

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне і практичне значення  
результатів дисертації Чубрей Марини Віталіївни на тему:  
«Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та  
коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах»,  
поданої на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія  
в галузі знань 10 - Природничі науки**

**1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із  
планами наукових робіт Університету.**

Квантові точки I та II типу мають унікальні оптичні та електронні властивості завдяки квантовому обмеженню, що робить їх перспективними для оптоелектроніки, фотоніки та квантових технологій. Важливу роль у їхньому функціонуванні відіграють зовнішні електричні та магнітні поля, які змінюють енергетичний спектр, викликаючи штарківський зсув та зеєманівське розщеплення. Це дозволяє покращувати ефективність сонячних батарей, регулювати довжину хвилі випромінювання у лазерах і світлодіодах та керувати квантовими станами у квантових комп'ютерах. Ще одним важливим чинником, що впливає на оптичні властивості квантових точок, є наявність домішок. Вони можуть змінювати енергетичний спектр та процеси рекомбінації носіїв заряду, що безпосередньо позначається на ефективності функціонування наноструктур у різних приладах.

Таким чином, дослідження впливу зовнішніх полів і домішок на оптичні властивості багаточарових квантових точок є актуальним і важливим напрямом сучасної науки. Отримані результати сприятимуть створенню нових ефективних матеріалів для квантових технологій, сонячної енергетики та оптоелектронних пристроїв, дозволить вдосконалити існуючі технології та розширити можливості їхнього практичного застосування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.**

Дослідження дисертаційної роботи виконана під керівництвом доктора фізико-математичних наук Головацького Володимира Анатолійовича. Результати, які представлені в дисертації, отримані в межах наукової тематики 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).

**Метою роботи** є вивчення впливу електричного і магнітного полів, положення домішки, а також розміру багаточарової сферичної квантової точки на енергетичний спектр, енергію зв'язку, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнти поглинання в напівпровідникових багаточарових сферичних квантових точок I та II типу.

### **Методи дослідження**

Для дослідження енергетичного спектра та хвильових функцій електронів і дірок у багаточарових наносистемах під впливом домішок і зовнішніх полів застосовувався матричний метод. Він ґрунтується на представленні хвильових функцій квазічастинок у вигляді розкладу за повним набором функцій, отриманих як точні розв'язки рівняння Шредінгера для наноструктури без домішок і зовнішніх полів. Аналіз проводився в рамках наближення ефективної маси та моделі прямокутних потенціальних бар'єрів із врахуванням умов неперервності хвильових функцій і потоків густини ймовірностей на всіх межах гетероструктури. Для перевірки отриманих результатів додатково виконувалися розрахунки методом скінченних елементів із використанням комерційного програмного комплексу COMSOL-Multiphysics.

**Предметом** дослідження є енергетичний спектр та хвильові функції електронів та дірок, сили осциляторів міжзонних квантових переходів, коефіцієнти поглинання та переріз фотоіонізації домішки.

**Об'єктом** дослідження є багат шарові сферичні квантові точки I та II типу.

## **2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації.**

У дисертації були поставлені завдання, які полягали у теоретичному дослідженні одночасного впливу електричних і магнітних полів, домішкових ефектів та геометричних параметрів на енергетичний спектр, локалізацію носіїв заряду, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання багат шарових квантових точок  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_yGa_{1-y}As$  та  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ; встановленні закономірності зміни оптичних властивостей багат шарових сферичних квантових точок ядро-оболонка II типу  $CdSe/ZnTe$  та  $ZnTe/CdSe$  під дією зовнішніх полів та визначенні критичних параметрів, що дозволяють керувати фотоіонізаційними процесами і спектральними характеристиками для потенційного застосування у квантовій електроніці та оптоелектронних пристроях.

## **3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.**

У дисертаційному дослідженні дисертанткою було розроблено та отримано такі нові і важливі результати:

1. Досліджено одночасний вплив електричного поля та положення донорної домішки на енергетичний спектр електрона, енергію зв'язку електрона з домішкою та переріз фотоіонізації домішки у багат шаровій сферичній квантовій точці  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  з різною шириною потенціальної ями.

2. Здійснено аналіз одночасного впливу магнітного поля та

положення донорної домішки на енергетичний спектр, хвильову функцію електрона, енергію переходу, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнти поглинання у багат шаровій сферичній квантовій точці  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  з різним радіусом ядра.

3. Теоретично 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  $GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ . Показано, що ширина зовнішньої потенціальної ями впливає на плавність процесу тунелювання електрона, що відображається на залежностях коефіцієнта поглинання та переріз фотоіонізації домішки.

4. Досліджено комбінований вплив зовнішніх полів і домішки на енергетичний спектр електрона в багат шаровій сферичній квантовій точці та проаналізовано особливості ефекту Ааронова-Бома, що призводить до порушення звичайного порядку енергетичних рівнів.

5. Встановлено особливості лінійного та нелінійного коефіцієнтів поглинання світла у багат шаровій сферичній квантовій точці з нецентральною домішкою та без неї, враховуючи різні розміри ядра, які виникають за рахунок комбінованого впливу електричного та магнітного полів.

6. Досліджено вплив зовнішнього електричного поля на квантові точки II типу  $CdSe/ZnTe$  та  $ZnTe/CdSe$ , яке показало що напруженість електричного поля сприяє просторовому розділенню електрона та дірки, що призводить до зменшення кулонівської взаємодії та збільшення часу життя екситонних станів.

7. Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на квантові точки II типу  $CdSe/ZnTe$  та  $ZnTe/CdSe$ , у результаті якого виникає ефект Ааронова-Бома. Показано, що магнітне поле змінює перекриття хвильових функцій електрона та дірки в квантових точках II типу, що призводить до

збільшення кулонівської взаємодії між ними і зростання енергії зв'язку екситону.

Дисертантка брала активну участь на всіх етапах дослідження нових задач і розробки методів. Вона провела детальний аналіз отриманих результатів і сформулювала висновки для кожного розділу дисертації.

#### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

У процесі підготовки дисертації Чубрей М. В. провела ґрунтовний аналіз значного обсягу фахової літератури. До опрацьованих матеріалів увійшли статті, опубліковані у високореєтингових журналах, а також наукові монографії, перелік яких наведено у списку використаних джерел.

Достовірність отриманих результатів обґрунтовується використанням перевірених теоретичних методів для розв'язання рівняння Шредінґера, зокрема матричного методу та методу скінченних елементів. Додаткове підтвердження забезпечує їх узгодженість із результатами інших дослідників, а також задовільна збіжність у граничних випадках із точними розв'язками аналогічних спрощених задач.

Дисертація містить анотації двома мовами, перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, основні висновки, список використаних джерел та додаток із переліком публікацій автора за темою дисертаційного дослідження. Дисертаційна робота є самостійною науковою працею. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують, зокрема, наукову новизну дослідження, сформовані автором дисертації.

Наукові публікації (7 статей у виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus і 2 статті у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus) відображають основну проблематику та ключові положення

дисертаційного дослідження. Апробація основних результатів роботи здійснювалася шляхом доповідей на 7 наукових конференціях.

**5. Рівень теоретичної підготовки здобувачки та рівень її обізнаності з результатами наукових досліджень інших науковців високий.** Це видно, як з великої кількості використаних для огляду наукових джерел, так і з доповіді матеріалів дисертації.

Особистий внесок здобувачки у вирішення конкретного наукового завдання є значним. Зокрема:

- дисертантка активно долучалася до обговорення постановки задачі, формулювання мети дослідження, вибору методів аналізу, а також до підготовки матеріалів для публікації у наукових журналах. Крім того, вона представляла отримані результати у вигляді доповідей на наукових конференціях.

- розраховувала енергетичний спектр та хвильові функції електрона, енергію зв'язку електрона з домішкою, переріз фотоіонізації домішки під впливом зовнішнього електричного та магнітного полів в одноямних та двоямних багаточарових сферичних квантових точках та здійснювала аналіз отриманих результатів.

- виконала комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона, енергії зв'язку електрона з домішкою та коефіцієнтів поглинання під одночасним впливом зовнішнього електричного та магнітного полів в одноямних багаточарових сферичних квантових точках з домішкою та без неї.

- дослідила вплив зовнішнього магнітного та електричного полів на енергетичний спектр, хвильові функції, розподіл густин імовірності електронів та дірок, сили осцилятора міжзонних переходів, енергії зв'язку екситону, час життя випромінювання міжзонних переходів у квантових точках II типу *CdSe/ZnTe* та *ZnTe/CdSe*.

## **6. Наукове та практичне значення роботи.**

Дисертаційна робота має важливе наукове значення, оскільки вона розширює уявлення про вплив електричних і магнітних полів та домішкових ефектів на оптичні, електричні і магнітні властивості багат шарових сферичних квантових точок I та II типу.

Розуміння впливу домішок і зовнішніх полів на енергетичний спектр, хвильові функції електрона, енергію зв'язку, силу осцилятора, переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання у квантових точках I та II типу дозволяє розробляти наноструктури з необхідними оптичними властивостями для їх застосування в оптоелектроніці, зокрема у сонячних елементах, регульованих джерелах світла, фотодетекторах і квантових обчисленнях.

Вплив зовнішніх полів та домішок на коефіцієнт поглинання в квантових точках може бути використаним для керування здатністю матеріалу поглинати світло в певних спектральних діапазонах, що є критично важливим для створення ефективних оптоелектронних пристроїв. Аналіз залежності перерізу фотоіонізації домішки від інтенсивності полів та її положення у квантовій точці дозволяє визначити оптимальні умови для максимального або мінімального значення перерізу фотоіонізації домішки, що є ключовим для створення чутливих сенсорів, фотодетекторів та енергоефективних пристроїв.

## **7. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувачки в публікації.**

**Особистий внесок здобувача** в публікації такий, який вказаний у пункті 5 цього висновку.

**Результати** перевірки тексту дисертації з використанням антиплагіатної системи Turnitin Similarity показав на 7% схожості з джерелами з Інтернету. Робота відповідає принципам академічної доброчесності.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи викладені у 20 публікаціях, серед яких 10 праць опубліковано в наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus, з них 5 також входять до Web of Science Core Collection. Три статті опубліковані у виданнях, віднесених до другого квартиля (Q2), одна – до третього квартиля (Q3), а ще дві – у фахових виданнях України категорії «А». Окрім того, матеріали дисертації були представлені на наукових конференціях і опубліковані у семи тезах доповідей.

***Наукові статті, опубліковані у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus***

1. Головацький В., Яхневич М., Чубрей М. Вплив магнітного поля та нецентральної домішки на енергетичний спектр електрона в сферичній багатощаровій наносистемі. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2019. Т. 11, № 1. С. 01007:1-5. ISSN: 2077-6772 (Фахове видання, Scopus)
2. Holovatsky V. A., Chubrei M. V., Yurchenko O. M. Impurity photoionization cross-section and intersubband optical absorption coefficient in multilayer spherical quantum dots. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2021. Vol. 22, No. 4. P. 630–637. ISSN: 1729-4428 (Фахове видання, Scopus, Web of Science)

***Наукові статті, опубліковані у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus***

1. Holovatsky V., Chubrey M., Voitsekhivska O. Effect of electric field on photoionisation cross-section of impurity in multilayered quantum dot. *Superlattices and Microstructures*. 2020. Vol. 145. P. 106642. 106642. ISSN: 0749-6036 (Scopus) (Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21959&tip=sid&clean=0>)



2. Holovatsky V., Holovatska N., Chubrei M. Optical absorption, photoionization and binding energy of shallow donor impurity in spherical multilayered quantum dot. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021. Vol. 12126. P. 1212603. ISSN: 0277-786X (Scopus, Web of Science)
3. Chubrei M. V., Holovatsky V. A., Duque, C. A. Effect of magnetic field on donor impurity-related photoionisation cross-section in multilayered quantum dot. *Philosophical Magazine*. 2021. Vol. 145, No. 24. P. 2614–2633. ISSN: 1478-6435 (Scopus, Web of Science) (Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=15300154849&tip=sid&clean=0>)
4. Holovatsky V. A., Chubrei M. V., Duque C. A. Core-shell type-II spherical quantum dot under externally applied electric field. *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 747. P. 139142. ISSN: 0040-6090 (Scopus, Web of Science) (Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=12347&tip=sid&clean=0>)
5. Holovatsky V. A., Chubrei M. V. Optical absorption in core-shell quantum antidot under applied co-directed electric and magnetic fields. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2022. Vol. 751, No. 1. P. 149–157. ISSN: 1542-1406 (Scopus, Web of Science)
6. Holovatsky V., Holovatskyi I., Chubrei M., Duque C. A. Theoretical modeling of magnetic field effects on the optical properties of type-II core-shell quantum dot. *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13. No. 11. P. 7125–7133. ISSN: 2190-5509 (Scopus) (Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100886227&tip=sid&clean=0>)
7. Chubrei M. V., Holovatsky V. A., Holovatska N. H. Optical absorption in core-shell quantum antidot with donor impurity under applied co-directed electric and magnetic fields. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2024. Vol. 768, No. 3. P. 40–49. ISSN: 1542-1406 (Scopus)

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

1. Головацький В., Чубрей М. Вплив електричного поля на електронні стани, енергію зв'язку та поперечний переріз фотоіонізації воднеподібної домішки в багат шарових квантових точках. *Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології* (НАНСИС-2019): Тези VI Наук. конф. (Київ, 4–6 грудня 2019 р.) / редкол.: А. Г. Наумовець [та ін.]. Київ, 2019. С.29.
2. Головацький В., Чубрей М. Вплив електричного поля на електронні стани, енергію зв'язку та поперечний переріз фотоіонізації воднеподібної домішки в багат шарових квантових точках. *Релаксаційні, нелінійні, акустооптичні процеси і матеріали* : матер. X Міжнар. наук. конф. (Луцьк–Світязь, 25–29 черв. 2020 р.). Луцьк : Вежа-Друк, 2020. С.98-99.
3. Головацький В., Чубрей М. Лінійний та нелінійний коефіцієнти поглинання електромагнітних хвиль в наноструктурах з домішкою під впливом магнітного поля. *Актуальні проблеми фундаментальних наук : матеріали IV Міжнар. наук. конф.* (Луцьк – Світязь, 01 – 05 черв. 2021 р.). Луцьк: Вежа - Друк, 2021. С.152-153.
4. Holovatsky V. A., Chubrei M. V. Optical absorption in core-shell quantum antidot under applied co-directed electric and magnetic fields. *International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2021)*. Abstract Book of participants of the International research and practice conference (Lviv, 25 – 27 August 2021) / Edited by Dr. Olena Fesenko. Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2021. P. 430.
5. Holovatsky V., Chubrei M., Ivanko, V. Optical Absorption in Core-Shell Quatum Antidot with Donor Impurity under Applied Magnetic Field. *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference on “Nanomaterials: Applications and Properties”* (NAP-2021). 2021. P. IDNUM:1-5.
6. Chubrei M. V., Holovatsky V. A., Holovatska N. H. Optical absorption in

core-shell quantum antidot with donor impurity under applied co-directed electric and magnetic fields. *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2022)*. Abstract Book of participants of the International research and practice conference (Lviv, 25–27 August 2022) / Edited by Dr. Olena Fesenko. Kyiv: LLC APF POLYGRAPH SERVICE, 2022. P. 453.

7. Головацький В., Чубрей М., Гончарук С. Г. Вплив магнітного поля на оптичні властивості квантової точки II типу ZnTe/CdSe. *Релаксаційні, нелінійні, акустооптичні процеси і матеріали* : матер. XI Міжнар. наук. Конф (Луцьк, 1–5 черв. 2022 р.). Луцьк : Вежа-Друк, 2022. С.43.

**8. Апробація матеріалів дисертації** здійснювалася на таких конференціях:

1. VI Наукова конференція «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» (НАНСИС-2019), м. Київ, 4–6 грудня 2019р.
2. X Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні, акустооптичні процеси і матеріали» (РНАОПМ-2020), м. Луцьк–Світязь, 25–29 червня 2020р.
3. IV Міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми фундаментальних наук», м. Луцьк–Світязь, 01 – 05 червня 2021р.
4. 9th International Conference «Nanotechnologies and Nanomaterials» (NANO–2021), м. Львів, 25–27 серпня 2021р.
5. 11th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties» (NAP-2021), м. Одеса, 5-11 вересня 2021р.
6. 10th International research and practice conference «Nanotechnology And Nanomaterials» (NANO–2022), м. Львів, 25–27 серпня 2022р.
7. XI Міжнародна наукова конференція «Релаксаційні, нелінійні, акустооптичні процеси і матеріали» (РНАОПМ-2022), м. Луцьк, 1-5 червня 2022р.

**9. Оцінка мови і стилю дисертації.**

Мова і стиль дисертації відповідають вимогам, що висуваються до праць такого рівня.

**10. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.**

Зміст дисертації відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації, встановленим освітньо-науковою програмою «Фізика та астрономія» галузі знань 10 Природничі науки, спеціальності 104 Фізика та астрономія.

**11. Дотримання нормативних вимог щодо оформлення дисертації.**

Нормативні вимоги щодо оформлення дисертації дотримані повністю.

**12. Рекомендації дисертації до захисту.**

Дисертаційна робота Чубрей Марини Віталіївни «Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах», подана на здобуття 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 відповідає вимогам пунктів 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 №507 від 03.05.2024 р.).

За результатами публічної презентації результатів дисертації та їх обговорення на засіданні кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича 26 лютого 2025 року дисертацію Чубрей Марини Віталіївни

рекомендовано до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Голова засідання,  
доктор фізико-математичних наук  
завідувач кафедри інформаційних технологій  
та комп'ютерної фізики  
Чернівецького національного університету  
імені Юрія Федьковича



Мар'яна БОРЧА

Підпис *Борчи М.* засвідчую  
Учений секретар Чернівецького національного  
університету імені Юрія Федьковича  
*Шуровська И. С.*  
" 03 " березня 2019

