

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

ՍԱՐԳՍՅԱՆ ՏԻԳՐԱՆ ԱՐԱՄԻ

ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ՈՒՂՂԱԶԻԳ ԿԱՊՎԱԾ ԳԼԱՆԱՅԻՆ  
ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա.04.10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական 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

SARGSYAN TIGRAN ARAM

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF VERTICALLY COUPLED CYLINDRICAL  
QUANTUM DOTS FOR QUANTUM COMPUTATIONS

SYNOPSIS

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

YEREVAN – 2023

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայ-Ռուսական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ, Դ.Բ. Հայրապետյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝  
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ս. Բասկուտաս  
ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Կ.Հ. Ահարոնյան

Առաջատար կազմակերպություն՝  
ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2023թ. ապրիլի 15-ին, ժամը 12:00-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. փետրվարի 28-ին:

Մասնագիտական խորհրդի ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ  
գիտական քարտուղար՝ Դ.Բ. Հայրապետյան

---

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

Scientific supervisor: PhD, Assoc. Prof. D.B. Hayrapetyan

Official opponents:  
D.Sc., Prof. S. Baskoutas  
D.Sc., Prof. K.H. Aharonyan

Leading institution:  
The Institute for Physical Research NAS RA

The dissertation defense will take place on April 15th, 2023, at 12:00, 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 February 28th, 2023.

Scientific secretary of specialized council PhD, Assoc. Prof. D.B. Hayrapetyan

## Relevance of the scientific research

Nowadays, the Second Quantum Revolution is taking place, during which the quantum properties of materials are actively used to design computers, computing and telecommunication devices of a new generation. Already today, technologies are being developed and implemented that directly make use of individual quantum states and such special properties as superposition and entanglement. In this regard, quantum informatics is based on the conceptual and technological solutions of semiconductor nanophysics and, in particular, on the use of quantum dots (QDs) of different geometries and sizes to implement qubits in these structures. From the abovementioned, it is obvious that the study of semiconductor QDs from the point of view of their application in quantum informatics is an urgent task.

## The main objectives of the dissertation

The goals of the dissertation work are as follows:

- Theoretical investigation of quantum nanostructures with different models of confinement potentials under the influence of external electric, magnetic and intense laser fields.
- Study of linear and nonlinear optical properties, namely, absorption coefficients (ACs), refractive index changes (RIC), second and third harmonic generations (SHG and THG, respectively) of individual and coupled QDs.
- Modeling of practically realized semiconductor and metallic nanoparticles and comparison of the obtained results with experimental data.
- Realization of precise manipulation of electron localization in vertically coupled QDs system with the help of non-resonant laser radiation with Bessel profile.
- Demonstration of the possibility of full control of the Bloch sphere via intense laser field (ILF) and possible realization of one-qubit and CNOT gates based on a vertically coupled QDs system.

## Scientific novelty

- With the help of numerical methods, the energy spectra and wave functions of the electron in an InAs cylindrical QD with different confinement potential models have been calculated under the influence of external fields. Application of an external electric field not only enhances the shift and asymmetry of the wave functions in the case of Morse potential (MP), but also shifts and asymmetrically distorts the ones in the case of modified Pöschl-Teller potential (MPTP). For example,  $n_z \rightarrow n_z \pm 2$  quantum transitions, which were forbidden for MPTP in the absence of an external electric field, become possible.
- Linear and nonlinear optical properties have been investigated for a cylindrical QD under the influence of external fields. Asymmetric distortion of the wave functions for

the symmetric MPTP leads to the arising of some nonlinear effects that were not observed in the absence of an external electric field. For example, one can now observe the generation of the second and third harmonics, which was impossible in the absence of external fields.

- The effect of non-resonant laser radiation with Bessel profile has been investigated on the single cylindrical QD. The impact of ILF leads to the modification of the confinement potential depending on the intensity and peak position of the laser. Particularly, at certain values of the laser parameters a single-well structure transforms into a double-well structure.
- For the first time, the effect of a non-resonant Bessel beam has been investigated on the vertically coupled QDs system and the obtained results have been compared to the ones under a Gaussian laser beam. Under the Bessel laser beam, a third minimum emerges which is crucial for the quantum tunneling effect between the neighboring wells. The critical values of laser parameters, which lead to the shift of the electron localization area, have been obtained.
- Linear, third-order nonlinear and total AC dependences on the incident light energy for different quantum transitions have been revealed. The dependences of total AC at the resonant frequency on the laser parameters of the Bessel beam have “canyon-type” behavior: low and high “plateaus” emerge, which correspond to the restriction and allowance of quantum transitions, respectively.

## **Scientific and practical impact**

The results, obtained in this dissertation work, have two components: academic and practical. From the academic point of view, the numerical and simulational investigation methods have been developed to consider linear and nonlinear optical properties in semiconductor and metallic nanostructures. From the practical point of view, the vertically coupled QDs systems can be noteworthy candidates for the application in quantum technologies and, particularly, in quantum computations. The application of the Bessel ILF gives one opportunity to precisely manipulate the electron localization and, hence, realize localization-based qubit states and quantum gates.

## **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.

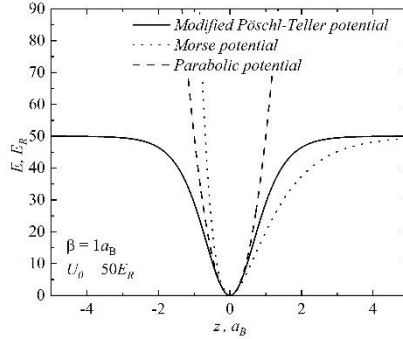
**Chapter 1** is devoted to the theoretical investigation of linear and nonlinear optical properties of different quantum nanostructures with various confinement potential models. Particularly, attention will be drawn to parabolic potential, MPTP and MP, which are given by the following formula:

$$U_{conf}(z) = \frac{U_0}{\beta^2} z^2, \quad (1)$$

$$U_{conf}(z) = U_0 - \frac{U_0}{\cosh^2\left(\frac{z}{\beta}\right)}, \quad (2)$$

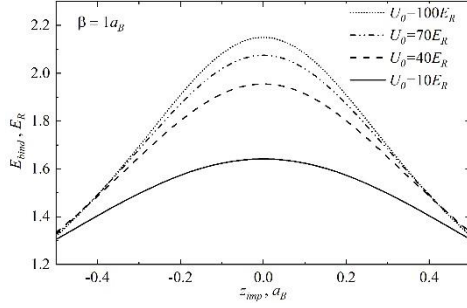
$$U_{conf}(z) = U_0 + U_0 \left( \exp\left(-2\frac{z}{\beta}\right) - 2\exp\left(-\frac{z}{\beta}\right) \right), \quad (3)$$

respectively. Here  $U_0$  is the height and  $\beta$  is the half-width of the potential. Fig. 1 presents the form of the abovementioned confinement potentials.

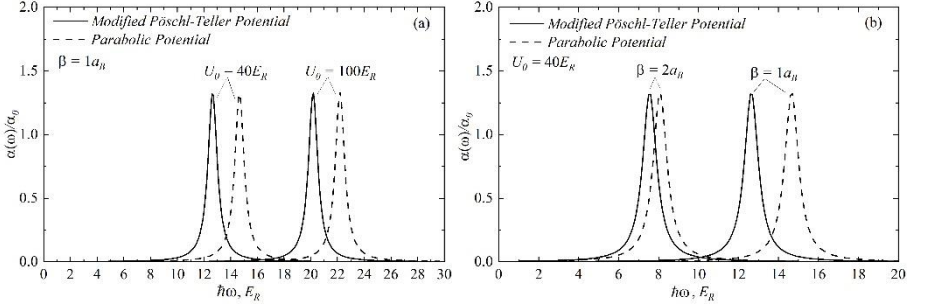


**Fig. 1.** The form of parabolic potential, MPTP and MP.

This Chapter consists of four sections. **Section 1.1** is dedicated to the investigation of absorption spectra of a hydrogen-like donor impurity in GaAs QW with MPTP and a comparison of obtained results with the ones obtained with parabolic potential has been presented. As a first step, the energy of the impurity electron has been obtained in the framework of the variational method. The dependence of the binding energy on the position of a hydrogen-like donor impurity, which has a bellshaped character, has been computed and is presented in Fig. 2. Based on this, the intersubband transition between the ground states of the hydrogen-like donor impurity and conduction band has been considered. Fig. 3 depicts the dependence of AC on parameters  $\beta$  and  $U_0$  both for parabolic potential and MPTP, and it can be seen that with the increase of  $U_0$  (same for decrease of  $\beta$ ) the absorption maximum right-shifts due to the weakening of size quantization effect. Besides, the absorption maximum for parabolic potential is always higher than the one for MPTP, which is explained by the infinite character of the parabolic potential.



**Fig. 2.** The dependence of the electron binding energy on the location of a hydrogen-like donor impurity along the quantization axis for different values of the parameter  $U_0$ , when the parameter  $\beta$  is fixed.



**Fig. 3.** The optical absorption spectrum of the impurity at different values of the parameters a)  $U_0$ , and b)  $\beta$ .

**Section 1.2** is dedicated to the investigation of linear and nonlinear optical properties of InAs cylindrical QDs, namely AC, RIC, SHG and THG, under the influence of external parallel electric and magnetic fields. Parabolic potential is chosen in the radial direction, while in the axial direction MPTP is considered. The linear and third-order nonlinear optical ACs for the considered system can be written as [1]:

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_r}} \frac{\sigma \cdot \hbar \Gamma_{fi}}{(E_{fi} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2} |M_{fi}|^2, \quad (4)$$

$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -\omega \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_r}} \left( \frac{I}{\varepsilon_0 n_r c} \right) \frac{|M_{fi}|^4 2\sigma \cdot \hbar \Gamma_{fi}}{\left[ (E_{fi} - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2 \right]^2} \times \left[ 1 - \frac{|M_{ii} - M_{ff}|^2}{4|M_{fi}|^2} \left( \frac{(E_{fi} - \hbar\omega)^2 - (\hbar\Gamma_{fi})^2 + 2E_{fi}(E_{fi} - \hbar\omega)}{(E_{fi})^2 + (\hbar\Gamma_{fi})^2} \right) \right], \quad (5)$$

where  $\sigma$  is the electron density in a QD,  $E_{\bar{f}i} = E_f - E_i$  is energy difference between the final and initial states ( $f$  and  $i$ , respectively),  $\Gamma_{\bar{f}i} = 1/\tau_{\bar{f}i}$  is the relaxation rate for states  $f$  and  $i$  (corresponds to the full width at half maximum),  $M_{\bar{f}i} = \langle \Psi_f | e z | \Psi_i \rangle$  is the matrix element of dipole moment. The total AC is:

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I). \quad (6)$$

The expression for the SHG susceptibility in a three level system is given by [2–4]:

$$\chi^{(2)}(2\omega) = \frac{e^3 \sigma}{\epsilon_0} \frac{M_{i n_1} M_{n_1 f} M_{f \bar{i}}}{(2\hbar\omega - E_{\bar{f}i} - i\hbar\Gamma_{\bar{f}i})(\hbar\omega - E_{n_1 i} - i\hbar\Gamma_{n_1 i})}. \quad (7)$$

The THG susceptibility in a four level system is [2, 5]:

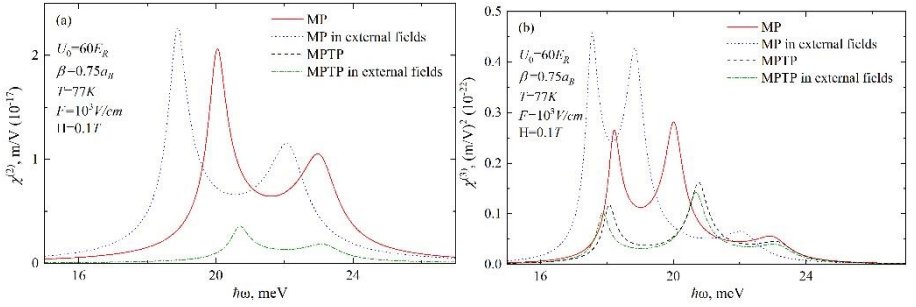
$$\chi^{(3)}(3\omega) = \frac{e^4 \sigma}{\epsilon_0} \frac{M_{i n_1} M_{n_1 n_2} M_{n_2 f} M_{f \bar{i}}}{(3\hbar\omega - E_{\bar{f}i} - i\hbar\Gamma_{\bar{f}i})(2\hbar\omega - E_{n_2 i} - i\hbar\Gamma_{n_2 i})(\hbar\omega - E_{n_1 i} - i\hbar\Gamma_{n_1 i})}. \quad (8)$$

Here  $n_1$  and  $n_2$  are quantum numbers of intermediate levels.

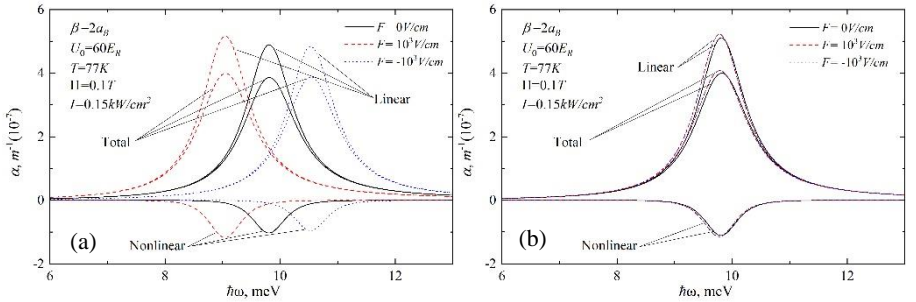
Matrix elements for  $n \rightarrow n \pm 2$  transitions for MPTP are equal to zero and, hence, these transitions are forbidden, so one cannot observe the generation of second harmonics.

The same problem described in Section 1.2 but with MP in the axial direction instead of MPTP is considered in **Section 1.3**. Due to the asymmetric character of MP, there are no restrictions on any transitions in this case and the generation of second harmonics becomes possible.

Further, in **Section 1.4** results from Sections 1.2 and 1.3 have been compared to outline the principal differences between the two models of confinement potential. In particular, the distribution of the probability density in the case of MPTP has a symmetric character, whereas in the case of MP it has an asymmetric character with some shift closer to the finite branch of MP. The difference is more obvious for the second energy level compared with the ground state. Application of external electric field not only enhances the shift and asymmetry of MP, but also shifts and asymmetrically distorts MPTP. The possibility of asymmetric distortion of wave functions for the symmetric MPTP leads to the arising of nonlinear effects that were initially not observable in the absence of an external electric field [6, 7]. Particularly, now it is possible to observe SHG in the case of MPTP, though its intensity is still an order smaller compared to the case of MP (see Fig.4). The change of electric field direction changes the linear, nonlinear and total absorption spectra for the MP significantly (see Fig. 5). In particular, the peak positions of absorption lines undergo blue and red shifts compared to the case when the external electric field is absent. Moreover, the intensity of the line with red shift increases, while the intensity of the line with blue shift decreases. The opposite case is observed for the MPTP, for which the slight shift of absorption lines occurs only in one direction, namely red shift occurs. The latter result is obvious if we remember that the MPTP with electric field has the same form (with mirror reflection approximation) independent from the sign of electric field term in Hamiltonian of the system.



**Fig. 4.** SHG (a) and THG (b) coefficients compared in the absence and presence of external fields for MP and MPTP.



**Fig. 5.** Comparison of AC in the case of MP (a) and MPTP (b) without external fields, in the presence of external electric field and in the presence of reverse electric field for  $|000\rangle \rightarrow |001\rangle$  transition.

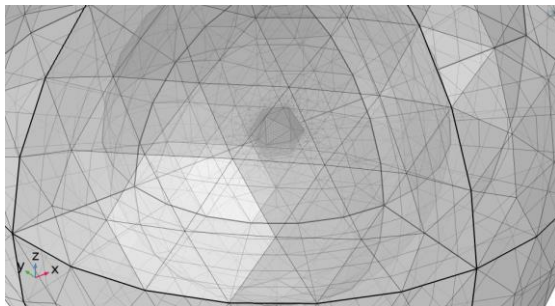
**Chapter 2** is devoted to the modeling of semiconductor and metallic nanoparticles with different geometrical shapes and sizes, and comparison of the obtained results with the ones presented in the literature, particularly, results obtained from experiments. This Chapter consists of four sections.

First, in **Section 2.1**, the modeling process for Au nanoparticles of different shapes and sizes using COMSOL Multiphysics® simulation software [8], which is a cross-platform finite element analysis, solver and multiphysics simulation software, is described. The Electromagnetic Waves, Frequency Domain (marked in the program as *emw*) interface of Radio Frequency (marked in the program as RF) [9] physics is chosen for the modeling of Au nanoparticles and calculations of their optical properties.

Further, in **Section 2.2** the optical properties, namely, plasmon resonances, of the modeled nanoparticles are analyzed. Au nanospheres, nanoshells, nanorods, nanoparticles of cubical, icosahedral, nanopanute and other geometries have been considered in either air, water or silica environment. In particular, Fig. 6 represents the generated mesh for the problem of icosahedra with 100nm side length. It is shown, that the plasmon resonance peak can be moved closer to the



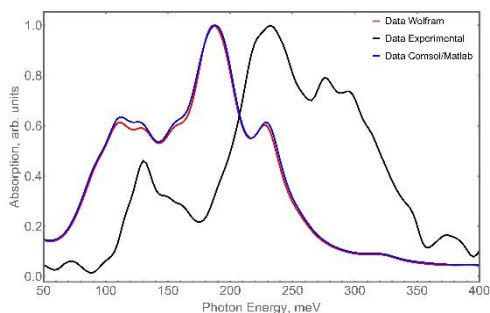
near-infrared region with the change of the geometrical shape and sizes of Au nanoparticles, which can make them extremely useful for biomedical applications, particularly.



**Fig. 6.** The generated mesh for the problem of icosahedra with 100nm side length..

**Section 2.3** presents the report on a comprehensive study of near-infrared photoluminescence and mid-infrared light absorption spectra in structures with Ge/Si QDs [10]. The experimental study was carried out by our colleagues from SPbPU. During the experimental studies, the near-infrared photoluminescence spectra of structures with QDs were measured at different lattice temperatures  $T$  and different optical pumping intensities. In addition to abovementioned, the experimental measurements of photoinduced absorption were carried out.

In **Section 2.4**, the modeling procedure of pyramidal Ge/Si QDs is described and comparison of the obtained results with the ones from the previous section are presented. Calculations have been done independently both in Wolfram Mathematica and COMSOL Multiphysics® environments. In Fig. 7, the photoinduced absorption spectrum of the considered system is presented. The comparison of the obtained experimental and modeled results shows that similar peaks are present in the modeled results, which are, however, shifted by approximately 45 meV. This can be due to the phonon effects, which have energy of the same order for the considered materials.



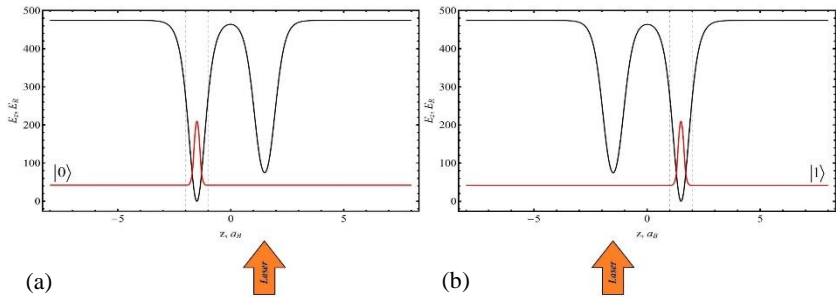
**Fig. 7.** Comparison of the photoinduced absorption spectra of GeSi undoped QD obtained from experiments and from Wolfram and COMSOL models.

In **Chapter 3**, the properties of vertically coupled cylindrical QDs for quantum computations are investigated. The main focus of this work is on the manipulation of the electron localization in a system of vertically coupled cylindrical QDs via ILF. This Chapter consists of three sections.

In **Section 3.1**, the electronic states in a cylindrical QD under the influence of Gaussian and Bessel laser beams are investigated. Particularly, it is shown that under such external influences it is possible to effectively distort the confinement potential and, hence, manipulate the electron localization in the system.

Further, in **Section 3.2**, we are applying the abovementioned to a system of vertically coupled cylindrical QDs. In particular, the effect of Gaussian and Bessel laser beams on the linear and nonlinear optical properties of vertically coupled cylindrical QDs are investigated.

Finally, in **Section 3.3**, the possible application of the considered system in quantum computations are described. Particularly, a system of vertically coupled cylindrical QDs is considered as a qubit with state  $|0\rangle$  corresponding to the charge carrier localized in the left QD and state  $|1\rangle$  in the right QD (see Fig. 8). The localization of the electron is manipulated with the help of Bessel ILF. Full control of Bloch sphere and possible realization of some quantum gates are presented.



**Fig. 8.** Visualization of the states a)  $|0\rangle$ , and b)  $|1\rangle$  in the system of vertically coupled QDs.

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. Ahn, D. and Chuang, S.L., 1987. Calculation of linear and nonlinear intersubband optical absorptions in a quantum well model with an applied electric field. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 23(12), pp.2196-2204.
2. Karabulut, I., Şafak, H. and Tomak, M., 2008. Excitonic effects on the nonlinear optical properties of small quantum dots. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(15), p.155104.

3. Fejer, M.M., Yoo, S.J.B., Byer, R.L., Harwit, A. and Harris Jr, J.S., 1989. Observation of extremely large quadratic susceptibility at 9.6–10.8  $\mu\text{m}$  in electric-field-biased AlGaAs quantum wells. *Physical review letters*, 62(9), p.1041.
4. Huang, Y., Wang, C. and Lien, C., 1995. Electric-field enhancement and extinguishment of optical second-harmonic generation in asymmetric coupled quantum wells. *IEEE journal of quantum electronics*, 31(10), pp.1717-1725.
5. Sirtori, C., Capasso, F., Sivco, D.L. and Cho, A.Y., 1992. Giant, triply resonant, third-order nonlinear susceptibility  $\chi_{3\omega}^{(3)}$  in coupled quantum wells. *Physical review letters*, 68(7), p.1010.
6. Karabulut, İ. and Baskoutas, S., 2009. Second and third harmonic generation susceptibilities of spherical quantum dots: effects of impurities, electric field and size. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 6(1), pp.153-156.
7. Restrepo, R.L., Kasapoglu, E.S.İ.N., Sakiroglu, S., Urgan, F.A.T.İ.H., Morales, A.L. and Duque, C.A., 2017. Second and third harmonic generation associated to infrared transitions in a Morse quantum well under applied electric and magnetic fields. *Infrared Physics & Technology*, 85, pp.147-153.
8. COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
9. RF Module User's Guide. (n.d.). [online] Available at: <https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.rf/RFModuleUsersGuide.pdf> [Accessed 13 Jan. 2023].
10. Vinnichenko, M.Y., Makhov, I.S., Ustimenko, R.V., Sargsian, T.A., Sarkisyan, H.A., Hayrapetyan, D.B. and Firsov, D.A., 2022. Doping effect on the light absorption and photoluminescence of Ge/Si quantum dots in the infrared spectral range. *Micro and Nanostructures*, 169, p.207339.

## The main statements of the dissertation

- Cupola-shaped character of the electron binding energy in the QW with MPTP depending on the impurity position.
- Canceling of the restriction on the  $n_z \rightarrow n_z \pm 2$  transitions for the cylindrical QD with MPTP due to the application of external electric field.
- Merging of the separate SHG peaks with the increase of half-width of the Morse potential for the cylindrical QD.
- Emerging of the anticrossing effect between neighboring states in vertically coupled cylindrical QDs with the shift of the Bessel beam peak position.
- Full manipulation of the Bloch sphere with the help of Bessel laser beam for the vertically coupled cylindrical QDs.

## **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 RAU, as well as were reported at the following local and international scientific conferences:

- V International Conference of Biotechnology and Health, 29-31 October 2020, Yerevan, Armenia.
- Young Scientists Conference «Physics of Nanostructures», 7-8 December 2020, Yerevan, Armenia.
- International Conference "International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies" (YETI-2021), 22-23 April 2021, Saint Petersburg, Russia.
- The XXIII Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics, 22-26 November 2021, St. Petersburg, Russia.
- School on Optics and Photonics 2021, 4-11 December 2021, Yerevan-Ashtarak, Armenia.
- Fifteenth Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 6-10 December 2021, Yerevan, Armenia.
- Sixteenth Annual Scientific Conference of Russian-Armenian University, 5-9 December 2022, Yerevan, Armenia.

## **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 hydrogen-like donor impurity states in a QW with parabolic and modified Pöschl-Teller confinement potentials were considered. Within the framework of the variational theory, the dependence of the binding energy on the position of a hydrogen-like donor impurity, which has a bellshaped character, was computed. The computations were carried out for different values of the potential well depth. It was shown that the binding energy decreases with the increase of the half-width, and increases with the increasing depth of the well. The comparative optical spectra of impurity absorption for a parabolic potential and MPTP were given. As was expected, there is a shift between the optical absorption lines, namely, the lines corresponding to the QW with MPTP have a red shift, due to the finite depth of the latter.
2. The linear and nonlinear properties of InAs cylindrical QDs with two different models of confinement potentials in the axial direction, namely, Morse and modified Pöschl-Teller potentials, have been studied. It has been shown that manipulation of potential parameters leads to the flexible control of the energy spectra and wave functions. The investigation of

AC shows broadening of the absorption curves and increase of total absorption value with the increase of temperature, when the electron population on the energy levels has been taken into account. Results highlight the principal differences between symmetric and asymmetric potentials. Application of external electric fields with opposite signs leads to red and blue shifts of absorption curves for asymmetric MP, while for symmetric MPTP the shifts coincide. Application of external electric field red shifts SHG and THG curves for MP, and their peak intensity increases. In the case of MPTP, it is impossible to observe generation of second harmonics, but the application of external electric field breaks selection rules and, thus, leads to emergence of SHG effects. The results obtained above suggest that the parameters of potentials and the strength of the electric and magnetic fields significantly influence the electronic structure of the system and the nonlinear optical properties.

3. The energy states of an electron in a cylindrical InAs/GaAs QD have been considered and the possibility of manipulating them by external laser radiation of two types: Gaussian and Bessel, have been investigated. The wave functions under the action of a Gaussian and an unshifted Bessel laser beam always remain symmetrical with respect to the center of the system. However, the displacement of the position of the latter from the center of the system leads to a shift in the minimum of the QD potential, and, further, to the formation of a second minimum, which seriously affects the electron localization in the system. By manipulating the laser parameters, it is possible to control not only the absolute values, but also the difference between the values of the energy levels.
4. The behavior of vertically coupled cylindrical QDs structure under the effect of ILFs, which have two beam profiles: Gaussian and Bessel, have been considered. The confinement potential of coupled QDs system in z-direction was modeled by MPTP, which was manipulated and distorted by ILFs. The distortion was made both via laser-dressing parameter, as well as laser beam peak position shift. In particular, increase of the laser-dressing parameter without shifting the beam peak position in the case of Bessel profile gives rise to the third local minimum in the interdot barrier region, which can be crucial in such phenomena as electron tunneling. The shift of the Bessel laser beam's main peak to one of the QDs centers also leads to the emergence of the third minimum, which arises from the splitting of the corresponding minimum into two minima: one near the interdot barrier region and another near the edge of the corresponding QD. The initially symmetrical character of the confining potential leads to the symmetric distribution of the wave functions between the neighboring QDs, however, the dislocation of the laser beam peak breaks down the symmetry. Moreover, further dislocation of the Bessel laser beam peak position can lead to anticrossing effects between energy levels. ILF also affects the selection rules, which are acting in the system. In particular, prohibition of some transitions can be transformed or totally removed. For the resonant frequency of total AC interesting dependences on the laser parameters have been obtained. It has been shown, that special regions can be distinguished for which the absorption is prohibited. The same has been done for SHG and THG: special regions of the energy differences between the corresponding quantum levels have been

highlighted for which the energy differences between two or three corresponding transitions for SHG and THG, respectively, tend to zero.

5. Possibility of the full manipulation of the Bloch sphere with the help of Bessel laser beam for the vertically coupled cylindrical QDs have been shown. Basis states, corresponding to the full localization of the electron in the left and right QDs, have been constructed with the help of Bessel ILF irradiating the right and left QD centers, respectively. States obtained in the following way are orthonormal and any other state  $|\psi\rangle$  can be represented as a superposition of those basis states. By changing the intensity and the peak position of the incident Bessel laser beam, one can achieve rotations on the Bloch sphere by angle  $\theta$ , while there is a precession of the angle  $\varphi$  at the frequency of the occupancy oscillations. Further, a pair of vertically coupled cylindrical QDs can be treated as two qubits. In this case, application of two independent Bessel ILFs can act as a CNOT gate.

### List of published works on the dissertation topic

7 scientific papers have been published on the topic of the dissertation:

1. Sargsian, T.A., 2019. Absorption Spectra of Hydrogen-Like Donor Impurity in GaAs Quantum Well with Modified Pöschl-Teller Potential. *Journal of Contemporary Physics*, 54(2), pp.168-174.
2. 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.
3. Sargsian, T., 2022. External Electric Field Effect on Interband Optical Absorption and Photoluminescence in Vertically Coupled Cylindrical Quantum Dots with Modified Pöschl-Teller Potential. In *International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies: Proceedings of the YETI 2021, St. Petersburg, Russia* (pp. 377-384). Springer International Publishing.
4. 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. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2227, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
5. Vinnichenko, M.Y., Makhov, I.S., Ustimenko, R.V., Sargsian, T.A., Sarkisyan, H.A., Hayrapetyan, D.B. and Firsov, D.A., 2022. Doping effect on the light absorption and photoluminescence of Ge/Si quantum dots in the infrared spectral range. *Micro and Nanostructures*, 169, p.207339.
6. 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.

7. Саргсян, Т.А., 2023. Электронные состояния в цилиндрической квантовой точке под воздействием гауссова и бесселева лазерных пучков. *Известия НАН Армении, Физика*, 58(1), с. 55-64.

## Ամփոփում

Ամփոփելով՝ կարելի է առանձնացնել այս ատենախոսության հետևյալ հիմնական արդյունքները, որոնք արտացոլում են թեմայի արդիականությունը, գիտական նորությունը, ինչպես նաև գործնական նշանակությունը.

1. Դիտարկվում են ջրածնանման դոնորային խառնուկային վիճակները քվանտային փոսում (ՔՓ)՝ սահմանափակող պարաբոլիկ և Պեշլ-Թելլերի ձևափոխված պոտենցիալներով (ՊԹՁՊ): Վարիացիոն տեսության շրջանակներում հաշվարկվել է կապի էներգիայի կախվածությունը ջրածնանման դոնորային խառնուկի դիրքից, որն ունի զանգվածն քնույթ: Հաշվարկներն իրականացվել են պոտենցիալային փոսի խորության տարբեր արժեքների համար: Ցույց է տրված, որ կապի էներգիան նվազում է կիսալայնության աճի հետ և աճում է փոսի խորության մեծացման հետ: Ներկայացված են խառնուկային կլանման համեմատական օպտիկական սպեկտրները պարաբոլիկ պոտենցիալի և ՊԹՁՊ-ի համար: Ինչպես և սպասվում էր, օպտիկական կլանման կորերի միջև կա տեղաշարժ, մասնավորապես, ՊԹՁՊ-ով ՔՓ-ին համապատասխանող կորերը կարմիր տեղաշարժի են ենթարկվում՝ վերջինիս վերջավոր խորության պատճառով:
2. Ուսումնասիրվել են զլանային InAs քվանտային կետերի (ՔԿ) գծային և ոչ գծային հատկությունները առանցքային ուղղությամբ սահմանափակող պոտենցիալի երկու տարբեր մոդելներով՝ Մորսի պոտենցիալով (ՄՊ) և ՊԹՁՊ-ով: Ցույց է տրվել, որ պոտենցիալ պարամետրերի ղեկավարումը հանգեցնում է էներգիական սպեկտրների և ալիքային ֆունկցիաների ճկուն կառավարման: Կլանման գործակցի (ԿԳ) ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս ջերմաստիճանի բարձրացման հետ կլանման կորերի ընդլայնում և ընդհանուր ԿԳ-ի արժեքի աճ, երբ հաշվի է առնվել էլեկտրոնների կողմից էներգիական մակարդակների բնակեցվածությունը: Արդյունքները ընդգծում են համաչափ և անհամաչափ պոտենցիալների հիմնարար տարբերությունները: Հակառակ նշանների արտաքին էլեկտրական դաշտերի կիրառումը հանգեցնում է կլանման կորերի կարմիր և կապույտ տեղաշարժերի անհամաչափ ՄՊ-ի համար, մինչդեռ համաչափ ՊԹՁՊ-ի համար տեղաշարժերը համընկնում են: Արտաքին էլեկտրական դաշտի կիրառումը հանգեցնում է ՄՊ-ի համար երկրորդ և երրորդ հարմոնիկների գեներացիայի կորերի (համապատասխանաբար ԵրկՎ և ԵրրՎ) կարմիր տեղաշարժի, և դրանց մաքսիմալ արժեքի աճի: ՊԹՁՊ-ի դեպքում անհնար է դիտարկել ԵրկՎ, սակայն արտաքին էլեկտրական դաշտի կիրառումը խախտում է ջոկման կանոնները և, հետևաբար, հանգեցնում է ԵրկՎ-ի երևույթի ի հայտ գալուն: Վերոնշյալ արդյունքները ցույց են տալիս սահմանափակող պոտենցիալի պարամետրերի և էլեկտրական ու մագնիսական դաշտերի լարվածությունների զգալի

ազդեցությանը համակարգի էլեկտրոնային կառուցվածքի և ոչ գծային օպտիկական հատկությունների վրա:

3. Դիտարկվել են էլեկտրոնի էներգիական վիճակները զյանաձև InAs/GaAs ՔԿ-ում և ուսումնասիրվել են դրանք երկու տեսակի՝ Գաուսյան և Բեսսելյան արտաքին լազերային ճառագայթմամբ մանիպուլյացիայի ենթարկելու հնարավորությունը: Այլըստի պայմանները Գաուսյան և չտեղաշարժված Բեսսելյան լազերային ճառագայթների ազդեցության տակ միշտ համաչափ են մնում համակարգի կենտրոնի նկատմամբ: Սակայն վերջինիս դիրքի շեղումը համակարգի կենտրոնից հանգեցնում է ՔԿ-ի սահմանափակող պոտենցիալի մինիմումի տեղաշարժին, իսկ հետագայում՝ երկրորդ մինիմումի ձևավորմանը, ինչը լրջորեն ազդում է համակարգում էլեկտրոնների տեղայնացման վրա: Լազերային պարամետրերը փոփոխելով կարելի է վերահսկել ոչ միայն էներգիաների բացարձակ արժեքները, այլև էներգիական մակարդակների արժեքների տարբերությունը:
4. Դիտարկվել է ուղղաձիգ կապված զյանաձև ՔԿ-երի համակարգի վարքը ինտենսիվ լազերային դաշտերի (ԻԼԴ) ազդեցության ներքո, երկու ճառագայթային պրոֆիլներով՝ Գաուսյան և Բեսսելյան: Կապված ՔԿ-երի համակարգի սահմանափակող պոտենցիալը z ուղղությամբ մոդելավորվել է ՊԹՁՊ-ի միջոցով, որը ձևավորվել է ԻԼԴ-ի կողմից: Ձևափոխությունն առաջանում է ինչպես լազերային պարամետրի փոփոխությամբ, այնպես էլ լազերային փնջի գազաթի դիրքը տեղաշարժելով: Մասնավորապես, լազերային պարամետրի արժեքի աճը առանց փնջի գազաթի դիրքը փոխելու Բեսսելյան պրոֆիլի դեպքում հանգեցնում է միջկետային արգելքի տիրույթում երրորդ մինիմումի ի հայտ գալուն, ինչը կարող է առանցքային նշանակություն ունենալ այնպիսի երևույթներում, ինչպիսին է էլեկտրոնային թունելավորումը: Բեսսելյան լազերային փնջի հիմնական գազաթի տեղաշարժը դեպի ՔԿ-ի կենտրոններից մեկը նույնպես հանգեցնում է երրորդ մինիմումի ի հայտ գալուն, որն առաջանում է համապատասխան սկզբնական մինիմումի երկու մինիմումների բաժանման պատճառով՝ մեկը միջկետային արգելքի տիրույթի մոտակայքում, իսկ մյուսը՝ համապատասխան ՔԿ-ի եզրին մոտ: Սահմանափակող պոտենցիալի սկզբնական համաչափ բնույթը հանգեցնում է այլըստի պայմաններին համաչափ բաշխմանը հարևան ՔԿ-երի միջև, սակայն լազերային ճառագայթի գազաթի տեղաշարժը խախտում է այս համաչափությունը: Բացի այդ, Բեսսելյան լազերային ճառագայթի գազաթի դիրքի հետագա փոփոխությունը կարող է հանգեցնել էներգիական մակարդակների միջև հակահատման: ԻԼԴ-ը նաև ազդում է համակարգում գործող ջոկման կանոնների վրա: Մասնավորապես, վերջինիս ազդեցության տակ որոշ անցումների արգելքը կարող է վերափոխվել կամ ամբողջությամբ հանվել: Հետաքրքիր կախվածություններ են ստացվել լազերային պարամետրերից ընդհանուր ԿԳ-ի ռեզոնանսային հաճախականության համար: Ցույց է տրված, որ հնարավոր է առանձնացնել հատուկ տիրույթներ, որոնց համար կլանումն արգելված է: Նույնը արվել է ԵրկՀԳ-ի և ԵրրՀԳ-ի համար. բացահայտվել են համապատասխան քվանտային մակարդակների միջև էներգիական տարբերությունների հատուկ տիրույթներ, որոնց համար ԵրկՀԳ-ի և



ԵրբՀԳ-ի համապատասխանաբար երկու և երեք անցումների միջև էներգիական տարբերությունները ձգտում են գրոյի:

5. Ցուցադրվել է Բոլիսի գնդոլորտի ամբողջական դեկավարման հնարավորությունը՝ օգտագործելով Բեսսելյան լագերային փունջը ուղղաձիգ կապված զլանաձև ԶԿ-երի համար: Չախ և աջ ԶԿ-երում էլեկտրոնի ամբողջական տեղայնացմանը համապատասխանող բազիսային վիճակները կառուցվել են Բեսսելյան ԻԼԴ-ի միջոցով, որը ճառագայթում է համապատասխանաբար աջ և ձախ ԶԿ-երի կենտրոնները: Վերոնշյալ եղանակով ստացված վիճակները օրթոնորմալ են, և ցանկացած այլ  $|\psi\rangle$  վիճակ կարող է ներկայացվել որպես այս բազիսային վիճակների սուպերպոզիցիա: Փոխելով Բեսսելյան լագերային փնջի ինտենսիվությունը և անկման դիրքը, հնարավոր է հասնել Բոլիսի գնդոլորտի վրա  $\theta$  անկյամբ պտույտի: Այս դեպքում  $\varphi$  անկյամբ տեղի է ունենում պրեցեսիա՝ Ռաբիի տատանումների հաճախությամբ: Բացի այդ, ուղղաձիգ կապված զլանաձև ԶԿ-երի գույգերը կարելի է համարել երկու քյուբիթ: Այս դեպքում երկու անկախ Բեսսելյան ԻԼԴ-երի օգտագործումը կարող է գործել որպես CNOT տրամաբանական էլեմենտ:

## Резюме

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

1. Рассмотрены водородоподобные донорные примесные состояния в квантовой яме (КЯ) с ограничивающим параболическим и модифицированным потенциалом Пёшля-Теллера (МППТ). В рамках вариационной теории рассчитана зависимость энергии связи от положения водородоподобной донорной примеси, имеющая колоколообразный характер. Расчеты проводились для различных значений глубины потенциальной ямы. Показано, что энергия связи уменьшается с увеличением полуширины и увеличивается с увеличением глубины ямы. Приведены сравнительные оптические спектры примесного поглощения для параболического потенциала и МППТ. Как и ожидалось, имеется сдвиг между кривыми оптического поглощения, а именно, кривые, соответствующие КЯ с МППТ, имеют красное смещение из-за конечной глубины последней.
2. Исследованы линейные и нелинейные свойства цилиндрических квантовой точке (КТ) InAs с двумя различными моделями ограничивающего потенциала в аксиальном направлении: потенциалом Морса (ПМ) и МППТ. Было показано, что манипулирование параметрами потенциала приводит к гибкому управлению энергетическими спектрами и волновыми функциями. Исследование коэффициента поглощения (КП) показывает уширение кривых поглощения и увеличение величины полного КП с повышением температуры, когда учитывалась заселенность электронами энергетических уровней. Результаты подчеркивают принципиальные различия между симметричными и асимметричными потенциалами. Приложение

внешних электрических полей противоположных знаков приводит к красным и синим смещениям кривых поглощения для асимметричного ПМ, а для симметричного МППТ сдвиги совпадают. Приложение внешнего электрического поля приводит к красному сдвигу кривых генерации второй и третьей гармоник (ГВГ и ГТГ, соответственно) для ПМ, а их пиковая интенсивность увеличивается. В случае МППТ невозможно наблюдать ГВГ, но приложение внешнего электрического поля нарушает правила отбора и, таким образом, приводит к возникновению эффектов ГВГ. Полученные выше результаты свидетельствуют о существенном влиянии параметров потенциалов и напряженности электрического и магнитного полей на электронную структуру системы и нелинейно-оптические свойства.

3. Рассмотрены энергетические состояния электрона в цилиндрической КТ InAs/GaAs и исследована возможность манипулирования ими внешним лазерным излучением двух типов: гауссовым и бesselевым. Волновые функции под действием гауссова и несмещенного бesselева лазерного пучков всегда остаются симметричными относительно центра системы. Однако смещение положения последнего от центра системы приводит к смещению минимума потенциала КТ и, далее, к формированию второго минимума, что серьезно влияет на локализацию электронов в системе. Манипулируя параметрами лазера, можно управлять не только абсолютными значениями, но и разницей между значениями энергетических уровней.
4. Рассмотрено поведение структуры вертикально связанных цилиндрических КТ под действием интенсивных лазерных полей (ИЛП), имеющих два профиля пучка: гауссов и бesselев. Ограничивающий потенциал системы связанных КТ в направлении  $z$  моделировался с помощью МППТ, которым манипулировали и искажали посредством ИЛП. Искажение производилось как за счет изменения лазерного параметра, так и за счет сдвига положения пика лазерного пучка. В частности, увеличение значения лазерного параметра без смещения положения пика пучка в случае бesselева профиля приводит к возникновению третьего локального минимума в области межточечного барьера, который может иметь ключевое значение в таких явлениях, как туннелирование электронов. Смещение основного пика бesselева лазерного пучка к одному из центров КТ также приводит к возникновению третьего минимума, который возникает из-за расщепления соответствующего исходного минимума на два минимума: один вблизи области межточечного барьера, а другой вблизи края соответствующей КТ. Изначально симметричный характер ограничивающего потенциала приводит к симметричному распределению волновых функций между соседними КТ, однако смещение пика лазерного пучка нарушает данную симметрию. Кроме того, дальнейшее смещение положения пика бesselева лазерного пучка может привести к эффектам антикроссинга между энергетическими уровнями. ИЛП также влияет на правила выбора, действующие в системе. В частности, под действием последнего запрет на некоторые переходы может быть трансформирован или вовсе снят. Для резонансной частоты полного КП получены интересные зависимости от параметров лазера. Показано, что можно выделить особые

области, для которых поглощение запрещено. То же самое сделано для ГВГ и ГТГ: выделены особые области разностей энергий между соответствующими квантовыми уровнями, для которых разности энергий между двумя или тремя переходами для ГВГ и ГТГ стремятся к нулю.

5. Показана возможность полной манипуляции сферой Блоха с помощью бесселева лазерного пучка для вертикально связанных цилиндрических КТ. Базисные состояния, соответствующие полной локализации электрона в левой и правой КТ, были построены с помощью бесселева ИЛП, облучающего, соответственно, центры правой и левой КТ. Состояния, полученные вышесказанным образом, являются ортонормированными, и любое другое состояние  $|\psi\rangle$  может быть представлено как суперпозиция этих базисных состояний. Изменяя интенсивность и положение пика падающего бесселева лазерного пучка, можно добиться поворотов на сфере Блоха на угол  $\theta$ . При этом происходит прецессия угла  $\varphi$  с частотой колебаний заполнения. Кроме того, пару вертикально связанных цилиндрических КТ можно рассматривать как два кубита. В этом случае в качестве вентиля CNOT может выступать применение двух независимых бесселевых ИЛП.