

АНОТАЦІЯ

Чубрей М. В. Вплив зовнішніх полів на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання світла в сферичних наноструктурах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (10 – Природничі науки). – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2025.

Дисертація присвячена теоретичному вивченню впливу зовнішніх полів та домішки на оптичні та фотоелектричні властивості багат шарових сферичних квантових точок, зокрема квантових точок I та II типу, які характеризуються специфічним профілем енергетичних зон в зоні контакту, що визначає просторове розділення носіїв заряду та їх кулонівську взаємодію. Дослідження виконувались для одноямних та двоямних наноструктур різних розмірів у наближенні прямокутних потенціальних бар'єрів та моделі ефективної маси. Для розрахунку хвильових функцій електрона та його енергетичного спектра використано матричний метод, згідно якого хвильову функції шукають у вигляді розкладу за повним базисом хвильових функцій, що є точними розв'язками рівняння Шредінгера для наносистеми без впливу зовнішніх полів та домішок.

У **вступі** розкрито актуальність теми дисертації, зазначено її зв'язок із науковими програмами та планами, визначено завдання і мету дослідження, розкрито наукове і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про публікації, апробацію результатів, особистий внесок здобувача та описано структуру й обсяг дисертації.

У **першому** розділі дисертації проведено огляд та аналіз наукових робіт, які присвячені теоретичним і експериментальним дослідженням, що стосуються теми дисертації. Детально розглянуто властивості квантових точок типу «ядро-оболонка» I та II типу, їхні відмінності та застосування в оптоелектроніці. Проаналізовано основні методи створення квантових точок: підхід «зверху-вниз»,

що охоплює фізичні та хімічні методи, і підхід «знизу-вгору», який включає хімічне осадження та самоскладання, вказано переваги кожного з підходів та їхнє значення для отримання високоякісних наноструктур. Також у розділі розглянуто застосування квантових точок у сонячних елементах, світлодіодах, лазерах, біомедичних технологіях і квантових обчисленнях. Окремо наголошено на важливості дослідження впливу зовнішніх полів та домішок на енергетичний спектр електронів, сили осцилятора, енергію зв'язку електрона з домішкою, коефіцієнти поглинання та поперечний переріз фотоіонізації домішки. Також, на основі попередніх теоретичних досліджень, було описано основні методи та підходи, які використовуються для теоретичного дослідження спектрів квазічастинок у квантових точках.

У **другому** розділі роботи досліджується вплив зовнішніх електричних та магнітних полів на фотоелектричні властивості водневоподібної домішки в багат шарових сферичних квантових точках. Зокрема розглядається явище фотоіонізації домішки, яке характеризується перерізом фотоіонізації домішки, що визначає ймовірність іонізації атомів або домішок в квантових точках під дією світла.

Основна мета розділу полягає у дослідженні енергетичного спектру, енергії зв'язку електрона з домішкою та поперечного перерізу фотоіонізації в однамних та двоямних багат шарових сферичних квантових точках під впливом електричного і магнітного полів. Для цього необхідно розв'язати рівняння Шредінгера, яке було обчислене матричним методом із використанням моделі ефективної маси та прямокутного потенціалу. Результати показали, що зміна розмірів квантової точки та збільшення інтенсивності полів суттєво змінюють локалізацію електрона, змінюючи енергію зв'язку електрона з домішкою та поперечний переріз фотоіонізації.

Окремо розглянуто вплив електричного поля на поперечний переріз фотоіонізації домішки у багат шаровій сферичній квантовій точці $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_yGa_{1-y}As$, яка вбудована в широкозонну матрицю. Для спрощення

розрахунків розглянуто випадок, коли поле паралельне осі Oz . У цих умовах гамільтоніан зберігає циліндричну симетрію, а електронні стани описуються магнітним квантовим числом. Отримано, що найвищий пік перерізу фотоіонізації домішки спостерігається, коли домішка розташована в центрі потенціальної ями, тоді як зростання інтенсивності електричного поля знижує енергію зв'язку домішки, змінюючи поперечний переріз фотоіонізації. Також розглянуто комбінований вплив магнітного поля і положення донорної домішки на поперечний переріз фотоіонізації у аналогічній квантовій точці. Показано, що для центральної домішки магнітне поле зміщує пік поперечного перерізу фотоіонізації у низькоенергетичну область, а для нецентральної — поперечний переріз фотоіонізації має декілька піків, що відповідають різним міжпідзонним квантовим переходам. Окрім цього, було вивчено вплив магнітного поля на енергетичний спектр, хвильові функції електронів та кулонівську взаємодію електрон-домішка для різних розмірів квантової точки. Виконано порівняння результатів отриманих матричним методом та методом скінченних елементів, що підтвердило високу точність та ефективність першого.

Досліджено вплив магнітного поля на переріз фотоіонізації домішки та коефіцієнт поглинання в квантовій точці яка складається з ядра $GaAs$ і двох оболонок $Al_xGa_{1-x}As$ і $GaAs$, де ядро і зовнішня оболонка утворюють дві потенціальні ями для електрона, а внутрішній шар є потенціальним бар'єром.

У залежності від індукції магнітного поля та геометричних параметрів наносистеми електрон може бути локалізованим у різних потенціальних ямах, що супроводжується антикросингом енергетичних рівнів. Це дозволяє коригувати розподіл електронної густини, а отже, і оптичними властивостями наноструктури особливо в області антикросингу, де вони найбільш чутливі до домішок та зовнішніх полів.

Показано, що зменшення розміру зовнішньої потенціальної ями зміщує піки поперечного перерізу фотоіонізації і коефіцієнта поглинання у високоенергетичну область, підсилюючи вплив квантових переходів у збуджені стани на оптичні

характеристики. Встановлено, що магнітне поле з індукцією 10-15 Тл впливає на оптичні характеристики наносистеми подібно до зменшення товщини зовнішньої оболонки.

У **третьому** розділі вивчено вплив електричного і магнітного полів на лінійні та нелінійні коефіцієнти поглинання світла в багатошарових сферичних квантових антиточках $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ з домішками та без них. Розглянуто залежності енергетичного спектру, хвильових функцій, енергій зв'язку, сили осцилятора, поляризованості домішки та коефіцієнтів поглинання від зовнішніх полів, розміру наноструктури й наявності домішок.

У цьому розділі окремо досліджено вплив магнітного поля на оптичне поглинання в сферичній квантовій антиточці ядро-оболонка з домішкою, яка розташована в центрі потенціальної ями. Встановлено, що на енергетичні рівні та хвильові функції електрона суттєво впливають розміри ядра, інтенсивність магнітного поля та розташування домішки. Показано, що у менших наноструктурах домінує лінійний коефіцієнт поглинання, тоді як у більших структурах із посиленням магнітного поля, нелінійний коефіцієнт поглинання суттєво зростає, що свідчить про підвищену чутливість такої системи до магнітних впливів. У випадку наявності нецентральної домішки коефіцієнт поглинання значно зменшується, і цей ефект посилюється зі збільшенням індукції магнітного поля та розміру квантової точки.

Досліджено комбінований вплив зовнішніх електричного та магнітного полів на оптичне поглинання в сферичній квантовій антиточці без домішки. Зокрема, розглядається, як ці поля змінюють енергетичний спектр електронів, розподіл густини електронів у наносистемі та силу осцилятора квантових переходів. Показано, що електричне поле спричиняє зниження енергії основного стану електронів, тоді як збуджені стани суттєво змінюються лише при високих напруженостях електричного поля. Магнітне поле, у свою чергу, зсуває всі енергетичні рівні в область вищих енергій, причому цей вплив посилюється зі збільшенням розміру ядра. Виявлено, що внаслідок різного впливу зовнішніх полів

на різні електронні стани спостерігається явище антикросингу енергетичних рівнів. Показано, що збільшення напруженості електричного поля зміщує енергію квантових переходів у бік вищих енергій, окрім переходу $1p - 1d$ при $B = 30$ Тл. Магнітне поле, посилює поглинання для низькоенергетичних переходів лише при слабкому електричному полі, при цьому загальний коефіцієнт поглинання для низьких енергій стає від'ємним, що пояснюється зміщенням піку нелінійного поглинання в область низьких енергій.

Розглянуто одночасний вплив електричного і магнітного полів на оптичні властивості електрона в квантовій антиточці з донорною домішкою, яка розташована в центрі потенціальної ями, вздовж осі Oz . Досліджено залежність енергетичного спектру електрона від напруженості співнаправлених електричного і магнітного полів, а також проаналізовано ефекти антикросингу енергетичних рівнів. У результаті дослідження впливу зовнішніх полів на енергію зв'язку електрона з домішкою отримано, що магнітне поле підвищує енергію зв'язку, утримуючи електрон ближче до домішки, тоді як електричне поле може як підсилювати, так і послаблювати цей зв'язок залежно від свого напрямку. Аналіз коефіцієнтів поглинання показав, що їхні піки зміщуються в область вищих енергій зі збільшенням напруженості полів, а їх висота змінюється залежно від величини полів. Також досліджено вплив полів і розміру квантової точки на поляризованість: зі збільшенням розміру квантової точки поляризованість зростає, а під дією високих електричних полів вона спершу різко збільшується, досягає максимуму, а потім поступово зменшується. Водночас вплив магнітного поля на поляризованість є незначним.

У четвертому розділі розглядається вплив зовнішніх електричного і магнітного полів на оптичні властивості квантових точок ядро-оболонка II типу, таких 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.

Практичне значення отриманих результатів

Розуміння особливостей залежностей енергетичного спектру електрона, поперечного перерізу фотоіонізації домішки та коефіцієнта поглинання у квантових точках I та II типу від характеристик зовнішніх полів дозволяє створювати наносистеми з потрібними оптичними характеристиками. Такі системи можуть бути використані в оптоелектронних пристроях, зокрема сонячних елементах, фотодетекторах, регульованих джерелах світла й у квантових обчисленнях.

Вплив зовнішніх полів та домішок на коефіцієнт поглинання у багат шарових сферичних квантових точках може бути використаним для керування здатністю матеріалу поглинати світло в певних спектральних діапазонах, що є критично важливим для створення ефективних оптоелектронних пристроїв. Отримані залежності поперечного перерізу фотоіонізації домішки від її положення у багат шаровій сферичній квантовій точці та від інтенсивності полів дозволяють визначити умови для максимально ефективної фотоіонізації. Це робить квантові точки придатними для використання у високочутливих і швидкодійних пристроях, зокрема квантових сенсорах, сонячних елементах і фотодетекторах. Також можливо визначити умови, за яких значення поперечного перерізу фотоіонізації мінімізується, що важливо для пристроїв, де критичним є точність, стабільність і мінімальне поглинання енергії, таких як спеціалізовані датчики та низькоенергетичні фотонні системи.

Ключові слова: квантова точка, енергетичний спектр (стан), сила

осцилятора, домішка, електричне поле, магнітне поле, наноструктура (система), електрон, екситон, дірка, рівняння Шредінгера, ефективна маса, потенціальний бар'єр, фотоелектричні властивості.

ABSTRACT

M. V. Chubrei. The effect of external fields on the impurity photoionization cross-section and light absorption coefficient in spherical nanostructures. Qualified scientific work as a manuscript.

Thesis on search for the Doctor of Philosophy degree in specialty 104 «Physics and Astronomy» (10 – Natural Sciences). – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2025.

The dissertation is dedicated to the theoretical study of the influence of external fields and impurities on the optical and photoelectric properties of multilayered spherical quantum dots. Particular attention is paid to type I and type II quantum dots, which are characterized by a specific energy band profile at the contact region, defining the spatial separation of charge carriers and their Coulomb interaction.

The study was conducted for single well and double well nanostructures of various sizes, using the approximation of rectangular potential barriers and the effective mass model. To calculate the electron wave functions and its energy spectrum, a matrix method was employed, in which the wave function is expressed as a expansion in a complete basis set of wave functions that are exact solutions of the Schrödinger equation for the nanostructure without the influence of external fields and impurities.

The introduction outlines the relevance of the dissertation topic, highlights its connection with scientific programs and plans, defines the objectives and purpose of the research, and reveals the scientific and practical significance of the obtained results. It provides information about publications, the approbation of results, the structure and scope of the dissertation.

The first chapter of the dissertation presents a review and analysis of scientific

works dedicated to theoretical and experimental studies related to the dissertation topic. The properties of core-shell quantum dots of types I and II, their differences, and applications in optoelectronics are discussed in detail. The main methods of fabricating quantum dots are analyzed, including the "top-down" approach, which encompasses physical and chemical techniques and the "bottom-up" approach, which encompasses chemical deposition and self-assembly methods. The advantages of each approach and their significance in producing high-quality nanostructures are highlighted. The chapter also explores the applications of quantum dots in solar cells, LEDs, lasers, biomedical technologies, and quantum computing. Special emphasis is placed on studying the influence of external fields and impurities on the energy spectrum of electrons and oscillator strengths. The binding energy of an electron with an impurity, absorption coefficients, and the impurity photoionization cross-section are also considered. Additionally, based on previous theoretical studies, the chapter discusses the main methods and approaches used for the theoretical investigation of quasiparticle spectra in quantum dots.

The second chapter of the dissertation examines the influence of external electric and magnetic fields on the photoelectric properties of a hydrogen-like impurity in multilayered spherical quantum dots. The chapter specifically considers impurity photoionization, characterized by the photoionization cross-section. This parameter determines the probability of ionization of atoms or impurities in quantum dots under the influence of light.

The purpose of this chapter is to investigate the energy spectrum, the interaction energy between an electron and an impurity, and the photoionization cross-section in multilayered spherical quantum dots influenced by external electric and magnetic fields. Single well and double well spherical quantum dots are under research. The Schrödinger equation was solved using the matrix method within the framework of the effective mass approximation and the rectangular potential model. The results indicate that adjustments in the quantum dot's size and stronger external fields significantly influence the electron's spatial distribution, resulting in measurable changes to the electron-impurity interaction

energy and photoionization cross-section.

The influence of an electric field on the photoionization cross-section of an impurity in a $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_yGa_{1-y}As$ multilayered spherical quantum dot embedded in a matrix-barrier, is analyzed. To simplify calculations, scenarios where the field is directed parallel to the Oz axis are considered. Under these conditions, the Hamiltonian retains cylindrical symmetry, and the electronic states are described by the magnetic quantum number. The results indicate that the highest observed peak of the photoionization cross-section is found when the impurity is located at the center of the potential well. Increasing the electric field intensity reduces the impurity's binding energy, modifying the photoionization cross-section. The combined influence of a magnetic field and the donor impurity's position on the photoionization cross-section in a similar quantum dot is also examined. It is shown that, for a central impurity, the magnetic field shifts the photoionization cross-section peak to the low-energy region, while with an off-centre impurity, the photoionization cross-section has several peaks corresponding to different intraband quantum transitions. Additionally, the impact of the magnetic field on the electron energy spectrum, wave functions and Coulomb interaction between electron and impurity for various quantum dot sizes is analyzed. A comparison of results obtained using the matrix method and the finite element method confirms the former's high accuracy and efficiency.

The influence of a magnetic field on the impurity photoionization cross-section and the absorption coefficient in a quantum dot with a $GaAs$ core and two shells, $Al_xGa_{1-x}As$ and $GaAs$, is investigated. In this configuration, the core and outer shell form two potential wells for the electron, while the inner layer acts as a potential barrier.

Depending on the magnetic field induction and the geometric parameters of the nanosystem, the electron can be localized in different potential wells, which is accompanied by energy level anticrossing. This allows to adjust the electron density distribution and, consequently, the optical properties of the nanostructure, particularly in the anticrossing region, where these properties are most sensitive to impurities and external fields.

It is shown that reducing the size of the external potential well shifts the position of the peaks of the photoionization cross section and the absorption coefficient to the high-energy region, enhancing the influence of quantum transitions to excited states on the optical characteristics. It is established that a magnetic field strength of $10 - 15 \text{ T}$ has an effect on the optical properties of the nanosystem similar to that of reducing the thickness of the outer shell.

The third chapter focuses on the effects of electric and magnetic fields on the linear and nonlinear light absorption coefficients in multilayered spherical quantum antidots $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ with and without impurities. Dependencies of the wave functions, energy spectrum, oscillator strengths, binding energies, impurity polarization, and absorption coefficients on external fields, nanostructure size, and impurity presence were analyzed.

This chapter separately examines the effect of the magnetic field on the optical absorption in a spherical core-shell quantum antidot with impurity located at the center of the potential well. The analysis shows that the electron's energy levels and wave functions are significantly influenced by the core size, magnetic field intensity, and impurity position. Results indicate that in smaller nanostructures, the linear absorption coefficient dominates, in contrast, in larger structures, an increase in magnetic field strength causes a significant rise in the nonlinear absorption coefficient, reflecting enhanced sensitivity to magnetic effects. In the presence of an off-center impurity, the absorption coefficient decreases significantly, and this effect becomes more pronounced with increasing magnetic field induction and the quantum dot size.

The combined effect of external electric and magnetic fields on optical absorption in a spherical quantum antidot without impurities was investigated. Specifically, how these fields alter the electronic energy spectrum, the electron density distribution in the nanosystem, and the oscillator strengths of quantum transitions is analyzed. Results show that an electric field reduces the ground-state energy of electrons, while higher energy states are significantly affected only under strong electric field intensities. The magnetic field, on the other hand, shifts all energy levels toward higher energies; this effect is more

pronounced in quantum antidots with larger core sizes. It was found that due to the different effect of external fields on different electronic states, the phenomenon of energy levels anticrossing is observed. When examining the combined impact of these fields on the absorption coefficient, it is observed that an increase in the electric field intensity generally shifts the quantum transition energies to higher energy ranges, except for the $1p - 1d$ transition at $B = 30$ T. For low-energy transitions, the magnetic field enhances absorption only under weak electric fields. Moreover, the total absorption coefficient at low energies becomes negative, which is explained by the shift of the nonlinear absorption peak toward the lower energy region.

The combined influence of electric and magnetic fields on the optical properties of an electron confined in a quantum antidot with a donor impurity is investigated. The donor impurity is located at the center of the potential well along the Oz axis. The analysis explores how the energy spectra of the electron's states vary with the strength of the co-directed electric and magnetic fields, including the occurrence of energy level anticrossings. Furthermore, the impact of these external fields on the electron-impurity binding energy is examined, demonstrating that the binding energy is influenced by the interaction between the electric and magnetic fields. The magnetic field enhances the binding energy by confining the electron closer to the center, while the electric field's effect on the binding energy depends on its orientation, potentially increasing or decreasing it. Analysis of the absorption coefficients showed that their peaks shift to higher energies with increasing field strength, and their height varies depending on the field strength. The influence of external fields and the size of the quantum dot on impurity polarizability was also investigated. It was found that polarizability increases with the size of the quantum dot. As the electric field strength increases, polarizability initially rises rapidly, reaches its maximum, and then decreases. At the same time, the influence of the magnetic field on polarizability is insignificant.

The fourth chapter explores the influence of external electric and magnetic fields on the optical characteristics of type-II core-shell quantum dots, such as $CdSe/ZnTe$ and $ZnTe/CdSe$. It is shown that the applied external electric and magnetic fields break the

spherical symmetry of the system and change the selection rules. Using the matrix method within the effective mass approximation, the study analyzes the effects of electric and magnetic fields on various properties, such as the quasiparticle energy spectrum, oscillator strength, interband transition energies, binding energies, and exciton lifetime. The calculations showed that the external electric field contributes to the spatial separation of charge carriers, reduces the Coulomb interaction between the electron and the hole, and increases the exciton lifetime. The magnetic field, in turn, removes the degeneracy of the energy levels with respect to the magnetic quantum number and causes Aharonov-Bohm oscillations for certain quantum transitions. Additionally, it enhances the Coulomb interaction between the electron and the hole.

Practical significance of the obtained results

Understanding the features of the dependences of the electron energy spectrum, the photoionization cross-section of impurities, and the absorption coefficient in type I and type II quantum dots on the characteristics of external fields makes it possible to create nanosystems with desired optical characteristics for various optoelectronic devices, such as solar cells, tunable light sources, photodetectors, and quantum computing devices. The influence of external fields and impurities on the absorption coefficient in multilayered spherical quantum dots can control the material's ability to absorb light in specific spectral ranges, which is essential for creating efficient optoelectronic devices. The obtained dependencies of the impurity photoionization cross-section on the impurity's position within the multilayered spherical quantum dot and on the intensity of external fields helps identify conditions for the most efficient photoionization. Such conditions are ideal for designing high-sensitivity, fast-response devices like quantum sensors, solar cells, and photodetectors. Conversely, identifying conditions that minimize the photoionization cross-section is valuable for devices requiring precision, stability, and minimal energy absorption. These include specialized sensors and low-energy photonic systems, where minimized energy absorption is critical for optimal functionality.

Keywords: quantum dot, energy spectrum (state), oscillator strength, impurity, electric field, magnetic field, nanostructure (system), electron, exciton, hole, Schrödinger

equation, effective mass, potential barrier, photoelectric properties.

Список публікацій за темою дисертації

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 багатошаровій наносистемі. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2019. Т. 11, № 1. С. 01007:1-5. (Особистий внесок автора: виконано аналітичні та числові розрахунки енергетичного спектра та хвильової функції електрона).
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. (Особистий внесок автора: виконано аналітичні та числові розрахунки енергетичного спектра та хвильової функції електрона).

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

3. 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. (Особистий внесок автора: розраховано енергетичний спектр та хвильові функції електрона, енергію зв'язку електрона з домішкою, переріз фотоіонізації домішки та здійснено аналіз отриманих результатів).
4. 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.

(Особистий внесок автора: виконано аналітичні та числові розрахунки енергетичного спектра та хвильової функції електрона).

5. 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. (Особистий внесок автора: розраховано енергетичний спектр електрона, енергію електрон-домішкових переходів, переріз фотіонізації домішки та проаналізовано отримані результати).

6. 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. (Особистий внесок автора: частково виконано аналітичні та чисельні розрахунки, проаналізовано отримані результати).

7. 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. (Особистий внесок автора: виконано комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона, сили осцилятора та коефіцієнтів поглинання).

8. 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. (Особистий внесок автора: частково виконано аналітичні та чисельні розрахунки, проаналізовано отримані результати).

9. 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. (Особистий внесок автора: виконано комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона, енергії зв'язку електрона з домішкою, коефіцієнтів поглинання та поляризованості домішки).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Головацький В., Чубрей М. Вплив електричного поля на електронні стани, енергію зв'язку та поперечний переріз фотоіонізації воднеподібної домішки в багаточарових 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. *(Особистий внесок автора: побудовано та проаналізовано залежності енергії зв'язку, середньої відстані між електроном та іоном домішки від напруженості електричного поля та положення домішки).*
11. Головацький В., Чубрей М. Вплив електричного поля на електронні стани, енергію зв'язку та поперечний переріз фотоіонізації воднеподібної домішки в багаточарових 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. *(Особистий внесок автора: побудовано та проаналізовано залежності поперечного перерізу фотоіонізації від величини та напрямку електричного поля).*
12. 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. *(Особистий внесок автора: побудовано та проаналізовано коефіцієнта поглинання від енергії падаючого фотона).*
13. 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. *(Особистий внесок автора: описано теоретичну частину для отримання коефіцієнтів поглинання).*

14. Holovatsky V., Chubrei M., Ivanko, V. Optical Absorption in Core-Shell Quantum 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. (Особистий внесок автора: виконано комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона, енергій переходів та коефіцієнтів поглинання).
15. 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. (Особистий внесок автора: виконано комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона, енергії зв'язку електрона з домішкою та коефіцієнтів поглинання).
16. 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. (Особистий внесок автора: виконано комп'ютерні розрахунки енергетичного спектра електрона).