

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Чубрей Марини Віталіївни  
*«Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт  
поглинання світла в сферичних наноструктурах»*,  
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань  
10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### Актуальність дисертаційного дослідження

Дисертація Чубрей Марини Віталіївни присвячена теоретичному дослідженню оптичних властивостей багатопарових сферичних квантових точок (КТ), які вирощуються дешевими методами колоїдної хімії і є перспективними наноматеріалами через свої унікальні оптичні та електронні властивості, що зумовлені ефектами квантового обмеження. Основними сферами застосування квантових точок є фотодетектори, сонячні елементи, світлодіоди, біомаркери, флуоресцентні мітки та різноманітні квантові сенсори. Наприклад, КТ другого типу дозволяють розширити діапазон поглинання світла сонячними елементами в довгохвильову область, що збільшить їх ККД. Використання сферичних наноструктур для покращення параметрів цих напівпровідникових приладів вимагає дослідження таких характеристик, як переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла, а також виявлення особливостей впливу на них зовнішніх полів у різних комбінаціях величини та напрямку.

### Практична цінність роботи

Процес створення новітніх напівпровідникових приладів сучасної електроніки, який ґрунтується на ефектах квантового обмеження, часто називають інженерією хвильових функцій. Саме хвильові функції визначають розподіл густини ймовірності знаходження квазічастинок у наноструктурі, їхнє перекриття, час тунелювання та рекомбінації носіїв заряду, а також нелінійні оптичні властивості, що формують характеристики наноприладу. Отже, керування хвильовими функціями дозволяє контролювати енергетичні рівні, ймовірність рекомбінації носіїв та їхню взаємодію з електромагнітним випромінюванням. Це, своєю чергою, дає змогу налаштовувати спектральні характеристики та підвищувати ефективність оптоелектронних приладів — від світлодіодів і лазерів до квантових сенсорів і фотодетекторів.

Дисертаційна робота Марини Чубрей містить ґрунтовний аналіз впливу геометричних параметрів наноструктур, наявності заряджених домішок і зовнішніх полів на енергетичний спектр та хвильові функції електронів. На основі отриманих результатів досліджено енергії, сили осциляторів квантових

переходів та ефективний переріз фотоіонізації домішки, що дозволяє прогнозувати оптичні характеристики наноприладів. Ці результати можуть бути використані для оптимізації параметрів фотодетекторів, сонячних елементів, сенсорів та інших пристроїв, які базуються на квантових ефектах.

### **Структура і зміст роботи**

Обсяг дисертації становить 185 сторінок, із яких основний текст — 135 сторінок. Вона складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. У вступі авторка 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.

*В першому розділі* проведено огляд літератури щодо теоретичних і експериментальних досліджень квантових точок типу «ядро-оболонка» I та II типу, їхніх оптичних, електричних та магнітних властивостей. Розглянуто методи створення квантових точок, їхні застосування в оптоелектроніці та вплив зовнішніх полів і домішок на характеристики наноструктур. Проаналізовано основні теоретичні підходи для дослідження квантових точок.

*В другому розділі* досліджено вплив зовнішніх електричних та магнітних полів на фотоелектричні властивості водневоподібної домішки в багаточарових сферичних квантових точках. Вивчено вплив цих полів на енергетичний спектр, енергію зв'язку електрона з домішкою та поперечний переріз фотоіонізації. Показано, як зміна параметрів наноструктури та інтенсивності полів впливає на локалізацію електрона і, відповідно, на оптичні характеристики.

*Третій розділ* присвячено вивченню впливу електричних і магнітних полів на лінійні та нелінійні коефіцієнти поглинання світла в багаточарових сферичних квантових антиточках з домішками та без них. Проаналізовано залежність оптичних характеристик від розміру наноструктур, інтенсивності зовнішніх полів і положення домішки. Виявлено явище антикросингу енергетичних рівнів і досліджено його вплив на коефіцієнти поглинання.

*В четвертому розділі* досліджено вплив зовнішніх електричного і магнітного полів на оптичні властивості квантових точок ядро-оболонка II типу (CdSe/ZnTe, ZnTe/CdSe). Проаналізовано, як зовнішні поля змінюють енергетичний спектр, правила відбору для оптичних переходів і оптичні коефіцієнти.

## **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 здобувачкою та винесені на захист, цілком відповідають меті та завданням роботи, обговорювались на наукових семінарах, міжнародних конференціях та опубліковані у фахових виданнях України та зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (у т. ч. 3 статті в журналах, що входять до квартилю Q2 та одна – до квартилю Q3). 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 (219 посилань).

## **Наукова новизна**

Дисертація пропонує низку фундаментальних результатів, що мають високу цінність: У дисертаційній роботі вперше здійснено комплексний аналіз впливу зовнішніх електричних і магнітних полів на енергетичні властивості багатошарових сферичних квантових точок I та II типу, з урахуванням розташування домішки та геометричних характеристик наноструктури. Вперше було розглянуто вплив комбінованого електричного та магнітного полів на енергетичний спектр та взаємодію електронів із домішками, що дозволяє повному оцінити фотоіонізаційні та оптичні властивості таких систем.

З'ясовано, що геометрія оболонки в двошарових багатошарових квантових точках суттєво впливає на процес тунелювання електронів під дією магнітного поля, змінюючи коефіцієнт поглинання та переріз фотоіонізації. Показано, що під впливом зовнішніх полів та домішки у багатошарових сферичних квантових точках виникає ефект Ааронова-Бома, що порушує звичайний порядок енергетичних рівнів, відкриваючи нові можливості для досліджень у галузі квантових ефектів.

Виявлено залежність лінійних і нелінійних коефіцієнтів поглинання від розміру ядра та напруженості зовнішніх полів у структурах з нецентральною домішкою, що дозволяє більш точно контролювати фотонні властивості наноструктур. Для квантових точок II типу досліджено вплив електричного та магнітного полів на просторове розподілення електрона і дірки, виявивши, що електричне поле зменшує їх взаємодію і збільшує час життя екситона, тоді як магнітне поле навпаки сприяє їх зближенню та посилює енергію зв'язку між ними.

## **Практичне значення**

Результати роботи мають безпосереднє прикладне значення:

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в можливості використання отриманих теоретичних результатів для розробки новітніх оптоелектронних та фотоелектричних пристроїв на основі багат шарових квантових точок. Виявлені закономірності впливу зовнішніх електричних і магнітних полів на енергетичні властивості та фотонні характеристики квантових точок можуть стати основою для створення нових матеріалів з покращеними оптичними та електричними властивостями, що забезпечить їх використання в оптоелектронних компонентах, таких як лазери, фотодіоди, сенсори та детектори.

Отримані результати також можуть бути корисними для розробки нових методів моделювання та синтезу наноструктур з заданими характеристиками, що дозволить більш точно керувати властивостями матеріалів на рівні окремих квантових точок. Це, в свою чергу, сприятиме розвитку технологій в галузі квантових обчислень, енергозбереження та медичних пристроїв, де висока точність керування оптичними властивостями матеріалів є необхідною умовою для створення новітніх інноваційних продуктів.

Вивчені ефекти Ааронова-Бомов міжпідзонних та міжзонних квантових переходах електронів в багат шарових квантових точках відкривають перспективи для розробки нових приладів, що можуть бути використані в області квантових комунікацій і інформаційних технологій, зокрема для створення більш ефективних квантових датчиків та систем зберігання інформації.

## **Зауваження**

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

1. У дисертації квантові переходи розглядаються виключно в дипольному наближенні. Через сферичну симетрію квантових точок деякі переходи виявляються забороненими, однак ця заборона частково знімається за рахунок порушення симетрії. Водночас у роботі не виконано оцінку інтенсивності квадрупольних переходів, які мають інші правила відбору порівняно з дипольними.
2. У списку літератури представлено значну кількість джерел, що стосуються тематики дослідження. Але там присутні повторні посилання на одні й ті самі публікації, зокрема, роботи під номерами [148] та [218] дублюють одна одну.

3. У тексті дисертації зустрічаються граматичні та стилістичні помилки. Наприклад: на стор.137 зустрічається неправильний відмінок: «екситону» замість «екситона». словосполученні «об'єм локалізації електрона» пропущено слово «області».

Зазначені зауваження 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**

Результати дослідження опубліковано в 9 наукових статтях, індексованих у наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection (зокрема, 3 статті – у журналах квартилю Q2, 1 стаття – квартилю Q3), а також апробовано на 7 вітчизняних і міжнародних наукових конференціях із публікацією тез доповідей. У публікаціях висвітлено матеріали досліджень, що охоплюють усі розділи дисертації.

### **Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації**

Представлені в наукових працях і дисертації результати дослідження є новими та повністю відповідають принципам академічної доброчесності. Дисертантка чітко окреслила свій особистий внесок у публікаціях. Використані в дисертаційній роботі ідеї, теоретичні підходи, методи, а також експериментальні та теоретичні результати інших авторів належним чином задокументовані із відповідними посиланнями на джерела.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Чубрей М.В. є завершеним науковим дослідженням, яке виконано авторкою самостійно на високому науковому рівні. У роботі дисертанткою одержано багато нових результатів, які є достовірними та науково обґрунтованими, мають значний науковий та практичний інтерес. 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, сприяють більш глибокому розумінню предмету дослідження. Усі сформульовані висновки отримали необхідну і достатню теоретичну аргументацію та є методологічно обґрунтованими.

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни «Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах» 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'язання 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 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024)

Авторка дисертації, Чубрей Марина Віталіївна, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія».

#### Офіційний рецензент

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича



Іван КОЗЯРСЬКИЙ

