

## ВІДГУК

офіційного опонента — кандидата фізико-математичних наук, доцента,  
доцента кафедри програмної інженерії  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя  
Бойка Ігоря Володимировича  
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

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни присвячена розробці теорії та методів теоретичного дослідження. Проведений аналіз дисертаційної роботи Чубрей М. В. “Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах ” вказує на її приналежність до наукової школи теоретичної фізики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а також до наукової тематики кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Отримані результати аналізу дають змогу сформулювати такі висновки щодо актуальності представлених у дисертації результатів, рівня обґрунтованості основних наукових положень, їх достовірності та меж застосування, наукової новизни, практичної цінності та сфер впровадження, а також надати загальну оцінку дисертаційної роботи.

### **Актуальність дисертаційної роботи**

Багатошарові наноструктури з керованими оптичними властивостями становлять значний науковий інтерес завдяки здатності утримувати електрони в трьох просторових вимірах, що зумовлює виникнення дискретних енергетичних рівнів, подібних до атомних. Саме ефект квантового обмеження лежить в основі їхніх унікальних характеристик, які можуть змінюватися під впливом зовнішніх електричних і магнітних полів, а також домішок. Зовнішні поля здатні істотно впливати на енергетичну структуру та просторову локалізацію носіїв заряду, викликаючи характерні явища, зокрема зсуви та розщеплення енергетичних рівнів.

Домішки, як навмисно введені, так і присутні через особливості технології виготовлення наносистем, також істотно впливають на оптичні властивості, зокрема на поглинання світла та фотоіонізацію, створюючи додаткові локалізовані стани. Тому актуальність дослідження зумовлена широким спектром практичного застосування таких наноструктур у фотоелектричних і оптоелектронних приладах — сонячних елементах, лазерах, світлодіодах, квантових сенсорах та елементах квантових обчислень.

Залежно від просторового розташування електронів і дірок, наноструктури можуть бути оптимізовані для інтенсивного випромінювання або, навпаки, для ефективного

розділення зарядів у перетворювачах енергії. Контроль над розмірами, формою, шаровим складом і концентрацією домішок дає змогу цілеспрямовано формувати їхні оптичні характеристики. Таким чином, дисертаційне дослідження Чубрей М.В., присвячене таких актуальних задач із врахування впливу зовнішніх полів і домішок на оптичні властивості багатошарових наноструктур, має високу наукову і прикладну цінність, оскільки сприяє розвитку матеріалознавства, фотоніки, оптоелектроніки та квантових технологій.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності із науковими планами та тематикою кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Дослідження спектрів квазічастинок, перенормованих взаємодіями з електромагнітними та квантованими полями в низькорозмірних та 3d системах із метою оптимізації параметрів наноприладів» (номер Держреєстрації 0116U004083).

**Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів** поданих у дисертаційній роботі визначається встановленням коректності постановок досліджуваних наукових проблем та порівнянням отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними. У безпосередніх дослідженнях дисертантка використовувала перевірені теоретичних методів для розв'язання рівняння Шредінгера, зокрема матричний метод та методу скінченних елементів. Додаткове підтвердження забезпечує узгодженість із результатами інших дослідників, що отримані у експерименті. Також хорошим підтвердженням достовірності отриманих результатів є добра збіжність отриманих результатів у граничних випадках з точними розв'язками суміжних простіших задач. Апробацію результатів досліджень здійснено на ряді всеукраїнських і міжнародних конференцій. Окрім того всі результати, що викладені у дисертації було опубліковано в рецензованих високореєтингових фахових виданнях, які індексовані наукометричними базами Scopus та Web of Science.

### **Новизна отриманих в дисертаційній роботі результатів**

Наукові результати, викладені у дисертації є новими та оригінальними, їх актуальність безсумнівна. Основні наукові результати, що характеризують основу та зміст дисертаційної роботи є такими:

- I. Уперше досліджено одночасний вплив електричного поля та положення донорної домішки на енергетичний спектр електрона, енергію зв'язку електрона з домішкою та переріз фотоіонізації домішки у багатошаровій сферичній квантовій точці  **$Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$**  з різною шириною потенціальної ями та проведено аналіз одночасного впливу магнітного поля та положення донорної домішки на енергетичний спектр, хвильову функцію електрона, енергію переходу, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнти поглинання для випадків різного радіусу ядра квантової точки.
- II. – Уперше досліджено вплив ширини зовнішньої потенціальної ями на процес тунелювання електрона із зовнішньої потенціальної ями у внутрішню під дією

магнітного поля у двоямній багат шаровій сферичній квантовій точці. Встановлено, що ширина зовнішньої потенціальної ями впливає на плавність процесу тунелювання електрона, що відображається на залежностях коефіцієнта поглинання та перерізі фотоіонізації домішки. Також досліджено вплив постійних зовнішніх полів і домішки на енергетичний спектр електрона в багат шаровій сферичній квантовій точці та проаналізовано особливості ефекту Ааронова-Бома, які призводять до порушення звичайного порядку енергетичних рівнів.

III. Установлено характерні особливості зміни лінійного та нелінійного коефіцієнтів поглинання світла в багат шаровій сферичній квантовій точці з урахуванням наявності або відсутності нецентральної домішки. Показано, що зміна розмірів ядра, яка виникає внаслідок сумарного впливу електричного та магнітного полів, істотно впливає на оптичні характеристики структури.

IV. Досліджено вплив зовнішнього електричного поля на наноструктури другого типу, що продемонструвало: зі зростанням напруженості поля відбувається просторове розділення електрона та дірки. Це, у свою чергу, зменшує кулонівську взаємодію між ними та подовжує час життя екситонних станів. Вивчено також вплив магнітного поля на ті ж структури. Встановлено, що за його дії виникає ефект Ааронова-Бома, який проявляється у зміні перекриття хвильових функцій електрона і дірки. Це зумовлює посилення кулонівської взаємодії та зростання енергії зв'язку екситона.

### **Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи**

Отримані здобувачем результати мають суттєве наукове значення, оскільки поглиблюють уявлення про вплив зовнішніх електричних і магнітних полів, а також домішкових ефектів на оптичні, електронні та магнітні властивості багат шарових сферичних наноструктур типу I та II. Зокрема, проаналізовано, як зовнішні фактори змінюють енергетичний спектр, просторову структуру хвильових функцій, енергію зв'язку, силу осцилятора, коефіцієнт поглинання та переріз фотоіонізації домішки. Отримані результати є важливими для формування цільових оптичних характеристик у квантових точках, що відкриває можливості для їх практичного використання в оптоелектроніці — зокрема у сонячних елементах, фотодетекторах, регульованих джерелах світла та пристроях квантових обчислень.

Показано, що зміна коефіцієнта поглинання під впливом зовнішніх полів та домішок може бути ефективним інструментом для спектрального керування оптичною відповіддю матеріалу, що є критичним для підвищення ефективності оптоелектронних систем. Окрему наукову цінність становить вивчення залежності перерізу фотоіонізації від інтенсивності поля та просторового положення домішки, що дає змогу визначити оптимальні умови для створення високочутливих сенсорів, фотодетекторів і енергоефективних пристроїв нового покоління.

## **Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, було опубліковано в 20 наукових публікаціях. З них 10 статей опубліковано у виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus, причому 5 з них також входять до Web of Science Core Collection. Три статті опубліковано в журналах, що належать до другого квартилю згідно класифікації Scimago Journal&Country Rank (Q2), одна — до третього квартиля (Q3), а ще дві — у фахових виданнях України категорії «А». Крім того, результати дисертаційного дослідження були апробовані на міжнародних наукових форумах і опубліковані у 7 збірниках матеріалів конференцій. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам щодо академічної доброчесності.

## **Оформлення дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота виконана з дотриманням норм сучасної української літературної мови та з коректним використанням науково-технічної термінології. Матеріал викладено чітко, логічно й послідовно; структура роботи є цілісною та взаємопов'язаною, що повністю відповідає змісту проведеного дослідження та сприяє легкому сприйняттю його результатів. Робота відповідає чинним вимогам до оформлення дисертацій, що подаються на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

## **Короткий зміст дисертаційної роботи та її аналіз**

Дисертаційна робота Чубрей М.В. має загальний обсяг 184 сторінки машинописного тексту та включає анотацію, вступ, огляд літератури й основну частину, що складається з трьох розділів. У цих розділах представлено результати власних досліджень автора та сформульовано відповідні висновки. Робота також містить нумерований список використаних джерел і додатки.

В **Анотації** до дисертаційної роботи Чубрей М.В. висвітлено актуальність і тематику наукових проблем, що розв'язуються у дослідженні, а також подано стислий огляд основних наукових результатів. Наприкінці анотації наведено перелік публікацій здобувача, які відображають зміст дисертації та засвідчують апробацію отриманих результатів.

У **Вступі** здійснено обґрунтування вибору теми й актуальність роботи, сформульована мета, основні задачі, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, представлено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У **Першому розділі** дисертаційної роботи здійснено огляд і аналіз наукових публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням, що стосуються тематики дисертації. Детально розглянуто фізичні властивості квантових точок типу «ядро–оболонка» I та II типу, їх відмінності та можливості застосування в оптоелектроніці. Проаналізовано основні підходи до синтезу квантових точок: «зверху вниз» (фізичні й хімічні методи) та «знизу вгору» (хімічне осадження, самоскладання), з акцентом на їхні переваги у створенні

якісних наноструктур. Особливу увагу приділено практичному використанню квантових точок у сонячних елементах, світлодіодах, лазерах, біомедичних технологіях і квантових обчисленнях. Обґрунтовано актуальність вивчення впливу зовнішніх полів і домішок на енергетичний спектр, силу осцилятора, енергію зв'язку електрона з домішкою, коефіцієнти поглинання та поперечний переріз фотоіонізації. Крім того, на основі огляду попередніх теоретичних досліджень охарактеризовано основні методи й підходи до моделювання спектральних властивостей квазічастинок у квантових точках.

У **Другому розділі** дисертаційної роботи автором проведено ґрунтовне дослідження впливу зовнішніх електричних і магнітних полів на фотоелектричні характеристики воднеподібної домішки в багат шарових сферичних квантових точках. Особливу увагу приділено аналізу процесу фотоіонізації, який описується через поперечний переріз фотоіонізації — величину, що визначає ймовірність іонізації домішкових станів під дією світла. Основною метою цього розділу є дослідження енергетичного спектру, енергії зв'язку електрона з домішкою та поперечного перерізу фотоіонізації в одноямних і двоямних багат шарових сферичних квантових точках у присутності зовнішніх полів. Для досягнення поставленої мети автором розв'язано рівняння Шрединґера з використанням матричного методу в рамках моделі ефективної маси та прямокутного потенціалу. Отримані результати свідчать, що геометричні параметри квантової точки, а також інтенсивність зовнішніх полів істотно впливають на просторову локалізацію електрона, що, у свою чергу, змінює енергію зв'язку та поперечний переріз фотоіонізації. Зокрема, вивчено вплив електричного поля на фотоіонізаційні властивості домішки в багат шаровій сферичній квантовій точці, вбудованій у широкозонну матрицю. Розрахунки виконано для випадку, коли електричне поле паралельне осі симетрії, що дозволило зберегти циліндричну симетрію гамільтоніана та описати електронні стани магнітним квантовим числом.

Показано, що максимальний пік фотоіонізаційного перерізу спостерігається при розташуванні домішки в центрі потенціальної ями, тоді як збільшення напруженості електричного поля зменшує енергію зв'язку домішки та призводить до зміни поперечного перерізу. Проаналізовано також комбінований вплив магнітного поля та просторового положення донорної домішки. Встановлено, що для центрально розташованої домішки магнітне поле зміщує максимум фотоіонізаційного перерізу в низькоенергетичну область, тоді як для нецентральної домішки спостерігається декілька максимумів, пов'язаних з міжпідзонними квантовими переходами.

Особливу увагу приділено аналізу впливу магнітного поля на енергетичний спектр, хвильові функції та кулонівську взаємодію "електрон-домішка" для різних розмірів квантових точок. Проведено порівняння результатів, отриманих матричним методом і методом скінченних елементів, що засвідчило високу точність і ефективність першого підходу. У завершальній частині розділу досліджено вплив магнітного поля на фотоіонізаційні властивості багат шарової квантової точки, структура якої включає ядро та дві оболонки. Показано, що залежно від геометрії наносистеми та індукції магнітного поля, електрон може локалізуватися в різних потенціальних ямах, що супроводжується антикросингом енергетичних рівнів. Це відкриває можливості для керування електронною

густиною та оптичними характеристиками наноструктури, особливо в області антикросингу, де такі властивості є найбільш чутливими до зовнішніх впливів. Автором встановлено, що зменшення розмірів зовнішньої потенціальної ями призводить до зміщення піків поперечного перерізу фотоіонізації та коефіцієнта поглинання у високоенергетичну область, що зумовлює підвищену участь збуджених станів у квантових переходах. Також показано, що магнітне поле з індукцією 10–15 Тл впливає на оптичні характеристики аналогічно до зменшення товщини зовнішньої оболонки, що має важливе значення для практичного налаштування оптичної відповіді наносистеми. Розділ завершується висновками.

**Третій розділ** досліджений вплив електричних і магнітних полів на лінійні та нелінійні коефіцієнти поглинання світла в багатошарових сферичних квантових антиточках типу  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  — як з домішками, так і без них. Аналізовано залежності енергетичного спектру, хвильових функцій, енергій зв'язку, сили осцилятора, поляризованості домішки та коефіцієнтів поглинання від зовнішніх полів, розміру наноструктури й наявності домішки.

Особливу увагу приділено впливу магнітного поля на оптичне поглинання в сферичній квантовій антиточці типу ядро–оболонка з домішкою, розташованою в центрі потенціальної ями. Встановлено, що на енергетичні рівні та хвильові функції електрона суттєво впливають розміри ядра, інтенсивність магнітного поля та положення домішки. Показано, що в наноструктурах малого розміру домінує лінійний коефіцієнт поглинання, тоді як у більших структурах із зростанням магнітного поля нелінійний коефіцієнт значно зростає, що свідчить про підвищену чутливість таких систем до магнітних впливів. У разі наявності нецентральної домішки коефіцієнт поглинання помітно зменшується, і цей ефект посилюється зі збільшенням індукції магнітного поля та розміру квантової антиточки.

Окремо розглянуто комбінований вплив електричного й магнітного полів на оптичне поглинання в сферичній квантовій антиточці без домішки. Зокрема, проаналізовано, як ці поля впливають на енергетичний спектр електронів, розподіл густини заряду в системі та силу осцилятора квантових переходів. Встановлено, що електричне поле знижує енергію основного стану електронів, тоді як збуджені стани суттєво змінюються лише при високих напруженостях поля. Магнітне поле, у свою чергу, зсуває всі енергетичні рівні в область вищих енергій, причому цей ефект стає помітнішим зі збільшенням розміру ядра. Внаслідок різного впливу зовнішніх полів на різні електронні стани спостерігається явище антикросингу енергетичних рівнів.

Показано, що збільшення напруженості електричного поля зміщує енергії квантових переходів у високоенергетичну область, за винятком переходу  $1p-1d$  при індукції магнітного поля  $B = 30$  Тл. Магнітне поле підсилює поглинання для низькоенергетичних переходів лише за умов слабого електричного поля. При цьому загальний коефіцієнт поглинання в низькоенергетичній області стає від'ємним, що пояснюється зміщенням піку нелінійного поглинання в область нижчих енергій. Також проаналізовано одночасний вплив електричного та магнітного полів на оптичні властивості електрона в квантовій антиточці з донорною домішкою, розташованою в центрі потенціальної ями вздовж осі Oz. Розглянуто зміну енергетичного спектру електрона залежно від напруженості співнаправлених

електричного і магнітного полів, а також вивчено ефекти антикросингу. Установлено, що магнітне поле підвищує енергію зв'язку електрона з домішкою, утримуючи електрон ближче до неї. Водночас електричне поле може як посилювати, так і послаблювати цей зв'язок залежно від напрямку поля.

Аналіз коефіцієнтів поглинання показав, що зі зростанням напруженості зовнішніх полів піки поглинання зміщуються у високоенергетичну область, при цьому їх інтенсивність змінюється в залежності від сили полів. Вивчено також вплив полів і геометричних параметрів квантової антиточки на поляризованість системи. Показано, що зі збільшенням розміру антиточки поляризованість зростає. Під дією електричного поля поляризованість спершу різко збільшується, досягає максимуму, а згодом поступово зменшується. Вплив магнітного поля на поляризованість виявився незначним.. Розділ завершується висновками.

У **Четвертому розділі** досліджено вплив зовнішніх електричного та магнітного полів на оптичні властивості квантових точок ядро-оболонка II типу, зокрема структур CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe. Показано, що прикладені поля порушують сферичну симетрію системи, змінюючи правила відбору для оптичних переходів. Проаналізовано вплив полів на енергетичний спектр квазічастинок, силу осцилятора, енергію міжзонних переходів, енергії зв'язку та час життя екситона. Згідно з розрахунками, зовнішнє електричне поле сприяє просторовому розділенню носіїв заряду, зменшенню кулонівської взаємодії між електроном і діркою, а також збільшенню часу життя екситонів. Натомість магнітне поле усуває виродження енергетичних рівнів за магнітним квантовим числом, викликає осциляції Ааронова–Бома для окремих квантових переходів, а також посилює кулонівську взаємодію між електроном і діркою. Розділ завершується висновками.

Дисертаційна робота завершується **Основними результатами та висновками** в яких подано формулювання основних наукових результатів роботи. Далі йдуть **Додатки**, які містять **Список використаних джерел**.

## Зауваження

Подані результати наукової роботи Чубрей М.В. оцінюються виключно позитивно, однак хотів би висловити кілька зауважень та коментарів до дисертаційної роботи, які мають технічний характер і жодним чином не знижують наукової новизни та значущості отриманих результатів, а також могли бути метою подальших досліджень:

- У тексті дисертації повідомляється, що у дослідженнях широко використовувався метод скінченних елементів, що за своєю природою є наближеним. Яка точність застосування цього методу до задач, що вирішувались у дисертації?
- У виразі для поперечного перерізу фотоіонізації домішки в дипольному наближенні фігурує величина  $\delta(E_f^{Z=0} - E_i^{Z=1} - \hbar\omega) = \frac{\Gamma}{\pi[(E_b^{if} - \hbar\omega)^2 + \Gamma^2]}$ , де параметри  $\Gamma$  і  $\hbar\omega$

можуть бути безпосередньо обчисленими виключно у моделі відкритої наносистеми із квазістаціонарними станами. Чи оцінювались ці величини в теоретичних моделях, що розвинені в дисертації? Якщо так, то яким чином?

- В дисертації є непоодинокими описки, наприклад “рішення” замість “розв’язок”, “осциляторна сила міжзонних переходів” замість “сила осцилятора міжзонних переходів”.

## Висновки

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни є закінченою та цілісною науковою роботою, в якій проведені ґрунтовні теоретичні дослідження електронних властивостей наноструктур із сферичною геометрією. Дисертанткою встановлено суть та механізми впливу зовнішніх постійного електричного та магнітного полів на процеси фотоіонізації та поглинання світла у складних багаточарових напівпровідникових квантових точках різних типів.

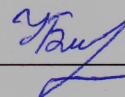
Отже, враховуючи наведений вище аналіз поданих наукових результатів, дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни “Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах” за безпосередньою актуальністю, науковою новизною, переліком отриманих результатів, а також їх взаємозв’язком та повнотою їх викладу в наукових публікаціях, а також 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 Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), 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 року), а автор дисертації Чубрей Марина Віталіївна беззаперечно заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент —

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри програмної інженерії

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя



Ігор БОЙКО

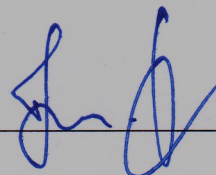
Підпис кандидата фіз.-мат. наук,

доцента Ігоря БОЙКА засвідчую

Проректор з наукової роботи

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

доктор технічних наук, професор



Павло МАРУЩАК