

ВІДГУК

офіційного опонента — доктора фізико-математичних наук, професора,
професора кафедри прикладної математики
Національного університету «Львівська політехніка»
Сеті Юлії Олександрівни
на дисертаційну роботу Чубрей Марини Віталіївни
на тему «**Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та
коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах**»,
яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань
10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність дисертаційної роботи

Квантові точки є одним із найперспективніших матеріалів у сфері нанотехнологій. Завдяки ефектам квантового обмеження, вони дозволяють цілеспрямовано керувати електронними та оптичними властивостями матеріалів, що зумовлює їх широке застосування у сучасній науці та техніці — зокрема в енергоефективних дисплеях (наприклад, QLED-технології), сонячних елементах, світлодіодах, біомедичних сенсорах, лазерних системах і квантових технологіях.

Водночас оптичні характеристики квантових точок надзвичайно чутливі до зовнішніх впливів, таких як електричні й магнітні поля, а також до наявності домішок у матеріалі. Для ефективного впровадження квантових точок у практичні застосування необхідно глибоко розуміти, як саме ці чинники змінюють електронні стани і, відповідно, властивості наносистем.

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни присвячена вивченню саме цих питань. У ній виконано комплексний теоретичний аналіз впливу зовнішніх постійних полів і домішок на оптичні властивості квантових точок та антиточок із різною будовою. Авторка досліджує зміну енергетичного спектра, перерізу фотоіонізації домішки, коефіцієнта поглинання та поляризованості за різних зовнішніх умов. Робота ґрунтується на сучасних фізичних моделях і дає цілісне уявлення про поведінку наносистем сферичної симетрії у змінному середовищі.

Отримані результати можуть бути корисними для створення новітніх нанопристроїв — таких як фотодетектори, сенсори, джерела світла та елементи квантової електроніки. Це підтверджує високу актуальність дисертаційного дослідження як у контексті фундаментальної науки, так і для прикладних технологій.

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів

Результати, подані в дисертації, є логічними, послідовними та повністю відповідають сформульованій меті й поставленим завданням дослідження. Основні положення чітко викладені в розділах роботи та підтверджені як аналітичними, так і чисельними розрахунками.

Авторка опрацювала значний обсяг сучасної наукової літератури, включаючи публікації в міжнародних рецензованих журналах і наукові

монографії, що дозволило їй ґрунтовно сформувати теоретичну базу дослідження.

Достовірність результатів забезпечено застосуванням перевірених і фізично обґрунтованих теоретичних підходів, зокрема — матричного методу в межах моделі ефективної маси та прямокутного потенціалу. Для незалежної перевірки результатів також використано метод скінченних елементів, що дало змогу зіставити результати, отримані різними методами, і впевнено підтвердити їх збіжність. Поєднання різних підходів до моделювання підвищує надійність отриманих висновків і свідчить про високу якість проведеного дослідження.

Отримані залежності демонструють фізично коректну поведінку в граничних випадках та відповідають результатам, отриманим іншими дослідниками, що також підтверджує коректність виконаних обчислень і достовірність обраної методології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертаційна робота виконана в межах наукової тематики кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а саме: «Дослідження спектрів квазічастинок, перенормованих взаємодіями з електромагнітними та квантованими полями в низькорозмірних та 3d системах із метою оптимізації параметрів наноприладів» (номер Держреєстрації 0116U004083) та «Квантова теорія електронного тунелювання крізь анізотропні резонансно-тунельні наноструктури квантових каскадних детекторів ближнього інфрачервоного діапазону» (номер Держреєстрації 0121U109823).

Таким чином, тематика дисертаційного дослідження безпосередньо пов'язана з пріоритетними напрямками наукової діяльності ЗВО та спрямована на розвиток сучасних нанотехнологій і квантової електроніки.

Новизна отриманих в дисертаційній роботі результатів

У дисертаційній роботі вперше здійснено комплексне теоретичне дослідження оптичних та фотоіонізаційних властивостей багатошарових сферичних квантових точок I та II типу з урахуванням впливу зовнішніх електричних і магнітних полів, положення домішки та геометричних параметрів наноструктури. Основні наукові результати, що становлять новизну дослідження, полягають у наступному:

- Проведено аналіз комбінованого впливу електричного або магнітного поля та положення донорної домішки на енергетичний спектр, енергію зв'язку електрона з домішкою, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання у багатошарових сферичних квантових точках $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$. Показано, як ці параметри змінюються залежно від розмірів ядра та ширини потенціальної ями.

- Досліджено вплив ширини зовнішньої оболонки у двоямній багатошаровій сферичній квантовій точці $GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ на процес

тунелювання електрона в присутності магнітного поля. Встановлено, що ширина оболонки визначає характер тунелювання, що, у свою чергу, помітно впливає на оптичні характеристики структури — коефіцієнт поглинання та переріз фотоіонізації домішки.

- Виявлено, що при одночасному впливі зовнішніх полів і домішки в багатошарових сферичних квантових точках проявляється ефект Ааронова–Бома, який призводить до порушення звичайного порядку енергетичних рівнів.

- Описано особливості зміни лінійного та нелінійного коефіцієнтів поглинання в структурах із нецентральною домішкою залежно від розміру ядра та інтенсивності зовнішніх полів.

- Для квантових точок II типу $CdSe/ZnTe$ та $ZnTe/CdSe$ досліджено вплив електричного і магнітного полів на просторове розділення електрона і дірки. Показано, що електричне поле спричиняє взаємне віддалення носіїв заряду, зменшуючи кулонівську взаємодію між ними і збільшуючи час життя екситона, тоді як магнітне поле діє навпаки — зближує носії, підсилює взаємодію та збільшує енергію зв'язку між ними.

Практичне значення отриманих результатів

Результати, отримані в дисертаційній роботі, мають важливе прикладне значення для розробки й вдосконалення наноструктур з керованими оптичними властивостями. Виявлені закономірності зміни енергетичного спектра, перерізу фотоіонізації домішки та коефіцієнта поглинання під впливом зовнішніх полів і домішок створюють підґрунтя для проектування адаптивних наносистем, здатних ефективно функціонувати в умовах змінного середовища або у складних технічних умовах. Це відкриває перспективи застосування квантових точок у таких технологіях, як:

- сонячні елементи нового покоління з можливістю оптимізації поглинання світла в заданих спектральних діапазонах;
- фотодетектори і сенсори - для підвищення чутливості, швидкодії та селективності до певних частот випромінювання;
- світлодіоди та лазери - для реалізації динамічного керування параметрами випромінювання;
- квантові обчислювальні системи, де особливо важливими є стабільність і контроль взаємодії між носіями заряду.

Окремо слід відзначити, що в дисертації встановлено умови, за яких величину перерізу фотоіонізації домішки можна як збільшити, так і зменшити. Це має вагоме значення для проектування пристроїв, що потребують максимального поглинання (наприклад, квантові сенсори, фотодетектори, сонячні елементи) або мінімальних втрат енергії (наприклад, у квантових комп'ютерах або джерелах світла з низькою інтенсивністю).

Загалом, результати дослідження мають потенціал практичного застосування в таких сферах, як нанооптика, оптоелектроніка, фотоніка та квантові технології нового покоління.

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи

Результати дослідження викладено у двадцяти наукових публікаціях та представлено на семи наукових конференціях різного рівня. Десять із цих праць опубліковані у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, п'ять із них також входять до Web of Science Core Collection. Серед опублікованих статей три належать до журналів другого квартиля (Q2), одна — до журналу третього квартиля (Q3), дві — до фахових наукових видань України категорії «А».

Такий рівень апробації свідчить про визнання результатів дослідження науковою спільнотою, а також про відповідність опублікованих матеріалів вимогам до дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

Оформлення дисертаційної роботи

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог, встановлених для наукових кваліфікаційних праць. Вона має чітку структуру, логічну послідовність викладу, що забезпечує системне розкриття теми згідно з поставленою метою і завданнями дослідження.

Математичні викладки та результати чисельного аналізу подано коректно, із належними поясненнями фізичного змісту та графічним супроводом.

Мова викладу є науковою, точною та зрозумілою, що сприяє сприйняттю складного теоретичного матеріалу.

Загалом оформлення дисертації повністю відповідає академічним стандартам, а її структура забезпечує цілісне розуміння наукового змісту.

Структура і зміст дисертації

До складу дисертації входять анотації українською та англійською мовами, перелік умовних позначень, вступ, чотири змістовні розділи, основні висновки, список використаних джерел та додаток із переліком публікацій здобувачки за темою дослідження.

Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, включаючи 49 рисунків, які ілюструють ключові результати. У роботі використано 219 джерел літератури, більшість з яких становлять сучасні публікації в авторитетних міжнародних наукових виданнях, що підтверджує актуальність і глибину теоретичної бази дослідження.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт і предмет роботи, а також розкрито наукову новизну, практичне значення результатів, зв'язок з науковими програмами, структуру роботи та особистий внесок здобувачки.

Перший розділ присвячено огляду літератури за темою дослідження. У ньому подано загальні відомості про квантові точки типу «ядро-оболонка», описано їх класифікацію, способи створення та області застосування. Обговорено, як на поведінку носіїв заряду у квантових точках впливають зовнішні поля та домішки. Також проаналізовані основні методи теоретичного

моделювання, застосовувані для подібних систем.

У **другому розділі** досліджено вплив зовнішніх електричних і магнітних полів на енергетичний спектр, енергію зв'язку електрона з водневоподібною домішкою та переріз фотоіонізації в одно- та двоямних багатошарових сферичних квантових точках.

Рівняння Шредінгера розв'язано матричним методом у межах моделі ефективної маси та прямокутного потенціального бар'єру. Для перевірки достовірності результатів також використано метод скінченних елементів.

Окремо проаналізовано, як електричне та магнітне поля впливають на переріз фотоіонізації водневоподібною домішки в багатошаровій сферичній квантовій точці $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_yGa_{1-y}As$. Встановлено, що електричне поле знижує енергію зв'язку домішки та змінює величину піку перерізу фотоіонізації, особливо при зміщенні домішки від центру потенціальної ями. Для центральної домішки магнітне поле зміщує піки перерізу фотоіонізації в низькоенергетичну область. При зміщенні домішки від центра з'являються додаткові піки, пов'язані з різними міжпідзонними переходами, які, у свою чергу, зміщуються до вищих енергій.

Також вивчено дію магнітного поля на переріз фотоіонізації та коефіцієнт поглинання в складній багатошаровій наноструктурі $GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs$, що включає дві потенціальні ями та внутрішній бар'єр. Показано, що залежно від індукції магнітного поля та геометричних параметрів змінюється локалізація електрона, що супроводжується антикросингом енергетичних рівнів, і суттєво впливає на оптичні характеристики структури. Зокрема, зменшення товщини зовнішньої оболонки або дія сильного магнітного поля зумовлюють зсув піків коефіцієнта поглинання та перерізу фотоіонізації домішки у високоенергетичну область.

У **третьому розділі** подано комплексне дослідження впливу зовнішніх електричних і магнітних полів на лінійні та нелінійні коефіцієнти поглинання в багатошаровій сферичній квантовій антиточці $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ як з домішкою, так і без неї.

У випадку структури без домішки встановлено, що електричне поле призводить до зниження енергії основного стану електрона. Збуджені рівні змінюються лише за умови дії сильного поля. Натомість магнітне поле зсуває всі енергетичні рівні в область вищих енергій, особливо у структурах з більшим радіусом. Виявлено прояви антикросингу при зміні параметрів поля, що суттєво впливає на оптичні властивості системи. У режимах слабого електричного поля спостерігається посилення поглинання у низькоенергетичному діапазоні зумовлене магнітним полем. У такому випадку загальний коефіцієнт поглинання в області низьких енергій стає від'ємним, що пояснюється зміщенням піку нелінійного поглинання в область нижчих енергій.

Для випадку квантової антиточки з центральною домішкою проаналізовано зміну енергетичного спектра, енергії зв'язку, коефіцієнтів поглинання та поляризованості залежно від параметрів полів і геометрії структури. Показано, що

магнітне поле підсилює зв'язок електрона з домішкою, тоді як електричне поле може як послаблювати, так і підсилювати його залежно від умов. Із підвищенням напруженостей полів піки поглинання зміщуються в область вищих енергій, а їх висота змінюється залежно від величини полів. Поляризованість зростає зі збільшенням розміру квантової точки і досягає максимуму за сильного електричного поля, після чого зменшується. Вплив магнітного поля на поляризованість виявився несуттєвим.

У **четвертому розділі** досліджено оптичні властивості квантових точок «ядро-оболонка» II типу $CdSe/ZnTe$ та $ZnTe/CdSe$ під дією електричних і магнітних полів. Проаналізовано вплив полів на енергетичний спектр, силу осцилятора, міжзонні переходи, енергії зв'язку та час життя екситонів. Встановлено, що електричне поле сприяє просторовому розділенню електрона і дірки, внаслідок чого зменшується кулонівська взаємодія і збільшується час життя екситона. Натомість магнітне поле усуває виродження енергетичних рівнів, підсилює взаємодію між носіями заряду та викликає осциляції Ааронова–Бома для окремих переходів.

Дисертаційна робота завершується основними висновками, у яких чітко сформульовано наукові результати, отримані в процесі дослідження. Висновки повністю відповідають поставленим завданням і підтверджують досягнення мети роботи.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності. В ній не виявлено фактів плагіату, порушення авторських прав чи некоректного запозичення результатів інших дослідників. Усі використані джерела належним чином процитовано, а результати, наведені в роботі, мають обґрунтоване походження.

Зауваження до дисертації

У цілому, дисертаційна робота справляє позитивне враження, однак містить окремі моменти, які потребують уточнення або можуть бути вдосконалені.

1. При розгляді випадків, коли зовнішнє поле напрямлене вздовж осі Oz, зазначено, що система зберігає циліндричну симетрію. Проте не розкрито, як саме ця симетрія враховується при побудові математичної моделі — зокрема, у виборі базисних функцій, застосованих наближеннях або чисельних методах, які спрощення або обмеження це накладає на модель.

2. У роботі розглядаються багатошарові сферичні квантові точки з певним набором матеріалів та геометричних параметрів. Було б доречно обґрунтувати вибір саме таких комбінацій та типів наноструктур, чому ці конфігурації є особливо цікавими або перспективними для дослідження з точки зору їхніх потенційних застосувань або унікальних фізичних властивостей.

3. Незважаючи на прикладний потенціал отриманих результатів, було б доречно у висновках або в окремому підрозділі сформулювати короткі практичні

рекомендації щодо їх можливого використання — наприклад, у проєктуванні фотодетекторів, сенсорів або світловипромінювальних структур на основі квантових точок. Такий підсумок сприяв би кращому зв'язку теоретичних результатів із потенційними практичними застосуваннями.

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

Ці недоліки не знижують наукової цінності роботи та не впливають на її відповідність вимогам до дисертаційних досліджень.

Загальний висновок

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 за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (галузь знань 10 – Природничі науки), 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 Чубрей Марина Віталіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор
професор кафедри прикладної математики
Інституту прикладної математики та
фундаментальних наук
Національного університету «Львівська політехніка»



Юлія СЕТІ

Підпис д.ф.-м.н., проф. Юлії СЕТІ засвідчую
Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка»,
к.т.н., доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ