Автор дисертації, Бойко Ігор Володимирович, беззаперечно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

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



Головацький В.А.