

ВІДГУК

офіційного опонента

**Маханця Олександра Михайловича,
доктора фізико-математичних наук, професора,
професора кафедри термоелектрики та медичної фізики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
на дисертацію Бандури Галини Ярославівни**

на тему:

**«Електронні та діркові стани невзаємодіючих квантових точок та
їх впорядкованих масивів»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 10 «Природничі науки»
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»**

Актуальність дисертаційної роботи

Сучасний розвиток нанофізики, наноелектроніки та фотоніки зумовлює зростаючу потребу у глибокому теоретичному розумінні квантово-розмірних ефектів у напівпровідникових наноструктурах. Особливе місце серед таких об'єктів займають напівпровідникові квантові точки (КТ), у яких просторове обмеження носіїв заряду призводить до формування дискретного енергетичного спектра та їхніх унікальних електронних і оптичних властивостей.

Окрім ізольованих КТ, значний науковий і прикладний інтерес становлять впорядковані масиви (надгратки) КТ, у яких завдяки тунелюванню між сусідніми КТ формується мінізонна структура енергетичного спектра. Саме такі системи розглядаються як перспективна платформа для створення оптоелектронних приладів нового покоління, високоефективних сонячних елементів з проміжною зоною, фотодетекторів, терагерцових джерел та елементів квантових інформаційних технологій.

Водночас, незважаючи на значну кількість експериментальних та теоретичних робіт, у сучасній літературі залишається низка принципових невирішених питань. Зокрема, недостатньо розробленою є послідовна теорія діркових станів у квантових точках у рамках багатозонної теорії ефективної маси, яка б одночасно враховувала деформаційні ефекти та поляризацію на гетеромежі КТ–матриця. Також обмежено досліджено впорядковані масиви КТ із неоднорідним базисом, зокрема надгратки, що складаються з КТ різного розміру або матеріалу.

Саме на розв'язання цих фундаментальних проблем і спрямована дисертаційна робота Бандури Галини Ярославівни. Тематика дослідження є беззаперечно актуальною як з фундаментальної точки зору, так і з огляду на потреби сучасних прикладних розробок у галузі наноматеріалів та оптоелектроніки.

Актуальність обраного напрямку також підтверджується тісним зв'язком дисертаційної роботи з плановими науково-дослідними темами кафедри та університету, а також її відповідністю сучасним світовим тенденціям розвитку фізики квантових наноструктур.

Зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими планами, програмами, фундаментальними та прикладними дослідженнями

Дисертаційна робота відповідає науковим напрямкам діяльності кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка. Основні результати дослідження були отримані дисертанткою в межах реалізації наукових тем: “Фотополімерні матриці та наноносії при конструюванні біосенсорів для моніторингу стану довкілля та якості питної води”, “Вплив зовнішніх полів на синтез, сенсорні властивості квантових точок для медичних застосувань в умовах війни”, а також “Біонаноконплекси напівпровідникова квантова точка – протеїн для біомедичних

застосувань: синтез, дослідження, характеристика з використанням машинного навчання”.

У рамках перелічених наукових тем було проведено теоретичні дослідження електронних і діркових станів у ізольованих КТ та надгратках. Також ураховано вплив акцепторних домішок і зовнішніх електричних полів на енергетичні рівні дірки.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційна робота є завершеним теоретичним дослідженням, у якому всі наукові положення, висновки та узагальнення мають належний рівень обґрунтованості та достовірності.

Достовірність отриманих результатів забезпечується застосуванням комплексу сучасних і добре апробованих теоретичних методів, зокрема:

- однозонної та багатозонної теорії ефективної маси (моделі 4×4 та 6×6),
- теорії Латтінджера–Кона у сферичному наближенні Балдареші–Ліпарі,
- методу сильного зв'язку,
- методу плоских хвиль,
- точних розв'язків рівняння Шредінгера для моделей прямокутних потенціальних ям і бар'єрів.

Важливою перевагою роботи є комплексний підхід, який поєднує теоретичні аналітичні моделі з чисельними розрахунками та дозволяє простежити узгодженість результатів у граничних випадках. Отримані енергетичні спектри в ряді випадків переходять у відомі результати інших авторів, що додатково підтверджує коректність застосованих моделей.

Логічна послідовність викладу, чітка постановка задач та коректна інтерпретація фізичних результатів свідчать про високий рівень методологічної культури здобувачки.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

До основних результатів, отриманих уперше, слід віднести:

1. Розвинено багатозонну теорію діркових станів у сферичних КТ з одночасним урахуванням деформації та поляризації.
2. Встановлено умови компенсації деформаційних і поляризаційних ефектів у гетероструктурах.
3. Теоретично обґрунтовано вплив акцепторної домішки та зовнішнього електричного поля на симетрію діркових станів у КТ.
4. Побудовано мінізонну теорію для впорядкованих масивів КТ різної форми та вимірності.
5. Розвинуто теорію надґраток КТ з неоднорідним базисом та проведено аналіз їхніх спектральних властивостей.

Теоретична цінність і практична значущість результатів дисертаційного дослідження

Результати дисертаційної роботи мають суттєву теоретичну цінність для розвитку фізики напівпровідникових квантових наноструктур. У роботі послідовно розвинено та узагальнено підходи до опису електронних і діркових станів у КТ різної конфігурації, а також у впорядкованих масивах КТ з урахуванням міжточкової взаємодії, домішкових ефектів та впливу зовнішніх полів. Отримані результати поглиблюють розуміння механізмів формування енергетичних спектрів і мінізон у надґратках КТ та можуть бути використані як основа для подальших теоретичних досліджень у цій галузі.

Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблені теоретичні моделі та отримані числові результати можуть бути використані при проектуванні та оптимізації параметрів напівпровідникових наноструктур для сучасних оптоелектронних і фотонних пристроїв. Зокрема, результати роботи є корисними для прогнозування властивостей КТ і їх масивів у лазерах на КТ,

фотодетекторах, сонячних елементах з проміжною зоною, а також у квантових сенсорах і елементах квантових інформаційних технологій. Запропоновані підходи можуть бути безпосередньо використані у подальших прикладних дослідженнях та при інтерпретації експериментальних даних.

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертації опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на міжнародних і всеукраїнських конференціях, що свідчить про належний рівень апробації. Дисертаційне дослідження повністю відображає результати, що обліковані у наукових працях: 5 статей (4 з них індексуються у базі Scopus/Web of Science, 1 - у журналі категорії «Б») та 8 робіт, що є матеріалами всеукраїнських чи міжнародних конференцій.

Відсутність порушення академічної доброчесності

У дисертаційній роботі дотримано принципів академічної доброчесності: плагіату, фабрикацій та фальсифікацій не виявлено, усі використані літературні джерела коректно процитовано. Авторський внесок у публікаціях, виконаних у співавторстві, чітко визначено та належно зазначено.

Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам

Дисертаційне дослідження Бандури Галини Ярославівни, подане до розгляду, містить усі необхідні складові, зокрема: список умовних скорочень, вступ, п'ять основних розділів, висновки, перелік використаних джерел. Робота виконана українською мовою з дотриманням усіх вимог наукового стилю і норм. Матеріал подано послідовно й структуровано, при цьому чітко простежується логічний послідовний зв'язок між розділами.

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих наукових працях відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття

наукового ступеня доктора філософії, та визначені у «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 з усіма змінами.

Зауваження та дискусійні положення дисертації

Аналізуючи дисертаційну роботу виникають деякі питання і зауваження:

1. У деяких місцях дослідження доцільно було б чіткіше розмежувати область застосування однозонної та багатозонної моделей.

2. У роботі досліджено вплив нецентральної акцепторної домішки та довільно напрямленого електричного поля на енергетичний спектр дірки. Для кращого розуміння місця одержаних результатів серед наявних теорій доцільно було б порівняти результати з відповідними електронними станами у КТ з донорною домішкою й електричним полем.

3. Виникає запитання, а чи можна використовувати метод плоских хвиль до надгратки КТ, що містять декілька КТ в базисі?

4. У дисертації трапляються поодинокі граматичні та орфографічні неточності, які не впливають на змістовність викладеного матеріалу.

Наведені вище зауваження не мають принципового характеру та **жодним чином не впливають** на позитивну оцінку дисертаційної роботи і змістовність викладу матеріалу.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Бандури Галини Ярославівни «Електронні та діркові стани невзаємодіючих квантових точок та їх впорядкованих масивів», що подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та

наноматеріали», відзначається високим науковим рівнем, актуальністю, науковою новизною практичним значенням отриманих результатів і повнотою їх апробації. Робота відповідає вимогам, визначеним пунктами 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022, №502 від 19.05.2023 № 507 від 03.05.2024). Вважаю, що авторка цієї дисертаційної роботи, Бандура Галина Ярославівна, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри термоелектрики та
медичної фізики

Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Олександр МАХАНЕЦЬ