

ВІДГУК

Офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри фізики та методики її навчання Криворізького державного педагогічного університету Білінського Ігоря Васильовича на кваліфікаційне дослідження «Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах» Чубрей Марини Віталіївни, яка здобуває науковий ступінь доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Актуальність теми виконаної роботи.

Сучасна наноелектроніка, фотоніка та сенсорика стрімко розвиваються завдяки впровадженню сферичних наноструктур – зокрема, квантових точок, які демонструють унікальні квантово-розмірні ефекти. Одним із ключових процесів, що визначають їх оптичні властивості, є фотоіонізація домішкових станів, оскільки вона суттєво впливає на ефективність генерації носіїв заряду, світлопоглинання та випромінювання в таких структурах.

Водночас, як показують останні дослідження, зовнішні електричні та магнітні поля дозволяють керувати змінювати спектральні характеристики наноструктур, зокрема переріз фотоіонізації та коефіцієнт поглинання світла. Це відкриває нові можливості для створення оптичних сенсорів, лазерів, елементів пам'яті та фотодетекторів з адаптивними властивостями.

Попри наявність окремих теоретичних моделей, комплексне дослідження впливу зовнішніх полів на фотоіонізаційні та оптичні характеристики в сферичних наноструктурах, з урахуванням домішкових рівнів, залишається недостатньо вивченим. Це зумовлює наукову новизну і високу практичну цінність та **актуальність** теми.

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

Результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані в рамках наукової

тематики кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича на тему «Дослідження спектральних характеристик квазічастинок, змінених взаємодіями з електромагнітними та квантованими полями в низькорозмірних та тривимірних системах для оптимізації параметрів наноприладів» (номер державної реєстрації 0116U004083). Крім того, робота виконувалася в межах держбюджетної теми «Квантова теорія електронного тунелювання через анізотропні резонансно-тунельні наноструктури квантових каскадних детекторів ближнього інфрачервоного діапазону» (номер державної реєстрації 0121U109823).

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

1. Вперше досліджено комбінований вплив електричних і магнітних полів та положення донорної домішки на енергетичний спектр електрона, процеси тунелювання, енергію переходів, переріз фотоіонізації домішки і коефіцієнт поглинання у багатошарових сферичних квантових точках $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ з різними геометричними параметрами.
2. Теоретично встановлено вплив ширини зовнішньої потенціальної ями на процес тунелювання електрона в двоямних БСКТ $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ у магнітному полі, що проявляється у зміні поведінки коефіцієнта пропускання та перерізу фотоіонізації домішки.
3. Вперше досліджено особливості ефекту Ааронова-Бома у багатошарових квантових точках з урахуванням домішкових центрів, що призводить до порушення стандартного порядку енергетичних рівнів.
4. Виявлено вплив електричних та магнітних полів на екситонні стани у КТ II типу $CdSe/ZnTe$ і $ZnTe/CdSe$, де встановлено закономірності просторового розділення зарядів, зміни кулонівської взаємодії та тривалості життя екситонів.

Обґрунтування достовірності отриманих результатів базується на застосуванні перевірених чисельних підходів для розв'язання рівняння Шредінгера, зокрема методу скінченних елементів та матричного методу. Отримані результати демонструють високу узгодженість із даними інших авторів, а також збігаються з відомими аналітичними розв'язками у граничних випадках спрощених фізичних моделей, що додатково підтверджує правильність проведених розрахунків.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати поглиблюють розуміння впливу домішкових центрів та зовнішніх електричних і магнітних полів на енергетичні спектри, хвильові функції, енергії зв'язку, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання у квантових точках I та II типу. Це створює наукову базу для цілеспрямованого конструювання наносистем з оптимальними оптичними властивостями.

Результати можуть бути використані для розробки високоефективних оптоелектронних пристроїв нового покоління: сонячних елементів із підвищеним коефіцієнтом перетворення, фотодетекторів з регульованою спектральною чутливістю, джерел когерентного та некогерентного випромінювання, а також елементів квантових обчислювальних систем, де потрібна стабільність та точність оптичної відповіді.

Показана можливість керування поглинанням світла в певних діапазонах спектра за рахунок зміни зовнішніх полів і параметрів домішок у багатошарових сферичних квантових точках, що є особливо важливим для створення налаштовуваних фотонних і квантових сенсорів.

Також визначені умови максимізації або мінімізації перерізу фотоіонізації домішки, що може бути критичним для практичних застосувань: у випадках, де необхідна висока чутливість (наприклад, у квантових сенсорах) або мінімізація енергетичних втрат (наприклад, у

стабільних оптичних резонаторах чи елементах квантових мереж).

Додатково, встановлені закономірності можуть використовуватися для моделювання і оптимізації характеристик наноструктурованих середовищ у біомедичних пристроях, лазерах, а також для вдосконалення технологій інформаційної безпеки на основі квантових комунікацій.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність. Кваліфікаційна робота Чубрей Марини Віталіївни 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 (219 позицій) та містить 49 рисунків.

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 дисертації присвячено аналізу фізичних властивостей квантових точок типу «ядро-оболонка» I та II типу, їх методів синтезу та перспектив застосування в оптоелектроніці й квантових технологіях. Автор узагальнює сучасні досягнення у дослідженні впливу зовнішніх електричних і магнітних полів, а також домішок на оптичні та електронні характеристики наноструктур. Огляд літератури є ґрунтовним і демонструє високий рівень обізнаності здобувача у тематиці дослідження. Матеріал логічно вибудований, глибоко аналізує актуальні напрями розвитку нанофізики і підводить до обґрунтування обраних методів теоретичного моделювання. Особливо цінним є чітке визначення місця власного дослідження серед сучасних наукових задач.

Другий розділ присвячено комплексному дослідженню впливу електричних та магнітних полів на фотоіонізаційні властивості

водневоподібної домішки у багатошарових сферичних квантових точках. Автор послідовно розглядає зміну енергетичного спектра, енергії зв'язку та перерізу фотоіонізації за різних конфігурацій полів і положення домішки.

Розділ демонструє глибоке володіння сучасними методами моделювання (матричний метод, метод скінченних елементів) та вміння інтерпретувати фізичні механізми, що лежать в основі зміни оптичних характеристик наносистем. Особливу увагу приділено аналізу антикросингу рівнів і залежності оптичних властивостей від розмірів структур.

Матеріал викладено логічно та послідовно, а отримані результати мають практичне значення для розробки нанопристроїв з керованими оптичними параметрами. Розділ є завершеним і добре підкріплює основну ідею дисертації.

У **третьому** розділі дисертації досліджено вплив електричних і магнітних полів на оптичні властивості багатошарових сферичних квантових антиточок з домішками та без них. Особливу увагу приділено зміні енергетичного спектра, коефіцієнтів поглинання світла, енергії зв'язку електрона з домішкою та поляризованості наноструктур під дією полів і варіації геометричних параметрів.

Автор показав, що магнітне поле суттєво підсилює нелінійні ефекти в більших антиточках, а комбінація електричного і магнітного полів дозволяє керувати енергетичними переходами та оптичним відгуком наносистеми. Отримані закономірності мають практичне значення для налаштування властивостей квантових сенсорів і фотонних пристроїв. Матеріал викладено ґрунтовно і логічно, що свідчить про високий рівень виконання дослідження.

У **четвертому** розділі досліджується вплив зовнішніх електричних і магнітних полів на оптичні властивості квантових точок типу ядро-оболонка, зокрема таких систем, як CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe. Показано, що прикладені зовнішні електричні й магнітні поля порушують сферичну симетрію системи, змінюючи правила відбору для оптичних переходів. Проаналізовано вплив електричного та магнітного полів на енергетичний спектр квазічастинок,

силу осцилятора та енергію міжзонних переходів, енергії зв'язку та час життя екситона. Розрахунки показали, що зовнішнє електричне поле сприяє просторовому розділенню носіїв заряду, зменшенню кулонівської взаємодії між електроном і діркою та збільшенню часу життя екситонів. Магнітне поле, у свою чергу, усуває виродження енергетичних рівнів за магнітним квантовим числом і викликає осциляції Ааронова–Бома для певних квантових переходів, а також сприяє посиленню кулонівської взаємодії між електроном і діркою.

Кваліфікаційна наукова праця Чубрей М. В. 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 роботі виявлено цікаве явище – виникнення від'ємних значень коефіцієнта поглинання при низькоенергетичних переходах за певних умов дії зовнішніх полів. Водночас фізичний механізм цього ефекту у тексті описано досить стисло. Доцільно було б надати детальніше пояснення природи спостереженого явища та можливих механізмів його виникнення.
2. У роботі представлено результати впливу електричного та магнітного полів на властивості квантових точок II типу. Проте недостатньо розкрито, яким чином на ці ефекти впливають геометричні параметри квантових точок, зокрема товщина оболонки та радіус ядра. Розширення

обговорення цього питання сприяло б глибшому розумінню отриманих результатів.

3. У роботі при проведенні обчислень методом скінчених елементів було використано вільну трикутну сітку. Вкажіть, будь ласка, у яких одиницях виміру наведено параметри сітки: площу елементів, коефіцієнт кривизни, швидкість росту елементів та роздільну здатність у вузьких областях?
4. Поясніть, чому у формулі (3.20) не враховано координатну залежність ефективної маси електрона в квантових точках ядро-оболонка, хоча це необхідно для коректного застосування правила f-сум Томаса–Райха–Куна.
5. Чому кулонівський доданок у гамільтоніанах (2.1) та (2.17) має різні знаки, і з чим це пов'язано?

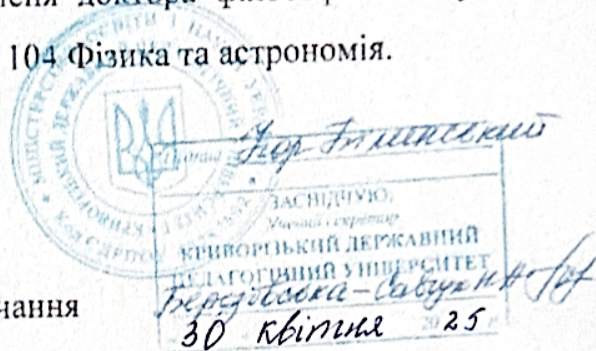
Відсутність порушення академічної доброчесності. Кваліфікаційне дослідження є самостійною науковою працею автора. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують наукову новизну кваліфікаційного дослідження, одержані автором особисто. При використанні праць інших вчених для аргументації актуальних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

Загальний висновок. Кваліфікаційна наукова робота «Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах» Чубрей Марини Віталіївни 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 КМУ №44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від

21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а також "Вимогам до оформлення дисертації", затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 року (зі змінами від № 759 від 31.05.2019), а авторка кваліфікаційної наукової роботи Чубрей Марина Віталіївна 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

Підпис доктора фіз.-мат. наук,
професора Ігоря Білінського засвідчую
Проректор з науково-педагогічної роботи
Криворізького державного
педагогічного університету
кандидат педагогічних наук, доцент



Юлія Баруліна