

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ՀԱՅ-ՌՈՒՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ ԴԱՎԻԹ ԲՈՐԻՍԻ

ԶՐՈՉԱՓՈՒՄԻ ԲՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԵՎ  
ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա.04.10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի զիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2023

---

THE MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORT OF RA  
RUSSIAN-ARMENIAN UNIVERSITY

HAYRAPETYAN DAVID BORIS

INVESTIGATION OF ELECTRODYNAMIC AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF  
ZERO-DIMENSIONAL QUANTUM STRUCTURES

SYNOPSIS

of dissertation on the specialization A.04.10 – “Physics of Semiconductors”  
submitted for the degree of doctor in physical-mathematical sciences

YEREVAN – 2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայ-Ռուսական համալսարանում

Գիտական խորհրդատու՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր, Է.Մ. Ղազարյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Գ. Բեսսեր  
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Բ. Գարուֆալիս  
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Կ.Հ. Ահարոնյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ղանիայի տեխնիկական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2024թ. հունվարի 26-ին, ժամը 12:30-ին Հայ-Ռուսական համալսարանի 052 “Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա” մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0051, ք. Երևան, Հ. Էմին 123:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՌՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2023թ. դեկտեմբերի 25-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար՝



ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր  
Ե.Գ. Մամասախլիսով

---

The topic of dissertation is approved in the Russian-Armenian University

Scientific supervisor:

D.Sc., Prof. E.M. Ghazaryan

Official opponents:

D.Sc., Prof. G. Bester

D.Sc., Prof. C. Garoufalis

D.Sc., Prof. K.H. Aharonyan

Leading institution:

Technical University of Denmark

The dissertation defense will take place on January 26th, 2024, at 12:30, during the meeting of the Supreme Certifying Committee Specialized Council 052 “Physics of semiconductors” at Russian-Armenian University (123 H. Emin, Yerevan 0051, Armenia).

The dissertation is available at the library of Russian-Armenian University.

The Synopsis was sent on December 25th, 2023.

Scientific secretary of  
specialized council



PhD,  
E.Sh. Mamasakhlisov

## Relevance of the scientific research

Currently, we find ourselves amidst the Second Quantum Revolution, harnessing the quantum attributes of materials to engineer a new generation of computers, computational systems, and telecommunication devices. Cutting-edge technologies are emerging, capitalizing on individual quantum states and unique features like superposition and entanglement. In this context, quantum computing draws heavily from the conceptual and technological advancements in semiconductor nanophysics, specifically relying on variously shaped and sized quantum dots (QDs) to establish qubits within these systems. Given this, the imperative study of semiconductor QDs for their integration into quantum computing applications becomes evident.

## The main objectives of the dissertation

The goals of the dissertation work are as follows:

- Investigate direct interband light absorption in spherical and cylindrical QDs using modified Pöschl–Teller and Morse potentials, with a focus on providing a more realistic description of charge carrier behavior.
- Study one-electron states in prolate and oblate spheroidal QDs, exploring their potential applications in near-infrared detectors, optical sensors, and QD LEDs.
- Analyze the binding energy and oscillator strength of hydrogen-like donor impurities in strongly oblate and prolate ellipsoidal QDs, employing the variational method.
- Calculate the exciton, negative and positive trions, and biexciton states in strongly prolate ellipsoidal QDs using the variational method, emphasizing their potential as one and two-photon sources.
- Investigate exciton and biexciton behavior in ellipsoidal QDs under the influence of intermediate light fields, and analyze the resulting changes in optical properties and recombination lifetimes.
- Demonstrate the Talbot effect in vertically coupled cylindrical QD ensembles, shedding light on their potential applications in modulated coupling fields.
- Investigate the parabolic confinement potential in strongly oblate ellipsoidal QDs, and explore its potential for resonance frequency control through geometric adjustments.
- Examine the implementation of the generalized Kohn theorem for a gas of heavy holes in lens-shaped Ge/Si QDs, showcasing the formation of a two-dimensional parabolic confining potential.
- Obtain analytical expressions for the electron energy spectrum and wave function of core/shell/shell spherical QDs with Kratzer confining potential, and study the resulting dipole and quadrupole moments.
- Theoretically investigate the linear and nonlinear intraband optical properties of colloidal spherical CdSe/CdS core/shell QDs in the presence of a donor impurity in the center.
- Study the electronic states and optical properties of conical QDs made of GaAs, and explore their potential as base elements for QD LEDs.
- Investigate the electronic states and optical properties of conical QDs in the presence of an external electric field, examining the effects on electron localization and energy levels.

## Scientific novelty

- *Impurity Behavior in Ellipsoidal Quantum Dots*: The examination of hydrogen-like donor impurities in strongly oblate and prolate ellipsoidal quantum dots, using the variational method, uncovers non-monotonic dependencies and reveals novel behaviors in impurity position-dependent oscillator strengths.
- *Excitonic Complexes in Prolate Ellipsoidal Quantum Dots*: The analysis of exciton, negative and positive trions, and biexciton states in strongly prolated ellipsoidal quantum dots provides valuable insights into their binding and recombination energies, offering new possibilities for controlling radiative lifetimes.
- *Intermediate Light Field Effects*: The investigation of exciton and biexciton behavior in ellipsoidal quantum dots under the influence of intermediate light fields (ILF) represents a novel approach, shedding light on the impact of external influences on excitonic complexes.
- *Talbot Effect in Vertically Coupled Quantum Dots*: The demonstration of the Talbot effect in vertically coupled cylindrical quantum dots under the influence of probe and modulated coupling fields, utilizing the double MPTP model, provides a unique insight into their behavior under controlled conditions.
- *Generalized Kohn Theorem in Ge/Si Quantum Dots*: The presentation of experimental results suggesting the implementation of the generalized Kohn theorem for heavy holes in the lens-shaped Ge/Si quantum dots introduces a new understanding of confinement potentials in specific geometries.
- *Core/Shell/Shell Spherical Quantum Dots*: The derivation of analytical expressions for the electron energy spectrum and wave function, along with the study of dipole and quadrupole moments, provides a unique perspective on impurity electron leakage and electrostatic field behavior.
- *Effect of External Electric Field in Conical Quantum Dots*: The investigation of energy levels and wave functions in conical quantum dots under the influence of an external electric field offers fresh insights into the behavior of electron localization and energy in response to applied fields.

## Scientific and practical impact

The findings presented in this dissertation hold significance both in academic and practical domains. On an academic front, novel numerical and simulation techniques have been established to analyze the linear and nonlinear optical characteristics of semiconductor nanostructures. In practical terms, QDs systems emerge as promising contenders for utilization in quantum technologies, particularly in quantum computing. Alternatively, QDs can be employed in QD-based LED technologies to achieve RGB output.

## Dissertation structure

The dissertation begins with a “**List of Abbreviations and Notations Used in the Dissertation**”. It is followed by “**Introduction**”, which formulates the relevance of the proposed work. After the literature overview and description of the current state of the problem, the main statements of the work have been listed.

**Chapter I** is devoted to the theoretical investigation of spherical and cylindrical quantum dots with various confinement potential models in different size quantization regimes. This Chapter consists of four sections.

**Section 1.1** is devoted to the investigation of spherical QD with modified Pöschl-Teller potential (MPPT). Based on the obtained results for the energy states and wave functions interband light absorption spectra have been calculated for the ensemble of quantum dots.

To compare the results with the experimental ones the dispersion of the geometric size of QDs should be taken into account. It should be noted that taking into account the geometric dispersion, the study of light absorption will lead to a series of blurring lines instead of clear lines of maxima of the absorption frequencies. During the growing process of QD's ensemble, depending on the technological parameters of the growth, symmetrical or asymmetrical distribution of the geometric parameters of QD around certain average values may occur.

To describe the symmetric distribution of the geometrical parameters around the average value, the Gaussian distribution function is used, and for asymmetrical - the Lifshits-Slezov and gamma functions. Forms of these functions are given below:

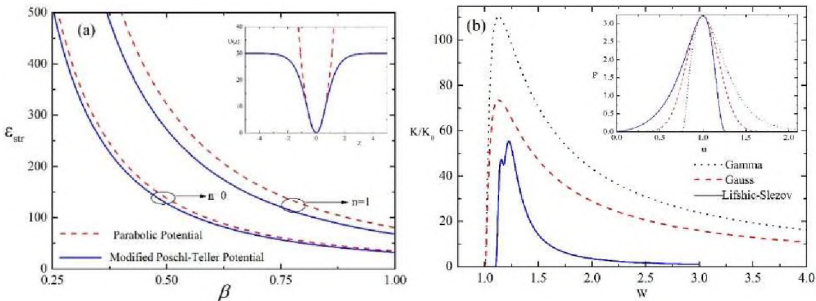
$$P_{GS}(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(u-1)^2}{2(\sigma/\eta)^2}\right\},$$

$$P_{LS}(u) = \begin{cases} \frac{3^4 eu^2 \exp(-1/(1-2u/3))}{2^{5/3}(u+3)^{7/3}(3/2-u)^{11/3}}, & u < 3/2 \\ 0, & u > 3/2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$P_{GM} = \frac{2^{-\nu/2} e^{-u/2} u^{-1+\nu/2}}{\Gamma(\nu/2)},$$

where the variable  $u$  is the ratio of dispersive parameters to their average values.

Figure 1 (a) shows the dependence of the energy of the particle from the half-width of the quantum dot confining potential for MPPT and the parabolic potential. Figure 1 (b) shows the dependence of the summary absorption coefficient for first forth levels on the frequency of the incident light for the ensemble of spherical QDs with MPPT. Inset shows a comparison of three distribution functions for which absorption coefficients are calculated.



**Figure 1.** (a) The dependence of particle energy from half-width of confining potential in spherical QD with MPPT and parabolic potential in strong size quantization regime. (b) The dependence of the absorption coefficient on the frequency of the incident light for the ensemble of spherical QDs.

**Section 1.2** is dedicated to the investigation of absorption spectra of an electron in cylindrical QD with MPTP, while **Sections 1.3** and **1.4** dedicated to the investigation of effects of hydrostatic pressure on the donor impurity exciton states and interband absorption in a cylindrical quantum dot with Morse confining potential.

There is a necessity to take into account the dependence of the effective mass, dielectric constant, as well as the parameters of the Morse potential of the pressure and temperature for calculating the effect of hydrostatic pressure on the energy levels of electrons and holes. In this case we must rewrite the Hamiltonian of the system under consideration of hydrostatic pressure and temperature effect:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_p^*(P,T)}\vec{\nabla}^2 + V(\vec{r},P,T) - \frac{e^2}{\kappa(P)\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (2)$$

where  $V(\vec{r},P,T) = V_{MP}(z,P,T) + V_{PP}(\rho,P,T)$  is the sum of confining potentials in axial and radial directions:

$$V_{MP}(z,P,T) = A_1 + A_2 \left( e^{-2\frac{z}{\beta(P)}} - 2e^{-\frac{z}{\beta(P)}} \right), \quad (3)$$

$$V_{PP}(\rho,P,T) = \frac{m_p^*(P,T)\omega(P)^2 \rho^2}{2}$$

Dependence of electron effective mass on the hydrostatic pressure and temperature, can be written in following form.

$$m_e^*(P,T) = \left[ 1 + \frac{15020}{E_g(P,T)} + \frac{7510}{E_g(P,T) + 341} \right]^{-1} m_0, \quad (4)$$

for bulk GaAs bandgap -  $E_g(P,T)$  we have:

$$E_g(P,T) = \left( 1519 + 10.7P - \frac{0.5405T^2}{T + 204} \right) meV \quad (5)$$

where  $m_0$  - is the free electron mass. In this problem we consider the heavy hole case,

$$m_{hh}^*(P) = m_0 \left( 0.45 - 0.1 \times 10^{-3} P \right), \quad (6)$$

Note also that effect of temperature on the effective mass of heavy hole is absent. Hydrostatic pressure and temperature influence on dielectric constant of *GaAs* is given by:

$$\kappa(P,T) = \kappa_a e^{\alpha_1 P + \alpha_2 T}, \quad (7)$$

where  $\kappa_a$  - permittivity of material. Note that constants in (7) are changed depending on the temperature, specifically  $T \leq 200K$  -  $\kappa_a = 12.65$ ,  $\alpha_1 = -1.67 \times 10^{-3} kbar^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 9.4 \times 10^{-5} K^{-1}$  and  $T > 200K$  -  $\kappa_a = 12.29$ ,  $\alpha_1 = -1.73 \times 10^{-3} kbar^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 20.4 \times 10^{-5} K^{-1}$ .

The pressure-dependent characteristic sizes of cylindrical QD, which are obtained from the fractional change in the sample volume:

$$R(P) = R(0) \left( 1 + \eta_1 \times 10^{-3} P \right), \quad h(P) = h(0) \left( 1 + \eta_2 \times 10^{-3} P \right), \quad (8)$$

where  $\eta_1 = -1.9$ ,  $\eta_2 = -4.9$ .

**Chapter II** is devoted to the investigation of optical properties of ellipsoidal and spheroidal quantum dots. This Chapter consists of four sections.

In **Section 2.1** binding energy and photoionization cross-section of hydrogen-like donor impurity in strongly oblate ellipsoidal quantum dot have been presented.

According to the variational method, the expression for the electron energy has the following form:

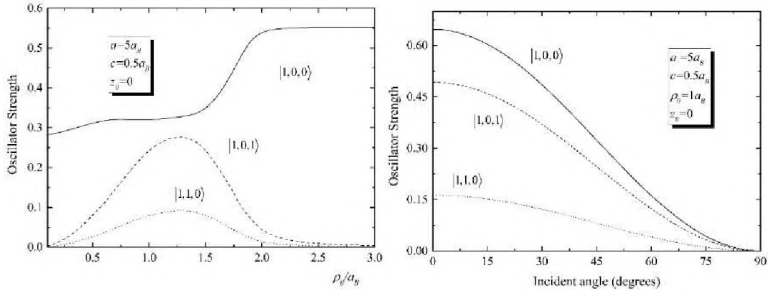
$$\varepsilon_{total}(\lambda) = \int_{-c}^c \int_0^{2\pi} \int_0^a \Psi^* (\rho, \varphi, z) \hat{H} \Psi (\rho, \varphi, z) \rho d\rho d\varphi dz. \quad (9)$$

After the minimization of the  $\varepsilon_{total}(\lambda)$  energy over  $\lambda$ , we get the energy of the electron with impurity  $\varepsilon_{imp}$  in the QD. Note that electron energy  $\varepsilon_{imp}$  calculated by the help of variational method has been compared with the energy calculated by the exact numerical method. The relative difference between two energies for the geometrical parameters  $c = 0.5a_B$  and  $a = 5a_B$  are 2.64%. It is clear that this accuracy is caused by the high accuracy of adiabatic method for such fixed parameters, when the ellipsoid has a pronounced oblate character. The binding energy of the electron will be defined as the difference between the electron energy without and with impurity:

$$\varepsilon_{bind} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{imp}. \quad (10)$$

Squared dipole matrix element of the optical transition describes the probability of transition and it is proportional to the oscillator strength of the transition. The dependence of the oscillator strength on the radial coordinate  $\rho_0$  is represented in Figure 2 (a) for the first three energy levels.

As expected, the oscillator strength is bigger for the ground state. It is obvious that the value of oscillator strength depends on the angle of incidence of the light. The angle of incidence is the angle between the normal directed along the Z axis and the direction of light propagation. This dependence illustrated in the Figure 2 (b). For all levels, the oscillator strength monotonically decreases with the increase of the incident angle and tends to the zero.



**Figure 2.** The dependence of the oscillator strength on the radial coordinate of the impurity  $\rho_0$  for the first three energy levels (a) and on the incident angle for the first three energy levels (b).

**Section 2.2** investigated the same dependences but for strongly prolate ellipsoidal quantum dot, while **Sections 2.3** and **2.4** are devoted to the investigations of oblate spheroidal quantum dot, namely electronic states, direct interband light absorption and pressure dependence, and prolate spheroidal quantum dot, namely electronic states, direct interband light absorption and electron dipole moment, respectively.

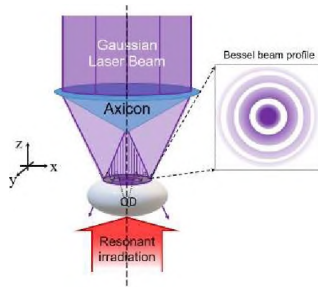
**Chapter III** is devoted to the investigation of excitonic complexes, such as excitons, negative and positive trions, biexcitons in ellipsoidal and cylindrical quantum dots. This Chapter consists of four sections.

In **Section 3.1** binding energy and photoionization cross-section of hydrogen-like donor impurity in strongly oblate ellipsoidal quantum dot have been presented. The calculation of the quasiparticles' energies allows to obtain the binding energy for each one. The binding energies are defined below:

$$\begin{aligned}
 E_X^{bind} &= (E_e + E_h) - E_X, \\
 E_{X^-}^{bind} &= (2E_e + E_h) - E_{X^-}, \\
 E_{X^+}^{bind} &= (E_e + 2E_h) - E_{X^+}, \\
 E_{XX}^{bind} &= 2E_X - E_{XX},
 \end{aligned} \tag{11}$$

where  $E_e$  and  $E_h$ , respectively, the energies of the electron and hole in the ellipsoidal QD. The binding energy of the exciton is determined from the ratio of the non-interacting electron-hole pair and the binding energy of the biexciton is relative to the two non-interacting monoexcitons. In **Section 3.2** relativistic correction of biexciton fine structure in ellipsoidal quantum dots have been calculated. First of all, let us mention that the relativistic correction energy has a small impact on the biexciton energy since its order is about  $E_{RC} \sim 10^{-6} meV$ . It is worth mentioning that the relativistic correction of the same order has been obtained by a number of authors for the hydrogenic electron in quantum dots with different shapes. And in second, relativistic correction energy of the biexciton fine structure is always negative and it decreases the energy.

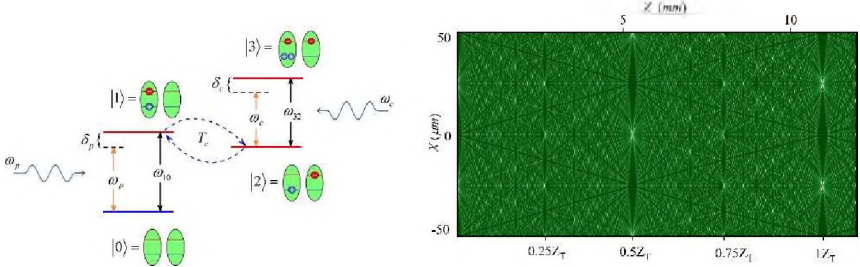
In **Section 3.3** the impact of intense laser Bessel beam on excitonic complexes in ellipsoidal quantum dot have been discussed. Our theoretical study analyzes the response of ellipsoidal QD to an Intense Laser Field (ILF) with a Bessel intensity profile at non-resonant extreme violet and resonant radiation at mid-infrared wavelengths. Both beams are linearly polarized along the  $z$ -axis. The possible experimental setup (Figure 3) involves first illuminating the QD with a resonant mid-infrared beam, which excites excitonic and biexcitonic states within the QD. Subsequently, the non-resonant Bessel beam is applied to the system. To generate the Bessel beam, a variety of techniques, such as an annular slit placed at the focal plane of a lens, optical, or diffractive axicons, or a spatial light modulator can be utilized. Each of these methods enables the creation of a laser beam with a specific Bessel intensity profile, which can be tailored to suit the required parameters.



**Figure 3.** Schematic of the simultaneous illumination of a strongly oblate ellipsoidal quantum dot with a non-resonant ultraviolet Bessel beam and resonant mid-infrared irradiation. The optical



axicon is implemented to generate a non-diffracting Bessel beam, as illustrated by the transverse intensity profile shown in the inset. And finally in **Section 3.4** the possibility of realizing of Talbot effect in coupled cylindrical quantum dots ensemble have been presented using four-level ladder-type system.



**Figure 4.** (a) The energy diagram of the four-level ladder-type *InAs/GaAs* coupled cylindrical QDs system. (b) The formation of Talbot carpet from vertically coupled cylindrical QDs ensemble.

The four levels of the ladder type system are described in the following section. A ground state  $|0\rangle$  of the system is taken to be the state where the electron-hole pair is not yet generated. The first excited state  $|1\rangle$  is taken to be the state when the electron-hole pair is localized in the first QD (direct exciton). As the second excited state  $|2\rangle$ , a state is taken where the hole is localized in the first QD and the electron is in the second QD (indirect exciton). And finally, the third excited state  $|3\rangle$  is defined by the direct and indirect excitons (biexciton) in a vertically coupled QD system (Figure 4 (a)).

For achieving Talbot carpet from a medium obtained from a cylindrical coupled QD ensemble the tunneling-induced transparency occurs. As the coupling field has periodical intensity distribution the absorption of the medium as a whole will also have a periodical character. Thus, the probe field passing through the tunneling-induced periodically transparent medium will be diffracted and a Talbot carpet will be formed at the near field. The simulation showed that in the case where the tunneling effect  $T_e = 0$  is absent the Talbot carpet was not observed. Thus, the carpet is simulated in the case of the maximum value of the tunneling parameter  $T_e = \Gamma$  (Figure 4 (b)). In the figure, we clearly can see the Talbot images at Talbot half-distances. Moreover, we can discern the revivals of Talbot sub-images shifted with doubled, tripled, and quadrupled frequencies at  $Z_T/2$ ,  $Z_T/3$ ,  $Z_T/4$  distances. It is shown that revivals at half-distances exhibit phase shifts which are typical for the Talbot phenomenon.

**Chapter IV** is devoted to the implementation of Kohn's theorem for quantum dots with oblate and prolate geometries. This Chapter consists of four sections.

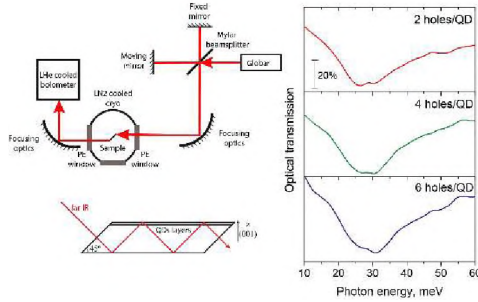
In **Section 4.1** implementation of Kohn's theorem for the oblate ellipsoidal quantum dot have been presented, implementation of Kohn's theorem for the oblate ellipsoidal quantum dot in the presence of external magnetic field is included in **Section 4.2**, realization of the Kohn's theorem

in Ge/Si quantum dots with hole gas is presented in **Section 4.3** and finally, in **Section 4.4** the implementation of Kohn’s theorem for the prolate ellipsoidal quantum dot have been involved. To construct the theoretical model, we note those important provisions, which underlie the proposed theory and are implemented in the experiment:

1. QD contains few-particle gas (particularly, gas of heavy holes);
2. The effective mass of particles is scalar;
3. The QD has specific geometry, which allows dividing the particle’s motion into “fast” and “slow”;
4. The incident perturbation on the system is long-wavelength.

It is important to note that QDs in the experiment are MBE grown Ge dots in Si matrix with a deep potential well in the valence band for holes. Special attention should be paid to possible coupling of the heavy and light hole states in this case. However, numerical estimations show that in case of Ge/Si QDs, the low-level QD states are formed mainly by the heavy hole states and the intermixing effects of the heavy and light hole states can be neglected due to both the small value of the light hole effective mass in Ge and the strong vertical confinement. As a result, one can consider the holes in QD as a heavy hole gas characterized by the scalar effective mass, non-interacting with light hole band, and thus one can write the multiparticle Hamiltonian with scalar effective mass  $\mu$ .

Measured transmission spectra of doped QD samples are plotted in Figure 5 together with the experiment schematics. All doped samples demonstrate a broadened absorption peak with the center at about 30 meV. Moreover, the shape and position of the absorption peaks seems to be the same for the structures with nominal doping of 2, 4, and 6 holes per dot, or, in other words, independent of the number of holes in the QDs.



**Figure 5.** Experiment schematics and the measured far-IR transmission spectra of the Ge/Si quantum dot structures with different doping levels at 80 K. The labels at the curves indicate the nominal doping level.

For resonant frequencies  $\Omega$  in the case of a plane-convex lens, we can immediately write:

$$\Omega = \frac{\pi \hbar}{\mu} \left( \frac{1}{R_1 h_1^3} \right)^{1/2} \quad (12)$$

For the parameters given above, the theoretically calculated energy gives the value:

$$\hbar \Omega_{\text{theor}} \approx 31 \text{ meV} \quad (13)$$

In turn, the experimentally measured value of the energy of the resonant transitions in the center of the broadened absorption band that, again, corresponds to large dots, is

$$\hbar\Omega_{\text{exp}} \simeq 30 \text{ meV} \quad (14)$$

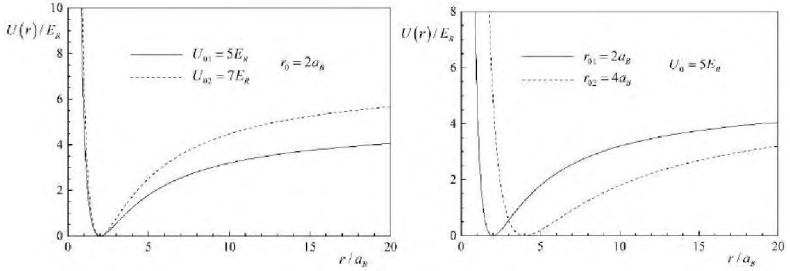
Thus, there is very good consistency between the experimentally found and theoretically calculated values of the resonant transition energies. Therefore, we observe the single-particle-like optical transitions in the multi-particle system with the pair Coulomb interaction.

**Chapter V** is devoted to the investigation of electronic and optical properties of core/shell nanostructures. This Chapter consists of five sections.

There are confinement potentials, which can well describe core/shell/shell structure, and on the other hand in the case of impurity placement in the center of the nanolayer, allow us to give an exact analytical solution of the Schrodinger equation. This problem considered in **Section 5.1**. One of them is a molecular Kratzer potential having the following form:

$$U(r) = \frac{\alpha}{r^2} - \frac{\beta}{r} + U_0, \quad (15)$$

where  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $U_0$  characterize the sample. Profiles of the potential are presented in Figure 6 for different values of its parameters. Here  $U_0$  describes the height of the potential at the "nanostructure - environment" transition. Important specific feature of this potential is the finiteness at the outer boundary. Due to this feature the impurity electron can leakage into the environment.



**Figure 6.** Profiles of Kratzer potential for different values of its parameters: (a)  $r_{01} = 2a_B$ ,  $r_{02} = 4a_B$ ,  $U_0 = 5E_R$ ; b)  $r_0 = 2a_B$ ,  $U_{01} = 5E_R$ ,  $U_{02} = 7E_R$ .

In **Section 5.2** linear and nonlinear optical absorption of *CdSe/CdS* core/shell quantum dot in the presence of donor impurity have been presented. The optical transitions in semiconductor nanospherical core/shell/shell heterostructure in the presence of radial electrostatic field have been investigated in **Section 5.3**, while the exciton states and optical absorption in core/shell/shell spherical quantum dot have been presented in **Section 5.4**. Finally, in **Section 5.5** the modelling of quantum dots with the finite element method have been performed.

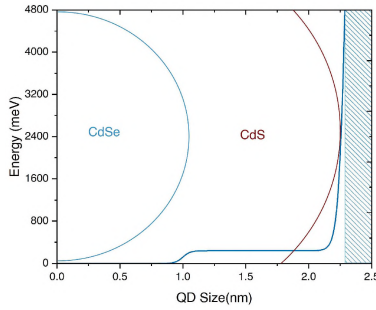
In such a system we have to take into account the change of the effective mass, dielectric permittivity, and potential depth and the effects caused by the diffusion. The  $V(x, y, z)$  will have to change to a more complex form like a piecewise Woods-Saxon potential. For the sake of showcasing both the effective mass and the dielectric constant anisotropy we will consider a system with a hydrogen-like impurity at the center that has the following Hamiltonian:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(x, y, z) + V\psi(x, y, z) + \frac{2e^2}{\epsilon_0 \sqrt{(\vec{r} - r_0)^2}} = E\psi(x, y, z), \quad (16)$$

where  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  - is the radius vector for the electron. For modeling the band structure of a spherical *CdSe/CdS* core/shell structure we can use:

$$V(r) = \begin{cases} V(r) = (V_0^{CdS} - V_0^{CdSe}) \frac{V_0^{CdS} - V_0^{CdSe}}{1 + \exp[(r - R_{core})/\alpha]}, & r < R_{core} \\ V(r) = V_0^{CdS} - \frac{V_0^{CdSe}}{1 + \exp[(r - R_{core})/\alpha]}, & r \geq R_{core} \\ V(r) = \infty, & r \geq R_{shell} \end{cases}, \quad (17)$$

Here the  $V_0^{CdSe} = 4.8eV$ ,  $V_0^{CdS} = 4.9eV$  - is the position of the conduction band minimum for *CdSe*, *CdS* respectively,  $R_{core}$  - is the core radius in our case *CdSe* region,  $R_{shell}$  is the shell radius in our case *CdS* region,  $\alpha$  - is a transition smoothness parameter which varies with the degree of diffusion. You can see the potential form in Figure 7.



**Figure 7.** Piecewise Woods-Saxon Potential plotted for the following parameters:  $R_{core} = 1nm$ ,  $R_{shell} = 1.3nm$ ,  $\alpha_{core} = 0.03$ .

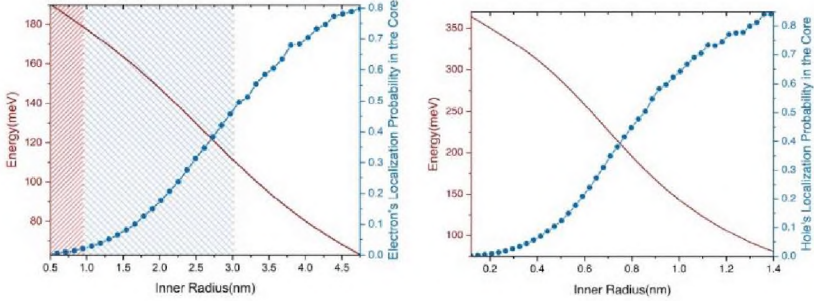
The effective mass and dielectric permittivity can be defined by a standard Woods-Saxon potential:

$$m^*(r) = m_{CdS}^* - \frac{m_{CdS}^* - m_{CdSe}^*}{1 + \exp\left[\frac{r - R_{core}}{\alpha}\right]} \quad (18)$$

Here  $m_{CdSe}^* = 0.112 \cdot m_0$ ,  $m_{CdS}^* = 0.25 \cdot m_0$  - are the electron effective masses in the respective materials.

$$\epsilon_0(r) = \epsilon_{CdS} - \frac{\epsilon_{CdSe} - \epsilon_{CdS}}{1 + \exp\left[\frac{r - R_{core}}{\alpha}\right]} \quad (19)$$

Here  $\epsilon_{CdSe} = 9.29$ ,  $\epsilon_{CdS} = 8.28$  - are the dielectric permittivity constant of the respective materials.



**Figure 8.** The segmented blue line is the probability density of the particle's ground state localized in the core region, the solid red line is the ground state energy of the particle depending on the inner core size for an electron (a) and a hole (b). In Figure (a) you can see three regions the region that has a red patterns represents the core radii where the localization probability of the hole in the core is less than 50%. The second region represented by the red and blue pattern shows the core radii where the hole's localization probability in the core is larger than 50% but the electron's localization probability is lower than 50%. The third region does not have pattern, and shows the core radii where the both hole's and electron's localization probability in the core are larger than 50%.

Quasi type-II structures are actively investigated experimentally. For example, in [14], the authors have investigated the temperature dependence of the spectral properties such as the band gap, bandwidth, and fluorescence intensity of *CdSe/CdS* dot-in-rod nanocrystals. Quasi type-II structures were synthesized with core sizes of  $R_{core} = 2.3nm$ . The values for quasi-type-II structure core size obtained by our calculations are very close to the experimental values, which attests to the quality of our chosen model.

Overall, we can say that the FEM can not only be used to model one material QDs but core/shell, core/shell/shell, or dot in bulk structures successfully. Even allowing us to obtain structures with quasi type-II band alignment.

And finally, **Chapter VI** is devoted to the investigation of electronic and optical properties of conical quantum dots. This chapter consists of four sections.

In **Section 6.1** direct interband light absorption and in **Section 6.2** magneto-absorption in conical quantum dot have been investigated. In **Section 6.3** the dipole moment of conical quantum dot and in **Section 6.4** electronic states in conical quantum dot in the presence of electric field have been presented.

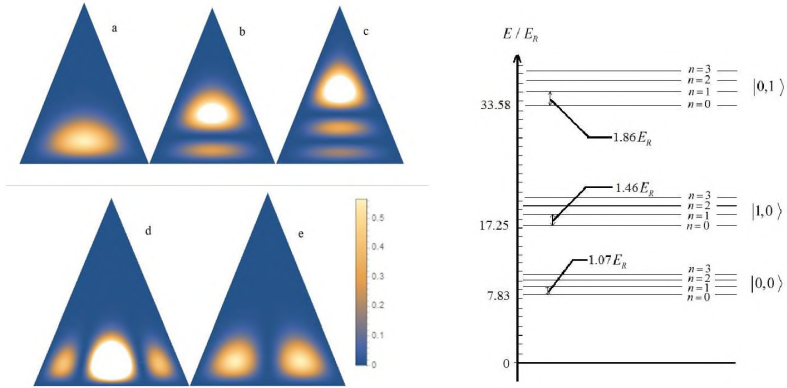
The electronic states in all cases have been found in the framework of the geometrical adiabatic approximation. To compare, the energies of the ground and first excited levels in the adiabatic approximation, in the adiabatic approximation with the quadratic and cubic corrections, and for two above-mentioned numerical methods are given in Table 1.

**Table 1.** Ground-state energies ( $R = 0.5a_B$ ) for the adiabatic approximation, the adiabatic approximation with the quadratic and cubic corrections, the finite element method (FEM) and the Arnoldi method.

$H/R$	8	12	16	20	24	26
The adiabatic approximation	29.794	28.216	27.329	26.749	26.335	26.022
The adiabatic approximation with the quadratic correction	36.189	31.764	29.448	28.175	27.369	26.812
The adiabatic approximation with cubic correction	36.811	33.150	30.096	28.533	27.589	26.956
FEM	38.375	34.225	32.075	30.735	29.800	29.111
The Arnoldi method	38.287	34.157	32.017	30.683	29.758	29.089

Table 1 shows that the deviation of the adiabatic method from the exact value becomes smaller with an increase in the ratio  $H/R$ . A similar picture is observed when one uses the combined adiabatic approximation method with the quadratic and cubic corrections, with the only difference that these methods give good results even at the relatively small values of  $H/R$ . Also, note that the values obtained by numerical methods are close to each other.

Figure 9 shows the probability density of the electron distribution in the conical QD cross-section. As seen from the figure, with the increase in the quantum number  $n$ , the region of electron localization shifts in the  $z$ -direction from the base of the cone. Note also that with an increase in the quantum number  $n$ , the additional maxima of the probability density arise. The density of the probability distribution in the conical QD cross-section for first excited levels with  $m=1$  and  $n_\rho=1$  are shown in Fig. 9 (d) and (e), respectively.



**Figure 9.** Probability density of the electron distribution in the conical QD cross-section: (a)  $n_\rho = 0, m = 0, n = 0$ , (b)  $n_\rho = 0, m = 0, n = 1$ , (c)  $n_\rho = 0, m = 0, n = 2$ , (d)  $n_\rho = 0, m = 1, n = 0$ , (e)  $n_\rho = 1, m = 0, n = 0$ , (f) Energy-level diagram of the elongated conical QD.

The key findings of the dissertation are presented in **Conclusion**. After that, the list of **References** is brought, followed by the **List of Published Works on the Dissertation Topic** and **Acknowledgments**.

## References

1. Tan, C., Chen, J., Wu, X.J. and Zhang, H., 2018. Epitaxial growth of hybrid nanostructures. *Nature Reviews Materials*, 3(2), pp.1-13.
2. Barker, J.A. and O'Reilly, E.P., 1999. The influence of inter-diffusion on electron states in quantum dots. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 4(3), pp.231-237.
3. Maksym, P.A. and Chakraborty, T., 1990. Quantum dots in a magnetic field: Role of electron-electron interactions. *Physical review letters*, 65(1), p.108.
4. Baskoutas, S. and Terzis, A.F., 2006. Size-dependent band gap of colloidal quantum dots. *Journal of applied physics*, 99(1), p.013708.
5. Mei, W., Zhang, Z., Zhang, A., Li, D., Zhang, X., Wang, H., Chen, Z., Li, Y., Li, X. and Xu, X., 2020. High-resolution, full-color quantum dot light-emitting diode display fabricated via photolithography approach. *Nano research*, 13, pp.2485-2491.
6. Tonkikh, A.A. and Werner, P., 2013. Surfactant-mediated Stranski-Krastanov islands. *physica status solidi (b)*, 250(9), pp.1795-1798.
7. Kohn, W., 1961. Cyclotron resonance and de Haas-van Alphen oscillations of an interacting electron gas. *Physical Review*, 123(4), p.1242.
8. Narvaez, G.A., Bester, G. and Zunger, A., 2005. Excitons, biexcitons, and trions in self-assembled (In, Ga) AsGaAs quantum dots: Recombination energies, polarization, and radiative lifetimes versus dot height. *Physical Review B*, 72(24), p.245318.
9. Fonoberov, V.A. and Balandin, A.A., 2004. Origin of ultraviolet photoluminescence in ZnO quantum dots: Confined excitons versus surface-bound impurity exciton complexes. *Applied physics letters*, 85(24), pp.5971-5973.
10. Costanzo, S., 2017. Localized Bessel beams: Basic properties and emerging communication applications. *Wave Propagation Concepts for Near-Future Telecommunication Systems*.
11. Van Roosbroeck, W. and Shockley, W., 1954. Photon-radiative recombination of electrons and holes in germanium. *Physical Review*, 94(6), p.1558.
12. Wen, J., Du, S., Chen, H. and Xiao, M., 2011. Electromagnetically induced Talbot effect. *Applied Physics Letters*, 98(8).
13. Müller, K., Bechtold, A., Ruppert, C., Zecherle, M., Reithmaier, G., Bichler, M., Krenner, H.J., Abstreiter, G., Holleitner, A.W., Villas-Bôas, J.M. and Betz, M., 2012. Electrical control of interdot electron tunneling in a double InGaAs quantum-dot nanostructure. *Physical review letters*, 108(19), p.197402.
14. Wen, X., Sitt, A., Yu, P., Toh, Y.R. and Tang, J., 2012. Temperature dependent spectral properties of type-I and quasi type-II CdSe/CdS dot-in-rod nanocrystals. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14(10), pp.3505-3512.
15. Vajner, D.A., Rickert, L., Gao, T., Kaymazlar, K. and Heindel, T., 2022. Quantum communication using semiconductor quantum dots. *Advanced Quantum Technologies*, 5(7), p.2100116.

## The main statements of the dissertation

The goals of the dissertation work are as follows:

- Permitting interband transitions between arbitrary axial quantum numbers in cylindrical quantum dots, governed by Morse and MPTP potentials.
- Increase of absorption edge (blue shift) with the increase of external hydrostatic pressure for the donor impurity in cylindrical QD with Morse potential.
- Cupola-shaped character of the oscillator strength for the transitions between states with and without impurity center in strongly oblate ellipsoidal QD depending on the impurity position.
- Proofing the validity of geometrical adiabatic approximation with comparison to exact numerical calculations and finding applicability regions of three size quantization regimes for the oblate and prolate spheroidal QDs.
- Equality of relativistic correction energy magnitude for the biexciton in oblate ellipsoidal QD to  $10^{-6} meV$ .
- Enhancement of exciton and biexciton recombination radiative lifetimes in ellipsoidal QDs due to the influence of an ILF, resulting in lifetimes on the order of nanoseconds.
- Formation of Talbot carpet with 11mm Talbot distance from *InAs/GaAs* cylindrical coupled QD ensemble via tunneling-induced transparency at the near field for the 2700nm probe field.
- Realization of Kohn's theorem for the QDs exhibiting both oblate and prolate characteristics, encompassing ellipsoidal and lens-shaped QDs, in the presence and absence of an external magnetic field.
- Consistency between the experimentally measured ( $\approx 30 meV$ ) and theoretically calculated ( $\approx 31 meV$ ) values of the resonant transition energies for the few-hole gas in the oblate lens-shaped QD.
- Feasibility of shifting from type-I to quasi type-II structure by changing the sizes of CdSe/CdS core/shell QD with the critical value 2.3nm of the core size.
- Equivalence to zero the dipole correction to the electrostatic field for the core/shell/shell QD, modeled with Kratzer confinement potential, subsequently quadrupole correction calculation, which is a tensor and depends on the quantum numbers
- Possibility of modelling RGB LED devices based on conical QDs ensemble, since the interband transition frequency between energy levels of conical QD falls into the visible part of spectrum and can be precisely controlled through size adjustments.

## Approbation of the work

The main results obtained in this dissertation work were discussed during scientific seminars of the Department of General Physics and Quantum Nanostructures of the Engineering Physics Institute of Russian-Armenian University, Armenia, Department of Material Science of University of Patras, Greece, Department of Chemistry of Hamburg University, Germany, Institute of Nanotechnology (CNR Nanotec), Italy, "B-PHOT" Brussels Photonics Group of Vrije Universiteit Brussel, Belgium, Chair of Physical and Theoretical Chemistry of Saarland University, Germany, Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, Department of Semiconductor Physics of



Riga Technical University, Latvia, as well as were reported at the following local and international scientific conferences and schools:

- The 8th Nanotech France 2023 International Conference and Exhibition, 28-30 June, Paris, France.
- School NanoQIQO: School on Optics and Photonics (SOP-2023), 15-20 May, Yerevan, Armenia.
- Russian-Armenian Workshop on perspective scientific directions, 8-9 December, Yerevan, Armenia.
- Pan-Armenian Conference 2022, 26 September - 01 October, Vanadzor, Armenia.
- Global Summit on Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (GSSON-2022), March 23-25, 2022, Dubai, UAE.
- 6<sup>th</sup> International Advanced School Frontiers in Optics & Photonics (FOP-2021), 30 August - 11 September, 2021 Yerevan - Ashtarak, Armenia.
- Summer school Electronic and Optical Properties of Nanomaterials, 12-16 July, 2021.
- International School on Optics and Photonics (ISOP-2019), 1-7 July, 2019, Yerevan, Armenia.
- 7<sup>th</sup> International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2018), 4-12 July, Kolymbari, Crete, Greece.
- 5<sup>th</sup> International Advanced School on “Frontiers in Optics & Photonics” (FOP-2018), 22-27 June, 2018, Yerevan-Ashtarak, Armenia.
- International School on Metamaterials and Nanotechnologies, 24-28 December, Tsakhkadzor, Armenia, 2017.
- Armenian Wolfram Technology Conference 2017, 23-24 September, Yerevan, Armenia, 2017.
- Laser Physics 2017 Conference, 19-22 September, Ashtarak, Armenia, 2017.
- School Natural Science and Applications, 26-28 August, Tsakhkadzor, Armenia, 2017.
- Conference Devoted to the 75 Anniversary of E.M. Kazaryan, Russian-Armenian University, February 23-24, Yerevan, Armenia, 2017.
- 11th Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 5-9 December, Yerevan, Armenia, 2016.
- 3rd Russian School of young Scientists, St Petersburg, 21-25 June, 2016.
- Energy Materials and Nanotechnology (EMN) Guangzhou Meeting, December 3-6, Guangzhou, China, 2015.
- School on Anomalous Transport, Superconductivity and Magnetism in Nanosystems, 15-20 June, Kyiv – Ukraine, 2015.
- SPIE Microtechnologies, 4 - 6 May, Barcelona, Spain, 2015.
- 2nd International Symposium on Optics and its Applications, September 1-5, Yerevan – Ashtarak, Armenia, 2014.
- 2nd International Advanced School on “Frontiers in Optics & Photonics” 30 August - 5 September, Yerevan-Ashtarak, Armenia, 2014.
- SPIE Optical Metrology, 13-16 May, Munich, Germany, 2013.
- Laser Physics 2013, 8-11 October, Ashtarak, Armenia, 2013.
- Scientific Conference “Actual Problems of Nanoscale Systems Physics” dedicated to the 70th anniversary of NAS RA academician E.M. Kazaryan NAS of Armenia, March 21-22, Yerevan, Armenia, 2012.

- International Advanced School on “Frontiers in Optics & Photonics” (FOP-2012) 2-7 July, Yerevan-Ashtarak, Armenia, 2012.
- International Scientific Workshop Photonics & Micro- and Nano- structured Materials (PMNM - 2011), Yerevan, Armenia, June 28-30, 2011.
- International Symposium "OPTICS and its applications" (OPTICS-2011), Yerevan – Ashtarak, Armenia, 5-9 September 2011.
- International Conference Laser Physics 2011, Ashtarak, Armenia, 11-14 October, 2011.
- Second International School on Nanophotonics and Photovoltaics, Tsakhkadzor, Armenia, 15-22 September, 2010.
- Third International Forum “ROSNANOTECH”, Moscow, 1-3 November, 2010.
- Annual Scientific Conference of State Engineering University of Armenia, Yerevan, November 22-26, 2010.
- 5th Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 6 - 10 December, 2010.
- Second International Forum “ROSNANOTECH”, Moscow, 6-8 October, 2009.
- 4th Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 30 November - 4 December, 2009.
- International Advanced Research Workshop Modern Problems in Optics & Photonics (MPOP), Yerevan, Armenia, 27 August – 2 September, 2009.
- Virtual Conference on Nanoscale Science and Technology, “VC-NST-2008” USA, July 24-29, 2008.
- First International Forum “ROSNANOTECH”, Moscow, 6-8 October, 2008
- 3rd Annual Scientific Conference of RAU, 5-10 December, 2008.
- Annual Scientific Conference of State Engineering University of Armenia, Yerevan, October 6-9, 2008.
- Semiconductor Micro and Nanoelectronics. The sixth international conference, Tsakhkadzor, Armenia, September 18-20, 2007.
- Conference dedicated to the 50th anniversary of YSU Solid State Physics Chair, Yerevan, October, 2007.
- 2nd Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 3-7 December, 2007.
- Annual Scientific Conference of State Engineering University of Armenia, Yerevan, October 8-10, 2007.
- Semiconductor Micro and Nanoelectronics. The fifth international conference, Aghveran, Armenia, September 16-18, 2005.
- 3rd National Conference of Young Physicists, Yerevan, YSU, Armenia, November 4-8, 2003.

## **Conclusion**

To sum up, the main results of this dissertation, expressing the relevance of the subject, scientific novelty as well as practical importance, are as follows:

1. The direct interband light absorption in an ensemble of non-interacting spherical and cylindrical quantum dots with modified Pöschl–Teller potential and Morse potential have been studied. The application of modified Pöschl–Teller potential gives opportunity of more successful and realistic description of charge carriers behavior in QD. In particular, in the

contrast to the parabolic confined potential it is possible the quantum emission of charge carrier from spherical or cylindrical QD. In the regime of strong and weak size quantization analytical expressions for the particle energy spectrum, absorption coefficient and dependencies of effective threshold frequencies of absorption on the geometrical size of QD have been obtained. The selection rules corresponding to different transitions between quantum levels are found. To facilitate the comparison of obtained results with the probable experimental data, size dispersion distribution of growing quantum dots by the geometrical sizes by three experimentally realizing symmetric and asymmetric distribution functions have been taken into account.

2. One-electron states in a prolate and oblate spheroidal QDs have been studied. Three regimes of size quantization have been considered. Flexible manipulation of the absorption edge of the semiminor axis of prolate and oblate spheroidal QD makes them potential candidates for the construction of near-infrared detectors, optical sensors, QD LEDs etc. The probability of the direct interband transitions has been calculated and the selection rules for quantum numbers have been received. It has been shown that the adiabatic approximation is applicable for this problems and gives results that are very close to the exact ones. The dependence of z component of the electron dipole moment on the small semiaxis of the prolate spheroid has been studied. The effect of the hydrostatic pressure and temperature on the electron ground state energy and absorption edge for oblate spheroidal QD have been considered.
3. The binding energy and oscillator strength of the hydrogen-like donor impurity in strongly oblate and prolate ellipsoidal QD have been investigated using the variational method. The binding energy for the ground and first excited levels monotonically decrease with the increase of the small semiaxis while the binding energy dependence on impurity position behavior on the coordinate is non-monotonically for oblate ellipsoidal QD. It has been shown that the oscillator strength with the increase of semiaxis tends to the definite value for the ground state. For the first excited state, the dependence of the oscillator strength on the radial coordinate has the bell-like appearance and is equal to zero when impurity located in the center or close to the wall of the ellipsoid. It has been demonstrated the break of the cylindrical symmetry of probability density distribution with the change of the impurity position and the restore of symmetry in the limit when the impurity near to QD wall. The displacement of the impurity leads to the shift of the photoionization cross section threshold frequency for transitions and the peaks height decrease. In contrast to this, the threshold frequencies remain unchanged with the increase of the incident angle. Similar dependences and behaviours have been obtained for the prolate ellipsoidal QD.
4. The exciton, negative and positive trions, and biexciton states in the strongly prolate ellipsoidal QD were calculated using the variational method. The binding energies of the biexciton and positive trion have the maximum, while the energies of the negative trion and exciton monotonically increase with the increase of the small semiaxis. It has been shown that the recombination energies of trions and biexciton are close to each other. The radiative lifetime of the one-dimensional exciton and biexciton in SPEQD made from GaAs is about 30ps and 7ps for the average values  $a = 0.5a_b$  and  $a = 5a_b$ , respectively. Thus, manipulation of the geometrical parameters of the prolate QD brings control of the radiative lifetime of the excitonic complexes. This feature is important for the possible application of the excitonic and biexcitonic complexes as one and two-photon sources.
5. The calculations were done for the exciton and biexciton in the ellipsoidal QD made from GaAs under the influence of ILF. To ensure accurate results, all the calculations for the

exciton and biexciton energies are done in the framework of the variational method. In particular, one and three variational parameters were used for exciton and biexciton, respectively. It turned out that the biexciton energy is approximately equal to the double value of exciton energy in all interval change of the small semiaxis of SOEQD. To construct the quantum transitions between biexciton and exciton, corresponding oscillator strengths of excitonic transitions, namely, for biexciton-exciton and exciton-ground state transitions, have been considered in the scope of three level model (biexciton-exciton-ground state). The results show that the energy levels of both excitons and biexcitons increase with the value of ILF and decrease as the small semiaxis increases. The dependencies of the biexciton's real and imaginary third-order susceptibility, absorption coefficient, and induced refractive index change on photon energy near one-photon and two-photon resonances have been analyzed. The absorption coefficient and induced refractive index change undergo blue shifts with increasing ILF magnitude. This is due to the enhancement of the dressed potential caused by ILF, leading to a consequent rise in the energy of excitonic complexes. The radiative recombination lifetimes of excitons and biexcitons were estimated for different values of semiaxes and ILF magnitudes. The results indicate that the biexciton lifetime decreases with increasing ILF magnitude, while the exciton lifetime is about four times longer than the biexciton lifetime.

6. The Talbot effect was shown in a InAs/GaAs vertically coupled cylindrical QD ensemble illuminated by the probe and periodically modulated coupling fields. The coupled QDs were modeled using the double MPTP, this model has made it possible to control the depth, the width and the interdot distance. The exciton states were considered in these systems in the presence of an external electric field. The nonlinear refractive index changes and the nonlinear absorption coefficients were calculated for different values of the tunneling parameters. The exciton lifetime and tunneling time are calculated directly: exciton lifetime lies in the ns range, while the tunneling time is in the ps range. The exciton lifetime's dependence on the half-width of the first QD displayed a linear growth, while tunneling time's dependence on the same parameter exhibited an exponential decrease. Note, that dependence of the tunneling time on the electric field had a clear  $\exp\{-1/F_z\}$  form. The influence of the tunneling on Talbot effect formation was observed in our system. It was shown that the tunneling effect combined with the unit value of visibility induced the periodic pattern of the probe field. Nevertheless, increasing the tunneling parameter caused the periodic waveform to become less visible. The induced periodic waveform had the highest value of visibility because small values of the tunneling parameter resulted in exactly zero values for the absorption at the coupling field's distribution nodes and absorption peaks at its antinodes. Furthermore, raising the tunneling parameter's value caused the tunneling-induced transparency to have wider line widths, which reduced the output probe field's visibility.
7. Within the framework of adiabatic approximation, we have shown that in the case of strongly oblate ellipsoidal QD with impenetrable walls for the relatively low levels of the electron gas the parabolic confinement is realised for confining potential. At the same time, in such a system, a situation may arise when the conditions are realized perform generalized Kohn theorem. Notably, the parabolic confinement potential depends on the geometry of the ellipsoid, which allows, together with the magnetic field to control resonance frequencies of transitions by changing the geometric dimensions of the QD. The same is shown also for the prolate ellipsoidal QD. We have shown a possibility to reveal one-particle transitions in a many-particle system for the case of electron gas located in strongly prolate ellipsoidal QD

in the presence of the uniform external magnetic field. In this case the formation of the parabolic confining potential of the electron gas is caused by a specific geometry of QDs.

8. Experimental results suggesting feasibility of the implementation of the generalized Kohn theorem for a gas of heavy holes in the lens-shaped Ge/Si QD are presented. In the framework of the adiabatic method, it was theoretically shown that the specific geometry of a QD leads to the formation of a two-dimensional parabolic confining potential in the sectional plane of the asymmetric biconvex quantum lens. Considering the interaction between heavy holes as paired and depending only on the modulus of distance between particles, the single-particle nature of the far-IR absorption is shown. For this QD model, the analytical expression for the resonant absorption frequencies gives a good quantitative agreement with the results of the far-IR spectroscopy. In particular, there is consistency between the experimentally measured ( $\approx 30\text{meV}$ ) and theoretically calculated ( $\approx 31\text{meV}$ ) values of the resonant transition energies.
9. The analytical expressions for the electron energy spectrum and wave function of core/shell/shell spherical quantum dot with Kratzer confining potential are obtained. The possibility of the impurity electron leakage in the external environment is shown. The character of the electrostatic field created by the impurity and the electron for ground state is observed. For one electron states dipole and quadrupole moments are studied. It is shown that dipole moment is zero for the considered system. An analytical formula for quadrupole moment is derived. Parallel to this, the problem of the exciton states in core/shell/shell spherical quantum dot with three-dimensional Winternitz-Smorodinsky confinement potential is considered. The distribution of the geometrical parameter around the mean value has been taken into account by using Gaussian distribution and the absorption peaks corresponding to the quantum transitions between energy levels are plotted. The peaks that correspond to the diagonal transitions appear with relatively high intensity, while the peaks for non-diagonal transition have non-zero intensity. This is due to the asymmetry of the Winternitz-Smorodinsky confinement potential. The dependence of the PL intensity on the frequency of the incident light decays exponentially.
10. The linear and nonlinear intraband optical properties of colloidal spherical CdSe/CdS core/shell QDs in the presence of donor impurity in the center are theoretically investigated. The modified Pöschl-Teller potential was chosen as the model confinement potential for the spherical core/shell QD. The energy and binding energy of an electron were calculated as functions of the half-width of spherical core/shell QD and the dependence was shown to be monotonic. The spectra of the linear, nonlinear and total absorption coefficients of the incident light energy were obtained for various values of the half-width. It is shown that at smaller QDs, light absorption occurred with higher energy than at large QDs, and the nonlinear correction was bigger for the large radius QDs; therefore, the intensity of the total absorption coefficient will be more for the smaller QDs. The change in the refractive index as a function of the incident light energy was also considered. Thus, the calculation of the change in the refractive index using only the linear term may be incorrect for systems operating especially with high optical intensity, due to the strong dependence of the nonlinear component on the incident optical intensity. As the final step, the generation of the second and third harmonics has been calculated for the system under consideration. As the radius of QD increased, SHG and THG increased and also exhibited a red shift. The peaks of SHG and THG occurred in a merged form, which were split for the smaller values of half-width.
11. The electronic states and optical properties of conical QD made of GaAs are studied. The dependence of energy levels on the geometrical parameters of conical QD is obtained

analytically with the help of adiabatic approximation. Each level of the “fast” subsystem has a family of “slow” subsystem levels positioned thereupon. Note that the intraband transition frequency between energy levels falls into the IR part of spectrum, while the interband transition frequency falls into the visible part of spectrum. This allow to consider conical QD as potential base elements for the design of QD LEDs. It is shown that for radial quantum numbers transitions are allowed between the levels with the same quantum numbers, and for the principal quantum number any transitions between different levels are allowed.

12. The dependence of energy levels on the geometrical parameters of conical QD and external electric field magnitude are obtained analytically with the help of adiabatic approximation. The applied field lead to the change of the electron localization area and the decrease of the electron energy. For the more accurate description of both energy levels and wave functions, it is necessary to take into account the next corrections in the expansion of the effective potential for the ‘slow’ subsystem. In the case when the ratio height/radius has sufficiently large values, the adiabatic approach without corrections gives the acceptable result. An analysis of the axial wave functions showed that with the increase in the axial quantum number the region of electron localization shifts toward the conical QD vertex. For small values of the height/radius ratio, the dependence of the z-component of the dipole moment is nonlinear.

### List of published works on the dissertation topic

47 scientific papers, 10 Conference Proceedings and 2 books and book chapters have been published on the topic of the dissertation:

#### Papers included in the Thesis

1. Hayrapetyan, D.B., 2007. Direct interband light absorption in a strongly prolated ellipsoidal quantum dot. *Journal of Contemporary Physics*, 42, pp.292-297.
2. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Tevosyan, H.K., 2012. Direct interband light absorption in the cylindrical quantum dot with modified Pöschl–Teller potential. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 46, pp.274-278.
3. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2013. On the possibility of implementation of Kohn’s theorem in the case of ellipsoidal quantum dots. *Journal of Contemporary Physics*, 48, pp.32-36.
4. Hayrapetyan, D.B., Achoyan, A.S., Kazaryan, E.M. and Tevosyan, H.K., 2013. Electronic states in a cylindrical quantum dot with the modified Pöschl-Teller potential in the presence of external magnetic field. *Journal of Contemporary Physics*, 48, pp.285-290.
5. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Tevosyan, H.K., 2013. Optical properties of spherical quantum dot with modified Pöschl–Teller potential. *Superlattices and Microstructures*, 64, pp.204-212.
6. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Tevosyan, H.K., 2014. Impurity states in a cylindrical quantum dot with the modified Pöschl-Teller potential. *Journal of Contemporary Physics*, 49, pp.119-122.
7. Hayrapetyan, D.B., Kotanjyan, T.V. and Tevosyan, H.K., 2014. Modeling of confinement potential for cylindrical quantum dot. *Journal of Contemporary Physics*, 49, pp.272-276.
8. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M., Petrosyan, L.S. and Sarkisyan, H.A., 2015. Core/shell/shell spherical quantum dot with Kratzer confining potential: Impurity states and electrostatic multipoles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 66, pp.7-12.

9. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M., Kotanjyan, T.V. and Tevosyan, H.K., 2015. Exciton states and interband absorption of cylindrical quantum dot with Morse confining potential. *Superlattices and Microstructures*, 78, pp.40-49.
10. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B. and Kazaryan, E.M., 2015. Oblate spheroidal quantum dot: electronic states, direct interband light absorption and pressure dependence. *The European Physical Journal B*, 88, pp.1-6.
11. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B. and Kazaryan, E.M., 2015. Prolate spheroidal quantum dot: electronic states, direct interband light absorption and electron dipole moment. *Physica B: Condensed Matter*, 479, pp.85-89.
12. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2016. Implementation of Kohn's theorem for the ellipsoidal quantum dot in the presence of external magnetic field. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 75, pp.353-357.
13. Hayrapetyan, D.B., Chalyan, A.V., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2016. Direct interband light absorption in conical quantum dot. *Journal of Nanomaterials*, 16(1), pp.406-406.
14. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B. and Kazaryan, E.M., 2016. Optical properties of narrow band prolate ellipsoidal quantum layers ensemble. *Journal of Nanophotonics*, 10(3), pp.033508-033508.
15. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2016. Magneto-absorption in conical quantum dot ensemble: Possible applications for QD LED. *Optics Communications*, 371, pp.138-143.
16. Hayrapetyan, D.B., Amirkhanyan, S.M., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2016. Effect of hydrostatic pressure on diamagnetic susceptibility of hydrogenic donor impurity in core/shell/shell spherical quantum dot with Kratzer confining potential. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 84, pp.367-371.
17. Harutyunyan, V.A., Hayrapetyan, D.B. and Baghdasaryan, D.A., 2016. Single-electron states in semiconductor nanospherical layer of large radius. *Journal of Contemporary Physics*, 51, pp.350-359.
18. Hayrapetyan, D.B., Kotanjyan, T.V., Tevosyan, H.K. and Kazaryan, E.M., 2016. Effects of hydrostatic pressure on the donor impurity in a cylindrical quantum dot with Morse confining potential. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 171(11-12), pp.916-924.
19. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B. and Harutyunyan, V.A., 2017. Optical transitions in semiconductor nanospherical core/shell/shell heterostructure in the presence of radial electrostatic field. *Physica B: Condensed Matter*, 510, pp.33-37.
20. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B., Sarkisyan, H.A., Kazaryan, E.M. and Medvids, A., 2017. Conical quantum dot: electronic states and dipole moment. *Journal of Contemporary Physics*, 52, pp.129-137.
21. Ghaltaghchyan, H.T., Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2017. Few-body magneto-absorption in prolate ellipsoidal quantum dot. *Physics of Atomic Nuclei*, 80, pp.769-773.
22. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B., Sarkisyan, H.A., Kazaryan, E.M. and Pokutnyi, S.I., 2017. Exciton states and direct interband light absorption in the ensemble of toroidal quantum dots. *Journal of Nanophotonics*, 11(4), pp.046004-046004.
23. Hayrapetyan, D.B., Ohanyan, G.L., Baghdasaryan, D.A., Sarkisyan, H.A., Baskoutas, S. and Kazaryan, E.M., 2018. Binding energy and photoionization cross-section of hydrogen-like donor impurity in strongly oblate ellipsoidal quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 95, pp.27-31.

24. Sofronov, A.N., Balagula, R.M., Firsov, D.A., Vorobjev, L.E., Tonkikh, A.A., Sarkisyan, H.A., Hayrapetyan, D.B., Petrosyan, L.S. and Kazaryan, E.M., 2018. Absorption of far-infrared radiation in Ge/Si quantum dots. *Semiconductors*, 52, pp.59-63.
25. Harutyunyan, V.A., Hayrapetyan, D.B. and Kazaryan, E.M., 2018. Interband absorption and photoluminescence in the cylindrical layered CdS/HgS/CdS heterostructure. *Journal of Contemporary Physics*, 53(1), pp.48-57.
26. Hayrapetyan, D.B., Baghdasaryan, D.A., Kazaryan, E.M., Pokutnyi, S.I. and Sarkisyan, H.A., 2018. Exciton states and optical absorption in core/shell/shell spherical quantum dot. *Chemical Physics*, 506, pp.26-30.
27. Baghdasaryan, D.A., Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2018. Thermal and magnetic properties of electron gas in toroidal quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 101, pp.1-4.
28. Hayrapetyan, D.B., Bleyan, Y.Y., Baghdasaryan, D.A., Sarkisyan, H.A., Baskoutas, S. and Kazaryan, E.M., 2019. Biexciton, negative and positive trions in strongly oblate ellipsoidal quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 105, pp.47-55.
29. Baghdasaryan, D.A., Hakobyan, E.S., Hayrapetyan, D.B., Sarkisyan, H.A. and Kazaryan, E.M., 2019. Nonlinear optical properties of cylindrical quantum dot with Kratzer confining potential. *Journal of Contemporary Physics*, 54(1), pp.46-56.
30. Harutyunyan, V.A., Mkrtchyan, M.A., Kazaryan, E.M. and Hayrapetyan, D.B., 2019. Interband Absorption and Photoluminescence in Nanospherical InP/InAs/InP Core/Shell/Shell Heterostructure. *Journal of Contemporary Physics*, 54(1), pp.33-45.
31. Bleyan, Y.Y. and Hayrapetyan, D.B., 2019. Tuning Terahertz Recombination Transitions of Quaternion States in Ellipsoidal Quantum Dot. *Journal of Contemporary Physics*, 54(2), pp.153-159.
32. Sarkisyan, H.A., Hayrapetyan, D.B., Petrosyan, L.S., Kazaryan, E.M., Sofronov, A.N., Balagula, R.M., Firsov, D.A., Vorobjev, L.E. and Tonkikh, A.A., 2019. Realization of the Kohn's theorem in Ge/Si quantum dots with hole gas: Theory and experiment. *Nanomaterials*, 9(1), p.56.
33. Harutyunyan, V.A., Kazaryan, E.M. and Hayrapetyan, D.B., 2020. Interband Absorption and Luminescence in InP/InAs/InP Spherical Core/Shell/Shell Heterostructure for Moderate Regime of Size Quantization. *Acta Physica Polonica, A*, 137(6).
34. Harutyunyan, V.A., Hayrapetyan, D.B. and Kazaryan, E.M., 2020. Optical transitions and photoluminescence in cylindrical core/layer/shell  $\beta$ -CdS/ $\beta$ -HgS/ $\beta$ -CdS heterostructure. *Physics of the Solid State*, 62, pp.1305-1316.
35. Sargsian, T.A., Mkrtchyan, M.A., Sarkisyan, H.A. and Hayrapetyan, D.B., 2021. Effects of external electric and magnetic fields on the linear and nonlinear optical properties of InAs cylindrical quantum dot with modified Pöschl-Teller and Morse confinement potentials. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 126, p.114440.
36. Mantashian, G.A., Mantashyan, P.A., Sarkisyan, H.A., Kazaryan, E.M., Bester, G., Baskoutas, S. and Hayrapetyan, D.B., 2021. Exciton-Related Raman Scattering, Interband Absorption and Photoluminescence in Colloidal CdSe/CdS Core/Shell Quantum Dots Ensemble. *Nanomaterials*, 11(5), p.1274.
37. Mantashian, G.A., Zaqaryan, N.A., Mantashyan, P.A., Sarkisyan, H.A., Baskoutas, S. and Hayrapetyan, D.B., 2021. Linear and Nonlinear Optical Absorption of CdSe/CdS Core/Shell Quantum Dots in the Presence of Donor Impurity. *Atoms*, 9(4), p.75.



38. Hayrapetyan, D.B., 2022. Binding and Recombination Energies of Quasi-One-Dimensional Excitonic Complexes in Ellipsoidal Quantum Dot. *Foundations*, 2(1), pp.219-227.
39. Mantashian, G.A. and Hayrapetyan, D.B., 2022. Impurity effects on binding energy, diamagnetic susceptibility and photoionization cross-section of chalcopyrite AgInSe<sub>2</sub> Nanotadpole. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 34(24), p.245302.
40. Bleyan, Y.Y., Mantashyan, P.A., Kazaryan, E.M., Sarkisyan, H.A., Accorsi, G., Baskoutas, S. and Hayrapetyan, D.B., 2022. Non-Linear Optical Properties of Biexciton in Ellipsoidal Quantum Dot. *Nanomaterials*, 12(9), p.1412.
41. Bleyan, Y.Y. and Hayrapetyan, D.B., 2022. Magnetobiexciton in strongly oblate ellipsoidal quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*, 632, p.413725.
42. Hayrapetyan, D.B., 2023. Hydrogen-like donor impurity states in strongly prolate ellipsoidal quantum dot. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 145, p.115493.
43. Mantashian, G.A., Mantashyan, P.A. and Hayrapetyan, D.B., 2023. Modeling of Quantum Dots with the Finite Element Method. *Computation*, 11(1), p.5.
44. Sargsian, T.A., Mantashyan, P.A. and Hayrapetyan, D.B., 2023. Effect of Gaussian and Bessel laser beams on linear and nonlinear optical properties of vertically coupled cylindrical quantum dots. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 33, p.100936.
45. Mantashyan, P., Mantashian, G. and Hayrapetyan, D., 2023. Talbot effect in InAs/GaAs coupled cylindrical quantum dots ensemble. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 148, p.115662.
46. Hayrapetyan, D.B., 2023. Relativistic correction of biexciton fine structure in ellipsoidal quantum dots. *Physica B: Condensed Matter*, p.415060.
47. Gavalajyan, S.P., Mantashian, G.A., Kharatyan, G.T., Sarkisyan, H.A., Mantashyan, P.A., Baskoutas, S. and Hayrapetyan, D.B., 2023. Optical Properties of Conical Quantum Dot: Exciton-Related Raman Scattering, Interband Absorption and Photoluminescence. *Nanomaterials*, 13(8), p.1393.

#### **Conference Proceedings included in the Thesis**

1. Tevosyan, H.K., Hayrapetyan, D.B., Dvovyan, K.G. and Kazaryan, E.M., 2012. Direct Interband Light Absorption in a Spherical Quantum Dot with the Modified Pöschel-Teller Potential. *International Journal of Modern Physics: Conference Series* (Vol. 15, pp. 204-210). World Scientific Publishing Company.
2. Hayrapetyan, D.B., 2012, January. Direct interband light absorption in strongly oblate semi-ellipsoidal quantum dots' ensemble. *Photonics and Micro-and Nano-structured Materials 2011* (Vol. 8414, pp. 204-210). SPIE Conference Proceedings.
3. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Tevosyan, H.K., 2013, May. Influence of hydrostatic pressure on electronic states and optical properties of spherical quantum dots. *Photon Counting Applications IV; and Quantum Optics and Quantum Information Transfer and Processing* (Vol. 8773, pp. 176-182). SPIE Conference Proceedings.
4. Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M., Kotanjyan, T.V. and Tevosyan, H.K., 2015, June. Light absorption of cylindrical quantum dot with Morse potential in the presence of parallel electrical and magnetic fields. In *Nanotechnology VII* (Vol. 9519, pp. 146-153). SPIE Conference Proceedings.
5. Ghaltaghchyan, H.T., Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2016. Few-body absorption in prolate ellipsoidal quantum dot. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 673, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

6. Bleyan, Y.Y., Hayrapetyan, D.B., Sarkisyan, H.A. and Kazaryan, E.M., 2018, May. Optical properties of biexcitons in ellipsoidal quantum dot. *Quantum Technologies 2018* (Vol. 10674, pp. 201-207). SPIE Conference Proceedings.
7. Bleyan, Y.Y., Tevosyan, H.K. and Hayrapetyan, D.B., 2018, September. Investigation of Photoluminescence Spectra of Excitons and Biexcitons in Strongly Prolate Ellipsoidal Quantum Dot. In *2018 IEEE 8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)* (pp. 1-3). IEEE.
8. Mkrtchyan, M.A., Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2020, April. Optical parameters of coupled vertical cylindrical quantum dots with double modified Pöschl-Teller potential in terahertz range. In *Nanophotonics VIII* (Vol. 11345, pp. 218-223). SPIE Conference Proceedings.
9. Sargsian, T.A., Vinnichenko, M.Y. and Hayrapetyan, D.B., 2022, March. Linear and nonlinear optical properties of vertically coupled cylindrical double quantum dots with modified Pöschl-Teller potential. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2227, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
10. Ohanyan, G. and Hayrapetyan, D., 2022, May. Second and third-harmonic generation in strongly oblate ellipsoidal quantum dot under electric field. In *Nanophotonics IX* (Vol. 12131, pp. 158-165). SPIE Conference Proceedings.

**Books and book chapters included in the Thesis**

11. Baghdasaryan, D.A., Ghaltaghchyan, H.T., Hayrapetyan, D.B., Kazaryan, E.M. and Sarkisyan, H.A., 2020. Electronic and Optical Characteristics of Core/Shell Quantum Dots. *Core/Shell Quantum Dots: Synthesis, Properties and Devices*, pp.123-164.
12. Hayrapetyan D.B., Sarkisyan H.A., Kazaryan E.M., 2018. Fundamental Absorption of Semiconductor Quantum Dots. *SPIE Spotlight*, SPIE PRESS BOOK.

**Անփոփում**

Անփոփելով կարելի է առանձնացնել ստեղծագործության հետևյալ հիմնական արդյունքները, որոնք արտացոլում են թեմայի արդիականությունը, գիտական նորությունը, ինչպես նաև գործնական նշանակությունը.

1. Ուսումնասիրվել է լույսի ուղիղ միջգոտիական կլանումը ձևափոփոխված Պյոշլ-Թելլերի և Մորսի պոտենցիալով գնդաձև և զլանաձև քվանտային կետերի (ՔԿ) անսամբլում: Ձևափոփոխված Պյոշլ-Թելլերի պոտենցիալի կիրառումը հնարավորություն է տալիս ավելի հաջող և իրատեսական նկարագրել լիցքակիրների վարքագիծը ՔԿ-ում: Մասնավորապես, ի տարբերություն պարաբոլիկ սահմանափակող պոտենցիալի, այս դեպքում հնարավոր է լիցքակրի քվանտային արտանետումը գնդաձև կամ զլանաձև ՔԿ-ից: Ուժեղ և թույլ քվանտացման ռեժիմների համար ստացվել են մասնիկների էներգիական սպեկտրի վերլուծական արտահայտություններ, կլանման գործակցի և կլանման շեմային հաճախականությունների կախվածությունը ՔԿ-ի երկրաչափական չափերից: Գտնվել են քվանտային մակարդակների միջև տարբեր անցումներին համապատասխանող ջնկման կանոնները: Ստացված արդյունքների՝ փորձարարական տվյալների հետ համեմատելու համար հաշվել է առնվել ՔԿ-երի ըստ երկրաչափական չափերի բաշխումը երեք բաշխման ֆունկցիաներով:
2. Ուսումնասիրվել են մեկլեկտրոնային վիճակները սեղմված և ձգված սֆերոիդալ ՔԿ-երում: Դիտարկվել է չափային քվանտացման երեք ռեժիմներ: Ձգված և սեղմված սֆերոիդալ ՔԿ-երի կլանման եզրի դեկավարումը փոքր կլիառանցքի միջոցով դրանց

դարձնում է մոտ ենթակարմիր տիրույթի ավիչների, օպտիկական սենսորների, ԲԿ LED-երի համար պոտենցիալ թեկնածուներ: Հաշվարկվել է ուղիղ միջգոտիական անցումների հավանականությունը և ստացվել են քվանտային թվերի համար ջոկման կանոնները: Ցույց է տրվել է, որ աղյուսակի մոտավորությունը կիրառելի է այս խնդիրների համար և տալիս է ճշգրիտ արդյունքներին շատ մոտ արդյունքներ: Ուսումնասիրվել է էլեկտրոնի դիպոլ մոմենտի z բաղադրիչի կախվածությունը ձգված սֆերոիդի փոքր կիսասառնգքից: Սեղմված սֆերոիդի ԲԿ-ի համար դիտարկվել է հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունը էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի և կյանման եզրի վրա:

3. Վարիացիոն մեթոդի միջոցով ուսումնասիրվել է ջրածնանման դոնորային խառնուրդի կապի էներգիան և օսցիլյատորային ուժը խիստ սեղմված և ձգված էլիպսարդային ԲԿ-ում: Հիմնական և առաջին գրգռված մակարդակների համար կապի էներգիան մոտառոն նվազում է փոքր կիսասառնգքի մեծացմանը գուրընթաց, մինչդեռ կապի էներգիայի կախվածությունը խառնուրդի դիրքից ունի ոչ մոնոտոն բնույթ: Ցույց է տրվել, որ կիսասառնգքի մեծացմանը գուրընթաց օսցիլյատորային ուժը հիմնական վիճակի համար ձգում է որոշակի արժեքի: Առաջին գրգռված վիճակի համար օսցիլյատորային ուժի կախվածությունը շատվողային կոորդինատից ունի զանգի տեսք և հավասար է գրոյի, երբ խառնուրդը գտնվում է էլիպսարդի կենտրոնում կամ մոտ է ԲԿ-ի պատերին: Ցույց է տրվել հավանականության խտության բաշխման գլանային համաչափության խախտումը՝ խառնուրդի դիրքի փոփոխությամբ և համաչափության վերականգնումը սահմանային դեպքում, երբ խառնուրդը մոտ է ԲԿ-ի պատին: Խառնուրդի սեղաշարժը հանգեցնում է անցումների ֆոտոիոնացման հատույթի շեմային հաճախականության փոփոխությանը և գազայների բարձրության նվազմանը: Ի տարբերություն դրա, շեմային հաճախականությունները մնում են անփոփոխ անկման անկյան մեծացման դեպքում: Նմանատիպ կախվածություններ ստացվել նաև ձգված էլիպսարդային ԲԿ-ի համար:

4. Վարիացիոն մեթոդով հաշվարկվել են էքսիտոնային, բացասական և դրական տրիոնների և բիէքսիտոնային վիճակները խիստ ձգված էլիպսարդային ԲԿ-ում: Բիէքսիտոնի և դրական տրիոնի կապի էներգիաներն ունեն առավելագույն արժեքներ, իսկ բացասական տրիոնի և էքսիտոնի էներգիաները մոնոտոն մեծանում են փոքր կիսասառնգքի մեծացմանը գուրընթաց: Ցույց է տրվել, որ տրիոնների և բիէքսիտոնի ռեկոմբինացիայի էներգիաները մոտ են միմյանց: GaAs-ից պարաստված խիստ ձգված էլիպսարդային ԲԿ-ում միաչափ էքսիտոնի և բիէքսիտոնի ճառագայթային կյանքի տևողությունների միջին արժեքները 30պվ և 7պվ է: Այսպիսով, ձգված ԲԿ-ի երկրաչափական պարամետրերի դեկավարումը թույլ է տալիս վերահսկել էքսիտոնային համակարգերի ճառագայթային կյանքի տևողությունը: Այս հատկությունը կարևոր է էքսիտոնային և բիէքսիտոնային համակարգերի՝ որպես մեկ և երկու ֆոտոնային աղբյուրներ հնարավոր կիրառման համար:

5. GaAs-ից պարաստված էլիպսարդային ԲԿ-ում էքսիտոնի և բիէքսիտոնի համար կատարվել են հաշվարկներ ինտենսիվ լազերային դաշաի առկայությամբ: Ճշգրիտ արդյունքներ սպասեովելու համար էքսիտոնի և բիէքսիտոնի էներգիաների հաշվարկները կատարվել են վարիացիոն մեթոդի շրջանակներում: Մասնավորապես, էքսիտոնի և բիէքսիտոնի համար օգտագործվել են համապատասխանաբար մեկ և երեք վարիացիոն պարամետրեր: Պարզվել է, որ բիէքսիտոնի էներգիան մոտավորապես հավասար է էքսիտոնի էներգիայի կրկնակի արժեքին խիստ սեղմված էլիպսարդային ԲԿ-ի համար: Բիէքսիտոնի և էքսիտոնի միջև քվանտային անցումները կառուցելու համար դիտարկվել են համապատասխան օսցիլյատորային

ուժերը, մասնավորապես, բիէքսիտոն-էքսիտոն և էքսիտոն-հիմնական վիճակների անցումները եռաստիման մոդելի շրջանակում (բիէքսիտոն-էքսիտոն-հիմնական վիճակ): Արդյունքները ցույց են տալիս, որ ինչպես էքսիտոնների, այնպես էլ բիէքսիտոնների էներգիական մակարդակները մեծանում են լազերային դաշտի ինտենսիվության արժեքի հետ և նվազում կոորդ կիսաառանցքի մեծացման գույզանեւ: Վերլուծվել են բիէքսիտոնի երրորդ կարգի ընկալունակության իրական և կեճճ մասերի, կլանման գործակիցի և մակաճված բեկման ցուցչի փոփոխության կախվածությունը ֆոտոնների էներգիայից՝ միաֆոտոն և երկֆոտոն ռեզոնանսների մոտ: Կլանման գործակիցը և մակաճված բեկման ցուցչի փոփոխությունը ենթարկվում են կապույտ շեղման լազերի ինտենսիվության մեծացմանը գույզանեւ: Սա պայմանավորված է լազերի կողմից առաջացրած հագնված պոտենցիալի ուժեղացմամբ, ինչը հանգեցնում է էքսիտոնային համակարգերի էներգիայի աճին: Էքսիտոնների և բիէքսիտոնների ճառագայթային ռեկոմբինացիայի ժամկետները գնահատվել են կիսաառանցքների և լազերի մեծությունների տարբեր արժեքների համար: Արդյունքները ցույց են տալիս, որ բիէքսիտոնի կլանքի տևողությունը նվազում է լազերի մեծության աճով, մինչդեռ էքսիտոնի կլանքի տևողությունը մոտ չորս անգամ ավելի է, քան բիէքսիտոնի կլանքի տևողությունը:

6. Յույց է արվել Թ-ալբոսի երևույթի ի հայտ գալը InAs/GaAs ուղղահայաց կապված գլանաձև ԲԿ-երի անսամբլում, որը լուսավորված է զոնդավորող և պարբերաբար մոդուլավորվող գույզակցող դաշտերով: Կապված ԲԿ-ները մոդուլավորվել են կրկնակի Պլոշ-Թ-ելլերի ձևավորման պոտենցիալների միջոցով: Էքսիտոնային վիճակներն այս համակարգերում դիտարկվել են պրոսպին էլեկտրական դաշտի առկայության դեպքում: Թ-ունելավորման պարամետրերի տարբեր արժեքների համար հաշվարկվել են ոչ գծային բեկման ցուցչի փոփոխությունները և ոչ գծային կլանման գործակիցները: Հաշվարկվել են էքսիտոնի կլանքի տևողությունը և թունելավորման ժամանակը, էքսիտոնի կլանքի տևողությունը գտնվում է նվ միջակայքում, մինչդեռ թունելավորման ժամանակը՝ ավ միջակայքում: Էքսիտոնի կլանքի տևողության կախվածությունը առաջին ԲԿ-ի կիսալայնությունից գծային է, մինչդեռ թունելավորման ժամանակի կախվածությունը նույն պարամետրից էքսպոնենցիալ նվազում է: Այս համակարգի համար դիտարկվել է թունելավորման ազդեցությունը Թ-ալբոսի երևույթի ձևավորման վրա: Յույց է արվել, որ թունելավորման երևույթը գույզակցված տեսանկյունային միավորի արժեքի հետ առաջացնում է զոնդավորման դաշտի պարբերական օրինաչափությունը: Այնուամենայնիվ, թունելավորման պարամետրի աճը բերում է պարբերական ալիքի ավելի քիչ տեսանելի դառնալուն: Թ-ունելավորման պարամետրի արժեքի բարձրացումը հանգեցրեց թունելավորման արդյունքում առաջացրած թափանցիկության ավելի լայն գծերի, ինչը նվազեցնում է էրալային զոնդավորման դաշտի տեսանելիությունը:

7. Ադիաբատիկ մոտավորության շրջանակներում ցույց է արվել, որ էլեկտրոնային զազի համեմատաբար ցածր մակարդակների համար անթափանց պատերով խիստ սեղմված էլիպսարդային ԲԿ-ի դեպքում առաջանում է պարաբոլական սահմանափակող պոտենցիալ: Միևնույն ժամանակ, նման համակարգում կարող է առաջանալ մի իրավիճակ, երբ պայմաններ են առաջանում Կոնի ընդհանրացված թեռերնի իրականացման համար: Պարաբոլական սահմանափակման պոտենցիալը կախված է էլիպսարդի երկրաչափությունից, որը թույլ է տալիս մագնիսական դաշտի հետ միասին վերահսկել անցումների ռեզոնանսային հանգիսականությունները: Նույնը ցույց է արվել նաև ձգված էլիպսարդային ԲԿ-ի համար: Յույց է արվել էլեկտրոնային զազի համար մեկ մասնիկային անցումների որոշման հնարավորությունը բազմամասնիկային համակարգում, որը գտնվում է խիստ ձգված

Լիպսարդային ՔԿ-ում արտաքին մագնիսականի դաշտի առկայության դեպքում: Այս դեպքում Էլեկտրոնային զազի պարաբոլական սահմանափակող պոտենցիալի առաջացումը պայմանավորված է ՔԿ-երին հատուկ երկրաչափությամբ:

8. Ներկայացված են փորձարարական արդյունքներ, որոնք ներկայացնում են ուսպնյակաձև Ge/Si ՔԿ-երում ծանր խոռոչային զազի համար Կոնի ընդհանրացված թեորեմի իրականացման իրագործելիությունը: Ադիաբատիկ մեթոդի շրջանակներում ստեականորեն ցույց է արվել, որ ՔԿ-ի հատուկ երկրաչափությունը հանգեցնում է երկչափ պարաբոլիկ սահմանափակող պոտենցիալի ձևավորմանը ստիմետրիկ երկուռուցիկ քվանտային ուսպնյակի շառավղային հարթությունում: Հաշվի առնելով ծանր խոռոչների միջև զույգ առ զույգ փոխազդեցությունը որը կախված է միայն մասնիկների միջև հեռավորության մոդուլից, ցույց է արվել հեռավոր ենթակարմիր տիրույթում կլանման մեկ մասնիկային բնույթը: Այս մոդելի համար ռեզոնանսային կլանման հաճախականությունների վերլուծական արտահայտությունը լավ քանակական համաձայնություն մեջ է գտնվում հեռավոր ենթակարմիր սպեկտրոսկոպիայի փորձարարական արդյունքների հետ: Մասնավորապես, կա համընկնում ռեզոնանսային անցումային էներգիաների փորձարարորեն չափված ( $\approx 30\text{meV}$ ) և ստեականորեն հաշվարկված ( $\approx 31\text{meV}$ ) արժեքների միջև:
9. Մտացվել են Կրասցերի սահմանափակող պոտենցիալով միջուկ/կեղև/կեղև գնդաձև քվանտային կետի էներգիական սպեկտրի և ալիքային ֆունկցիաների վերլուծական արտահայտությունները: Ցույց է արվել դեպի արտաքին միջավայր խառնուրդային Էլեկտրոնի արտահոսքի հնարավորությունը: Մեկ Էլեկտրոնային վիճակների համար ուսումնասիրվել են դիպոլային և քվադրուպոլային մոմենտները: Ցույց է արվել, որ դիտարկված համակարգի համար դիպոլային մոմենտը զրո է: Քվադրուպոլային մոմենտի համար ստացվել է վերլուծական արտահայտություն: Դիտարկվել է էքսիտոնային վիճակների խնդիրը միջուկ/կեղև/կեղև գնդաձև քվանտային կետում եռաչափ Վիմտերնից-Սմոդոլինսկու սահմանափակող պոտենցիալով: Հաշվի է առնվել երկրաչափական պարամետրերի բաշխումը միջին արժեքի շուրջ օգտագործելով Գաուսի բաշխման ֆունկցիան, և կառուցվել են էներգիական մակարդակների միջև քվանտային անցումների համապատասխանող կլանման կոորդեր: Այն զագայթները, որոնք համապատասխանում են անկյունագծային անցումներին, ի հայտ են գալիս համեմատաբար բարձր ինտենսիվությամբ, մինչդեռ ոչ անկյունագծային անցման զագայթները ունեն ոչ զրոյական ինտենսիվություն: Մա պայմանավորված է Վիմտերնից-Սմոդոլինսկու սահմանափակող պոտենցիալի անհամաչափությամբ: Ֆոտոյումինեսցենցիայի ինտենսիվության կախվածությունը ընկնող լույսի հաճախականությունից էքսպոնենցիալ նվազում է:
10. Տեսականորեն ուսումնասիրվել են կոմիդալ գնդաձև CdSe/CdS միջուկ/կեղև ՔԿ-ների զծային և ոչ զծային ներգոտիական օպտիկական հատկությունները կենտրոնում դոնորային խառնուրդի առկայության դեպքում: Ջևախիված Պոշ-Թեյլերի պոտենցիալն ընտրվել է որպես գնդաձև միջուկ/կեղև ՔԿ-ի մոդելի սահմանափակող պոտենցիալ: Էլեկտրոնի էներգիան և կապի էներգիան հաշվարկվել են որպես գնդաձև միջուկ/կեղև ՔԿ-ի կիսապայնության ֆունկցիա և ցույց է արվել, որ այն ունի մոնոտոն բնույթ: Կիսապայնության տարբեր արժեքների համար ստացվել են ընկնող լույսի համար զծային, ոչ զծային և ընդհանուր կլանման գործակիցների սպեկտրները: Ցույց է արվել, որ փոքր ՔԿ-երում լույսի կլանումը տեղի է ունենում ավելի մեծ էներգիայով, քան մեծ ՔԿ-երում, և ոչ զծային ուղղումը ավելի մեծ է եղել մեծ շառավղով ՔԿ-երի համար, հետևաբար, ընդհանուր կլանման գործակցի ինտենսիվությունը կլինի ավելին փոքր ՔԿ-երի համար: Դիտարկվել է նաև բեկման ցուցչի փոփոխությունը՝ որպես ֆունկցիա ընկնող լույսի էներգիայից: Բեկման ցուցչի

փոփոխության հաշվարկը, եթե հաշվի է առնվում միայն գծային անդամը, կարող է սխալ լինել հատկապես բարձր օպտիկական ինտենսիվությամբ աշխատող համակարգերի համար՝ պայմանավորված ընկնող օպտիկական ինտենսիվությունից ոչ գծային բաղադրիչի կախումով: Որպես վերջնական քայլ, դիտարկվող համակարգի համար հաշվարկվել է երկրորդ և երրորդ հարմոնիկաների գեներացիայի առաջացումը: ՔԿ-երի շառավիղների մեծացմանը զուգընթաց երկրորդ և երրորդ հարմոնիկաների գեներացիաները դրսևորվում են կարմիր շերտով:

11. Ուսումնասիրվել են GaAs-ից պատրաստված կոնաձև ՔԿ-երի էլեկտրոնային վիճակները և օպտիկական հատկությունները: Աղիաբաստական մոտավորության շրջանակներում ստացվել են էներգիական մակարդակների վերլուծական կախվածությունները կոնաձև ՔԿ-ի երկրաչափական պարամետրերից: «Արագ» ենթահամակարգի յուրաքանչյուր մակարդակ ունի «դանդաղ» ենթահամակարգի մակարդակների ընտանիք, որոնք տեղակայված են դրա վրա: Նշենք, որ էներգիական մակարդակների միջև ներգոտիական անցման հաճախականությունները ընկնում են սպեկտրի ենթակարմիր տիրույթում, մինչդեռ միջգոտիական անցման հաճախականությունները՝ սպեկտրի տեսանելի տիրույթում: Սա թույլ է տալիս դիտարկել կոնաձև ՔԿ-երը որպես ՔԿ LED-երի նախագծման հնարավոր հիմնական տարրեր: Ցույց է տրվել, որ շառավղային քվանտային թվերի համար թույլատրվում են անցումներ նույն քվանտային թվերով մակարդակների միջև, իսկ հիմնական քվանտային թվի համար ցանկացած անցում տարբեր մակարդակների միջև:
12. Կոնաձև ՔԿ-երի համար աղիաբաստական մոտավորության շրջանակներում ստացվել են էներգիական մակարդակների վերլուծական կախվածությունները արտաքին էլեկտրական դաշտի մեծության և երկրաչափական պարամետրերից: Կիրառվող դաշտը հանգեցնում է էլեկտրոնի տեղայնացման տիրույթի փոփոխությանը և էլեկտրոնի էներգիայի նվազմանը: Ե՛վ էներգիական մակարդակների, և՛ ալիքային ֆունկցիաների ավելի ճշգրիտ նկարագրության համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել «դանդաղ» ենթահամակարգի արդյունավետ պոտենցիալի շարքի վերլուծության հաջորդ ուղղումները: Այն դեպքում, երբ բարձրություն/շառավիղ հարաբերությունը ունի բավական մեծ արժեքներ, աղիաբաստիկ մոտավորությունը առանց ուղղումների տալիս է բավարար արդյունք: Առանցքային ալիքային ֆունկցիաների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ առանցքային քվանտային թվի աճի հետ էլեկտրոնի տեղայնացման տիրույթը տեղափոխվում է դեպի կոնաձև ՔԿ-ի գագաթը: Բարձրություն/շառավիղ հարաբերության փոքր արժեքների դեպքում դիպուրային մոմենտի z բաղադրիչի կախվածությունը ոչ գծային է:

## Резюме

Подводя итог, можно выделить следующие основные результаты данной диссертации, отражающие актуальность темы, научную новизну, а также практическую значимость:

1. Исследовано прямое межзонное поглощение света в ансамбле невзаимодействующих сферических и цилиндрических квантовых точек с модифицированным потенциалом Пёшля–Теллера и потенциалом Морса. Применение модифицированного потенциала Пёшля–Теллера дает возможность для более успешного и реалистичного описания поведения носителей заряда в КТ. В частности, в отличие от параболического ограничивающего потенциала возможна квантовая эмиссия носителей заряда из сферических или цилиндрических КТ. В режиме сильного и слабого размерного

квантования получены аналитические выражения для энергетического спектра частиц, коэффициента поглощения и зависимости эффективных пороговых частот поглощения от геометрического размера КТ. Найдены правила отбора, соответствующие различным переходам между квантовыми уровнями. Для облегчения сравнения полученных результатов с вероятными экспериментальными данными учтено дисперсионное распределение квантовых точек по геометрическим размерам по трем экспериментально реализуемым симметричным и асимметричным функциям распределения.

2. Исследованы одноэлектронные состояния в вытянутых и сплюснутых сфероидальных КТ. Рассмотрены три режима размерного квантования. Гибкое манипулирование краем поглощения с помощью малой полуоси вытянутых и сплюснутых сфероидальных КТ делает их потенциальными кандидатами для создания детекторов ближнего инфракрасного диапазона, оптических сенсоров, светодиодов КТ и т. д. Рассчитана вероятность прямых межзонных переходов и определены правила отбора для квантовых чисел. Показано, что адиабатическое приближение применимо для этих задач и дает результаты, очень близкие к точным. Изучена зависимость z-компоненты дипольного момента электрона от малых полуосей вытянутого сфероида. Рассмотрено влияние гидростатического давления и температуры на энергию основного состояния электрона и край поглощения сплюснутой сфероидальной КТ.
3. Вариационным методом исследованы энергия связи и сила осциллятора водородоподобной донорной примеси в сильно сплюснутых и вытянутых эллипсоидных КТ. Энергия связи для основного и первого возбужденных уровней монотонно убывает с увеличением малой полуоси, а зависимость энергии связи от поведения положения примеси по координате имеет немонотонный характер для сплюснутых эллипсоидальных КТ. Показано, что сила осциллятора с ростом стремится к определенному значению для основного состояния. Для первого возбужденного состояния зависимость силы осциллятора от радиальной координаты имеет колоколообразный вид и равна нулю при расположении примеси в центре или вблизи стенки эллипсоида. Показано нарушение цилиндрической симметрии распределения плотности вероятности при изменении положения примеси и восстановление симметрии в пределе приближения примеси к стенке КТ. Смещение примеси приводит к смещению пороговой частоты сечения фотоионизации переходов и уменьшению высоты пиков. В отличие от этого, пороговые частоты остаются неизменными с увеличением угла падения. Аналогичные зависимости и поведение были получены для вытянутой эллипсоидальной КТ.
4. Вариационным методом рассчитаны экситонные, отрицательные, положительные трионы и биэкситонные состояния в сильно вытянутой эллипсоидальной КТ. Обзор результатов показывает, что существует обратная зависимость между энергиями связи и рекомбинации для всех одномерных квазичастиц и параметром. Энергии связи биэкситона и положительного триона имеют максимум, а энергии отрицательного триона и экситона монотонно возрастают с увеличением малой полуоси. Показано, что энергии рекомбинации трионов и биэкситонов близки друг к другу. Радиационное время жизни одномерного экситона и биэкситона в КТ из GaAs составляет около 30 пс и 7 пс для средних значений  $a = 0.5a_b$  и  $a = 5a_b$  соответственно. Таким образом, манипулирование геометрическими параметрами вытянутой КТ позволяет контролировать радиационное время жизни экситонных комплексов. Эта особенность

важна для возможного применения экситонных и биэкситонных комплексов в качестве одно- и двухфотонных источников.

5. Расчеты проведены для экситона и биэкситона в эллипсоидальной КТ, изготовленной из GaAs под воздействием лазерного излучения. Для обеспечения точности результатов все расчеты энергий экситонов и биэкситонов проводятся в рамках вариационного метода. В частности, использовались один и три вариационных параметра для экситона и биэкситона соответственно. Оказалось, что энергия биэкситона примерно равна удвоенному значению энергии экситона во всем интервале изменения малой полуоси КТ. Для построения квантовых переходов между биэкситоном и экситоном в рамках трехуровневой модели (биэкситон-экситон-основное состояние) были рассмотрены соответствующие силы осцилляторов экситонных переходов, а именно для переходов биэкситон-экситон и экситон-основное состояние. Результаты показывают, что энергетические уровни как экситонов, так и биэкситонов увеличиваются с увеличением значения интенсивности лазера и уменьшаются с увеличением малой полуоси. Проанализированы зависимости реальной и мнимой частей восприимчивости третьего порядка, коэффициента поглощения и изменения показателя преломления биэкситона от энергии фотонов вблизи однофотонных и двухфотонных резонансов. Коэффициент поглощения и индуцированное изменение показателя преломления претерпевают синее смещение с увеличением величины интенсивности лазера. Это связано с усилением «одетого» потенциала, вызванным лазером, что приводит к последующему увеличению энергии экситонных комплексов. Оценены времена жизни излучательной рекомбинации экситонов и биэкситонов для различных значений полуосей и величин лазера. Результаты показывают, что время жизни биэкситона уменьшается с увеличением величины интенсивности лазера, при этом время жизни экситона примерно в четыре раза превышает время жизни биэкситона.
6. Эффект Тальбота был показан в ансамбле вертикально связанных цилиндрических квантовых точек InAs/GaAs, освещаемом зондирующими и периодически модулированными полями связи. Связанные КТ моделировались с использованием двойного потенциала Пешля-Теллера, и эта модель позволила контролировать глубину, ширину и расстояние между точками. В этих системах рассматривались экситонные состояния при наличии внешнего электрического поля. Нелинейные изменения показателя преломления и коэффициенты нелинейного поглощения были рассчитаны для различных значений параметров туннелирования. Время жизни экситона и время туннелирования рассчитываются непосредственно: время жизни экситона лежит в диапазоне нс, а время туннелирования - в диапазоне пс. Зависимость времени жизни экситона от полуширины первой КТ имела линейный рост, а зависимость времени туннелирования от того же параметра экспоненциально уменьшалась. В нашей системе наблюдалось влияние туннелирования на формирование эффекта Тальбота. Показано, что эффект туннелирования в сочетании с величиной видимости приводит к возникновению периодической структуры пробного поля. Тем не менее, увеличение параметра туннелирования привело к тому, что периодическая форма сигнала стала менее заметной. Наведенная периодическая форма волны имела наибольшее значение заметности, поскольку малые значения параметра туннелирования приводили к точно нулевым значениям поглощения в узлах распределения поля связи и пикам поглощения в его пучностях. Кроме того, увеличение значения параметра туннелирования приводило к увеличению ширины



линий прозрачности, вызванной туннелированием, что уменьшало видимость поля выходного пробного поля.

7. В рамках адиабатического приближения показано, что в случае сильно сплюснутой эллипсоидальной КТ с непроницаемыми стенками для относительно низких уровней электронного газа реализуется параболический удерживающий потенциал. В то же время в такой системе может возникнуть ситуация, когда реализуются условия выполнения обобщенной теоремы Кона. Примечательно, что удерживающий параболический потенциал зависит от геометрии эллипсоида, что позволяет совместно с магнитным полем управлять резонансными частотами переходов путем изменения геометрических размеров КТ. То же самое показано и для вытянутой эллипсоидальной КТ. Показана возможность выявления одночастичных переходов в многочастичной системе для случая электронного газа, находящегося в сильно вытянутой эллипсоидной КТ, в присутствии однородного внешнего магнитного поля. В этом случае формирование параболического удерживающего потенциала электронного газа обусловлено специфической геометрией КТ.
8. Представлены экспериментальные результаты, позволяющие предположить возможность реализации обобщенной теоремы Кона для газа тяжелых дырок в линзообразной КТ Ge/Si. В рамках адиабатического метода теоретически показано, что особая геометрия КТ приводит к образованию двумерного параболического удерживающего потенциала в плоскости сечения асимметричной двояковыпуклой квантовой линзы. Считая взаимодействие тяжелых дырок парным и зависящим только от модуля расстояния между частицами, показан одночастичный характер поглощения в дальнем ИК-диапазоне. Для этой модели КТ аналитическое выражение для частот резонансного поглощения дает хорошее количественное согласие с результатами дальней ИК-спектроскопии. В частности, наблюдается соответствие между экспериментально измеренными ( $\approx 30$  мэВ) и теоретически рассчитанными ( $\approx 31$  мэВ) значениями энергий резонансного перехода.
9. Получены аналитические выражения для энергетического спектра электронов и волновой функции сферической квантовой точки ядро/оболочка/оболочка с удерживающим потенциалом Кратцера. Показана возможность утечки примесных электронов во внешнюю среду. Рассмотрен характер электростатического поля, создаваемого примесью и электроном в основном состоянии. Для одного электронного состояния изучены дипольный и квадрупольный моменты. Показано, что дипольный момент для рассматриваемой системы равен нулю. Выведена аналитическая формула для квадрупольного момента. Параллельно с этим рассматривается проблема экситонных состояний в сферической квантовой точке ядро/оболочка/оболочка с трехмерным удерживающим потенциалом Винтерница-Сморodinского. Распределение геометрического параметра вокруг среднего значения учтено с использованием распределения Гаусса и построены пики поглощения, соответствующие квантовым переходам между уровнями энергии. Пики, соответствующие диагональным переходам, проявляются с относительно высокой интенсивностью, тогда как пики недиагональных переходов имеют ненулевую интенсивность. Это связано с асимметрией потенциала удержания Винтерница-Сморodinского. Зависимость интенсивности ФЛ от частоты падающего света спадает экспоненциально.
10. Теоретически исследованы линейные и нелинейные внутризонные оптические свойства коллоидных сферических КТ ядро/оболочка CdSe/CdS в присутствии донорной примеси в центре. Модифицированный потенциал Пешля-Теллера был

выбран в качестве модельного потенциала удержания сферической КТ ядро/оболочка. Энергия и энергия связи электрона были рассчитаны как функции полуширины сферической ядра/оболочки КТ и показано, что зависимость монотонна. Получены спектры линейного, нелинейного и полного коэффициентов поглощения энергии падающего света для различных значений полуширины. Показано, что в КТ меньшего размера поглощение света происходило с большей энергией, чем в КТ большего размера, а нелинейная поправка была больше для КТ большего радиуса; поэтому интенсивность полного коэффициента поглощения будет больше для КТ меньшего размера. Также рассматривалось изменение показателя преломления в зависимости от энергии падающего света. Таким образом, расчет изменения показателя преломления с использованием только линейного члена может быть некорректным для систем, работающих, особенно с высокой оптической интенсивностью, из-за сильной зависимости нелинейной составляющей от падающей оптической интенсивности. На заключительном этапе для рассматриваемой системы рассчитывается генерация второй и третьей гармоник. По мере увеличения радиуса КТ генерация второй гармоники и третьей гармоники увеличивались, а также демонстрировали красное смещение. Эти пики находились в слитном виде, которые были разделены для меньших значений полуширины.

11. Исследованы электронные состояния и оптические свойства конических КТ из GaAs. Зависимость энергетических уровней от геометрических параметров конической КТ получена аналитически с помощью адиабатического приближения. На каждом уровне «быстрой» подсистемы расположено семейство уровней «медленной» подсистемы. Отметим, что частота внутризонного перехода между уровнями энергии попадает в ИК-часть спектра, а частота межзонного перехода — в видимую часть спектра. Это позволяет рассматривать конические КТ как потенциальные базовые элементы для создания КТ-светодиодов. Показано, что для радиальных квантовых чисел разрешены переходы между уровнями с одинаковыми квантовыми числами, а для главного квантового числа разрешены любые переходы между разными уровнями.
12. Зависимость энергетических уровней от геометрических параметров конической КТ и величины внешнего электрического поля получена аналитически с помощью адиабатического приближения. Приложенное поле приводит к изменению области локализации электронов и уменьшению их энергии. Для более точного описания как энергетических уровней, так и волновых функций необходимо учесть следующие поправки в разложении эффективного потенциала «медленной» подсистемы. В случае, когда соотношение высота/радиус имеет достаточно большие значения, адиабатический подход без поправок дает приемлемый результат. Анализ аксиальных волновых функций показал, что с увеличением аксиального квантового числа область локализации электрона смещается в сторону конической вершины КТ. При малых значениях отношения высота/радиус зависимость z-компоненты дипольного момента носит нелинейный характер.