



Araştırma Makalesi

## Yarıiletken Silindirik Kuantum Noktanın Optik Özellikleri

Arif BABANLI<sup>1</sup>, Vepa SABYROV<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 32000, Isparta, Türkiye

\*yazışılan yazar e-posta: sabyroww@gmail.com

(Alınış: 01.07.2022, Kabul: 08.11.2022, Yayımlanma: 25.11.2022)

**Öz:** Bu çalışmada yarıiletken silindirik kuantum noktanın optik özellikleri araştırılmıştır. Etkin kütle ve parabolik bant yaklaşımı dikkate alınarak yarıiletken silindirik kuantum noktanın enerji spektrumu ve dalga fonksiyonu köşegenleştirme yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde ettiğimiz öz değer ve öz fonksiyon ifadelerini kullanarak alt enerji seviyeler arası optik geçişler için soğurma katsayısını hesaplamak için kullanılmıştır. Yarıiletken silindirik kuantum noktanın soğurma katsayısı gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak silindirin yarıçapı ve yüksekliği gibi parametrelerinin farklı değerlerine göre davranışı sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca soğurma katsayısı manyetik alanın farklı değerlerine göre değişimi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yarıiletken kuantum noktanın soğurma katsayısı manyetik alanın değişiminden bağımsız ve silindirin yarıçap ve yükseklik parametrelerinin değişimine bağlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Soğurma katsayısı, Kuantum nokta, Optik geçişler

### Optical Properties of Semiconductor Cylindrical Quantum Dot

**Abstract:** In this study, the optical properties of semiconductor cylindrical quantum dots were investigated. Considering the effective mass and parabolic band approach, the energy spectrum and wave function of the semiconductor cylindrical quantum dot are calculated using the diagonalization method. With the help of energy spectrum and wave function expressions, the expression of the absorption coefficient for the optical transitions between the lower energy levels was calculated. The absorption coefficient of the semiconductor cylindrical quantum dot we obtained, as a function of the incident photon energy, has been numerically investigated according to the different values of the radius and height parameters of the cylinder. In addition, the variation of the absorption coefficient according to different values of the magnetic field was investigated. According to the results, it has been determined that the absorption coefficient of the semiconductor quantum dot is independent of the change of the magnetic field and depends on the change of the radius and height parameters of the cylinder.

**Key words:** Absorption coefficient, Quantum dot, Optical transitions

### 1. Giriş

Aşındırma ve epitaksiyel büyütme gibi tekniklerin geliştirilmesi ile nanometre boyutunda yarı iletken heteroyapıların üretilmesi mümkün hale gelmiştir [1-3]. Yarıiletken heteroyapılar iki farklı yasak band enerji aralığına sahip yarıiletkenlerden oluşur. Yarıiletkenlerin birleşme bölgesinde, farklı yasak band enerji aralıklarından dolayı bu bölgede saklayıcı potansiyel meydana gelir. Saklayıcı potansiyelin türüne bağlı, kuantum

kuyu, kuantum tel, kuantum halka ve kuantum nokta gibi nanoboyuta sahip düşük boyutlu kuantum sistemleri oluşturulabilir. Böylece, düşük boyutlu yarıiletken heteroyapıların boyut ve dış parametreleri değiştirilerek istenilen biçimde elektronik ve optik özelliklere sahip kuantum sistemleri elde edilebilir [4-7].

Bilindiği üzere katıların elektronik enerji seviyelerinde bir elektronun uyarılmış hale geçmesi için gelen foton enerjisi  $\hbar\omega \geq E_j - E_i$  koşulunu sağlaması gerekmektedir. Diğer taraftan elektronun bir enerji durumundan başka bir enerji durumuna optik geçiş yapması için elektrik dipol matris elemanın sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Bu ise katıların elektronik enerji seviyelerinde izinli ve yasak optik geçişlerini ortaya çıkarmaktadır. Katılarda elektronun bir enerji durumundan başka bir enerji durumuna optik geçişi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar, bantlar arası, enerji seviyeler arası ve alt enerji seviyeler arası optik geçişleridir [8]. Bantlar arası optik geçişte elektron valans bandından iletkenlik bandına geçiş yapar. Enerji seviyeler arası optik geçişte elektron aynı bant içinde bulunduğu enerji seviyeden daha üst enerji seviyeye geçer. Alt enerji seviyeler arası optik geçişte ise bulunduğu enerji seviye içinde bir kuantum durumundan başka bir kuantum durumuna geçişler gerçekleşmektedir.

Son yıllarda yapılan teorik çalışmalara göre düşük boyutlu yarıiletken heteroyapıların optik özellikleri dış alan, yapı ve boyut gibi parametrelerinden etkilendiği görülmektedir [9-12]. Liu vd. [13] çalışmasında direk elektronik seviyeler arası optik geçişler için GaAs/AlGaAs silindirik kuantum noktanın soğurma katsayısını ve kırılma indisini Al konsantrasyonuna göre davranışı araştırmışlar. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre Al konsantrasyonu arttıkça soğurma katsayısının maksimumu artmaktadır ve gelen foton enerjisine göre sağa kaymaktadır. Diğer bir çalışmada Ungan vd. [14] elektronik seviyeler arası optik geçişleri için silindirik kuantum noktanın optik özellikleri elektrik alan ve silindirin boyut parametrelerine göre değişimi incelenmiştir. Makalede yazarlar, soğurma katsayısının maksimumu elektrik alanın artmasıyla, düşmesi ve gelen foton enerjisine göre sağa kaymasını gözlemlemişler. Buna benzer sonuçlar [15-21] makalelerinde de elde edilmiştir.

Düşük boyutlu yapıların optik özellikleri yapının geometrisinden etkilendiği, görülmektedir [22-24]. Örneğin, Xie [25] makalesinde halka geometrisine sahip iki boyutlu kuantum sistemin soğurma katsayısı ve kırılma indisi halkanın yarıçapı ve manyetik alan parametrelerine göre değişimi araştırılmıştır. Makalede halkanın yarıçapının artmasıyla soğurma katsayısının maksimumu gelen foton enerjisine göre sağa kayma gibi bir sonuç elde etmişler. Ayrıca manyetik alanın artmasıyla soğurma maksimumu artmaktadır ve sağa kaymaktadır. İki boyutlu yarıiletken kuantum telin optik özellikleri halkanın boyut, elektrik alan ve manyetik alan parametrelerine göre değişimi Türkoğlu [26] makalesinde araştırılmıştır.

Bu çalışmada yarıiletken silindirik kuantum noktanın alt enerji seviyeler arası optik geçişleri dikkate alınarak optik özellikleri araştırılmaktadır. Bu geçişlerdeki soğurma katsayısının gelen foton enerjisine göre değişimi, silindirin yüksekliği ve yarıçapı gibi parametrelerine bağlı olarak incelenmektedir. Ayrıca soğurma katsayısının manyetik alanın farklı değerlerine göre değişimi araştırılmaktadır.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1. Enerji spektrum ve dalga fonksiyon**

Silindirik kuantum nokta,

$$V(\rho, \phi, z) = \frac{\mu\omega_\rho^2\rho^2}{2} + \frac{\mu\omega_z^2z^2}{2} \quad (1)$$

şeklinde verilen bir potansiyeliyle tanımlanır. Burada,  $\omega_\rho = \frac{\hbar}{\mu\rho_0^2}$ ,  $\omega_z = \frac{\hbar}{\mu L^2}$  ifadeleri silindirin  $\rho_0$  yarıçapını ve  $L$  yüksekliğini belirler. Kuantum sistemin Hamiltonu

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2\mu} \left( \mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 + V(r) + \frac{1}{2} g\sigma_z\mu_B H \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Burada,  $\mathbf{p}$  momentum operatörü,  $\mathbf{A}$  vektör potansiyeli,  $e$  elektronun yükü,  $\mu$  yüklü taşıyıcının etkin kütlesi,  $g$  Lande faktörü,  $\sigma_z$  Pauli matrisi,  $\mu_B$  Bohr magnetonu,  $H$  ise manyetik alan şiddetidir. Sisteme uygulanan manyetik alan vektörü silindirin ana eksenine paralel yönde, yani  $z$  yönündedir. Bu durumda vektör potansiyeli  $A_\rho, z = 0$ ,  $A_\phi = \frac{H\rho}{2}$  şeklinde tanımlanır. Böylece kuantum sistemin Schrödinger denklemi polar koordinatlarda

$$\frac{1}{2\mu} \left( \mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right)^2 \psi + V(r)\psi + \frac{1}{2} g\sigma_z\mu_B H\psi = E\psi \quad (3)$$

olarak yazılır. Bu denklemin çözümü sonucunda

$$\begin{aligned} \psi(\rho, \phi, z) = & \frac{e^{im\phi}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\lambda} \left( \frac{n_\rho!}{\Gamma(n_\rho + m + 1)} \right)^{1/2} \\ & \times e^{-\frac{\rho^2}{4\lambda^2}} \left( \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2} \right)^{\frac{m}{2}} L_{n_\rho}^m \left( \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda^2} \right) \left( \frac{\mu\omega_z}{\pi\hbar} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} e^{-\frac{z^2}{\eta^2}} H_n \left( \frac{z}{\eta} \right) \chi_\sigma \end{aligned} \quad (4)$$

dalga fonksiyonu ve

$$E = \hbar\Omega \left( n_\rho + \frac{m+1}{2} \right) + \frac{\hbar\omega_c m}{2} + \sigma \frac{\mu_B H g}{2} + \hbar\omega_z \left( n + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

enerji spektrumu elde edilir. Burada,  $L_n^m(x)$  Laguerre fonksiyonu,  $H_n(x)$  Hermite fonksiyonu,  $\Gamma(x)$  Gamma fonksiyonu. Denklem (4) ve denklem (5) yer alan kuantum sayıları  $n_\rho = 0, 1, 2, \dots$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  değerlerini alır ve  $\sigma = \pm 1$  kuantum sayısı elektronun spin yukarı  $\chi_{+1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  ve  $\chi_{-1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  spin aşağı değerlerine karşılık gelir. Ayrıca, yukarıdaki denklemde

$$\begin{aligned} \Omega = \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_\rho^2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{\hbar}{\mu\Omega}} \\ \eta = \sqrt{\frac{\hbar}{\mu\omega_z}} \end{aligned} \quad (6)$$

parametreleri tanımlanmıştır. Burada,  $\omega_c = \frac{eH}{\mu c}$  siklotron frekansı.

## 2.2. Soğurma katsayısı

Alt enerji seviyeler arası optik geçişleri için kuantum sistemin soğurma katsayısı

$$\alpha = \frac{\pi\omega e^2}{cn_r\epsilon_0} \frac{2}{V} \sum_{ij} |\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}|^2 \delta(E_j - E_i - \hbar\omega) \quad (7)$$

şeklinde verilmektedir [27]. Burada,  $ij$  – indisleri sırasıyla elektron enerji durumunun ilk ve son kuantum halini belirler,  $\mathbf{e}$  elektromanyetik dalganın polarize vektörü,  $n_r$  kırılma indisi,  $\epsilon_0$  dielektrik sabiti,  $V = \pi\rho^2L$  silindirin hacmi. Denklemde yer alan  $\delta(x)$  Dirac delta fonksiyonu

$$\delta(x) \approx \frac{1}{\pi} \frac{G}{x^2 + G^2} \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer denklemde  $x$  argümanı yerine  $ij$  indislerine ait denklem (5)'de elde ettiğimiz enerji spektrumu yazılırsa,

$$\delta(E_T) \approx \frac{1}{\pi} \frac{G}{E_T^2 + G^2} \quad (9)$$

ifadesi elde edilir. Burada,

$$E_T = \hbar\Omega \left( (n'_\rho - n_\rho) + \frac{(m' - m) + 1}{2} \right) + \hbar\omega_c \frac{(m' - m)}{2} - \hbar\omega \quad (10)$$

eşittir. Denklem (7)'da  $|\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}|$  elektrik dipol matris elemanı silindirik koordinatlarda,

$$|\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}| = e \langle i | \rho e^{\pm i\phi} | j \rangle \quad (11)$$

şeklinde yazılır. Kuantum sistemine etkiyen elektromanyetik dalga vektörü  $z$  yönde olduğu ve elektromanyetik dalganın  $\mathbf{e}$  polarize vektörü  $\rho$  vektörüne paralel olduğu varsayılmaktadır. Böylece buna göre denklem (4)'daki dalga fonksiyonun  $|i\rangle = |n_\rho m n\rangle$  başlangıç ve  $|j\rangle = |n'_\rho m' n'\rangle$  son durumları için denklem (11)'deki elektrik dipol matris elemanın değeri hesaplanır ve silindirik kuantum noktanın alt enerji seviyeler arası optik geçişleri için soğurma katsayısı,

$$\alpha = \frac{\omega e^2}{cn_r\epsilon_0} \frac{2}{V} (Y T \Sigma \Phi)^2 \frac{G}{(E_T)^2 + G^2} \quad (12)$$

elde edilir. Bu denklemde

$$Y = \frac{1}{2\pi\sqrt{\pi}} \frac{1}{L} \left( \frac{n_\rho!}{\Gamma(n_\rho + m + 1)} \frac{n'_\rho!}{\Gamma(n'_\rho + m' + 1)} \frac{1}{2^{n'+n} n'! n!} \right)^{1/2} \quad (13)$$

$$\Phi = \int_0^{2\pi} e^{i(m'-m)\phi} e^{\pm i\phi} d\phi$$

$$\Sigma = L\sqrt{\pi}2^n n!$$

$$T = 2^{1/2}\lambda \frac{(1+m)_{n_\rho} \left(-\frac{m-m'+1}{2}\right)_{n_{\rho'}} \Gamma\left(1+\frac{m+m'+1}{2}\right)}{n_\rho! n_{\rho'}!} \\ \times F_{3,2} \left( -n_\rho, 1 + \frac{m+m'+1}{2}, 1 + \frac{m-m'+1}{2}, m+1, 1 + \frac{m-m'+1}{2} - n_{\rho'}, 1 \right)$$

parametreleri tanımlanmıştır. Ayrıca, çalışmamızda kuantum noktanın alt enerji seviyeler arası optik geçişleri

$$n' = n$$

$$|n_{\rho'} - n_\rho| = 0,1 \quad (14)$$

$$m' - m = \pm 1$$

belirlenen seçim kurallarına göre gerçekleştiği varsayılmaktadır.

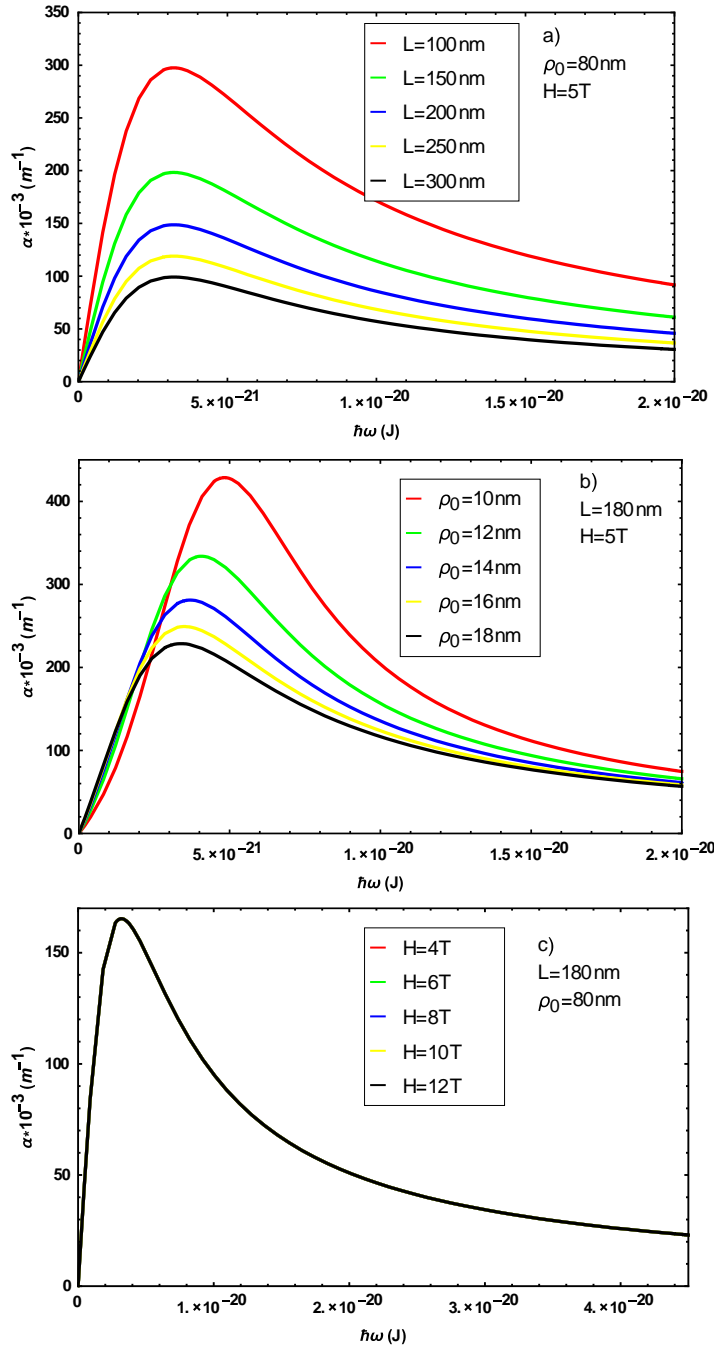
### 3. Bulgular

Makalemizin bu bölümünde denklem (12)'de elde ettiğimiz soğurma katsayısının silindirin boyut parametrelerinin ve manyetik alanın değişimine göre davranışı sayısal olarak araştırılmıştır. Hesaplama *GaAs* yarıiletken için  $\mu = 0.067\mu_0$ ,  $g_e = -0.5$ ,  $n_r = 1$  değerleri kullanılmıştır.

Şekil 1'den görülmek üzere gelen foton enerjisinin değerinin artmasıyla soğurma katsayısının değeri sıfır değerinden artarak maksimuma ulaşmaktadır ve sonra azalarak asimptotik olarak sıfıra doğru gitmektedir. Grafikteki oluşan maksimum,  $\hbar\omega \geq E_j - E_i$  olan bir foton elektronu bulunduğu enerji durumundan başka bir enerjini durumuna geçmesine karşılık.

Şekil 1 a)'da ve 1 b)'de soğurma katsayısının gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak yarıçap ve yükseklik gibi parametrelerin farklı değerlerine göre grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere yarıçap ve yükseklik parametrelerinin artmasıyla soğurma katsayısının maksimumu düşmektedir. Bu ise silindirin boyut parametrelerinin değişmesi sonucunda silindirik kuantum noktanın alt enerji seviyeler arası mesafenin değiştiği anlamına gelir. Yani, silindirin yarıçapı veya yüksekliği artarsa alt enerji seviyeler arası mesafe azalır ve elektronun bu iki enerji seviye arası geçişi için daha az enerji gerek olduğunu gösterir. Bundan başkada yarıçapın artmasıyla soğurma katsayısının maksimumu gelen foton enerjisine göre sola kaymaktadır. Benzer davranış [28] çalışmamızda da görülmektedir. Araştırdığımız çalışmada silindirik kuantum noktanın boyut parametrelerinin değişmesi soğurma katsayısını maksimumunu etkilediğini gösteren bir sonuç elde etmiştik.

Başka bir önemli sonuç, Şekil 1 c)'de manyetik alanın değişimi soğurma katsayısını etkilemediği görülmektedir. Bu ise manyetik alanın yarıiletken silindirik kuantum noktanın alt enerji seviyeler arası genişliğini değiştirmediğini gösterir.



**Şekil 1.** Soğurma katsayısının gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak  $n_\rho = n_{\rho'} = 0$ ,  $n = n' = 1$ ,  $m = 0$ ,  $m' = 1$ , kuantum sayıları için a) silindirin  $L$  yüksekliği b) silindirin  $\rho_0$  yarıçapı ve c) manyetik alan parametrelerine göre grafiği.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada yarıiletken silindirik kuantum noktanın optik özellikleri araştırılmıştır. Etkin kütle ve parabolik bant yaklaşımı kullanarak yarıiletken silindirik kuantum noktanın enerji spektrumu ve dalga fonksiyonu köşegenleştirme yöntemi ile hesaplanmıştır. Alt enerji seviyeler arası optik geçişler için silindirik kuantum noktanın soğurma katsayısı gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak silindirin yarıçapı ve yükseklik gibi parametrelerinin farklı değerlerine göre davranışı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gelen foton enerjisinin değerinin artmasıyla soğurma katsayısı sıfır

değerinden artarak bir maksimum değere ulaştığı görülmekte ve sonra azalarak asimptotik olarak sıfıra yaklaşmaktadır. Başka bir önemli sonuç, soğurma katsayısının maksimumu silindirin yarıçap ve yükseklik gibi parametrelerine bağlı olmasıdır. Bu parametrelerin artmasıyla soğurma katsayısının maksimumu düşmektedir. Ayrıca, silindirin yarıçap parametresinin artmasıyla soğurma katsayısının maksimumu gelen foton enerjisine göre sola kayma göstermektedir. Bundan başkade soğurma katsayısı manyetik alanın değişiminden bağımsız olduğu görülmektedir. Böylece, elde edilen sonuçlara göre yarıiletken silindirik kuantum noktanın optik özellikleri silindirin boyut parametrelerine bağlı olduğu ve etkiyen manyetik alandan bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı**

Arif BABANLI: Araştırma, İnceleme ve Düzenleme, Denetim.

Vepa SABYROV: Araştırma, Orijinal Taslak Yazımı.

### **Destek ve Teşekkür Beyanı**

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir destek ve teşekkür beyanımız bulunmadığını bildiririz.

### **Çatışma Beyanı**

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

### **Etik Kurul Onayı ve/veya Aydınlatılmış Onam Bilgileri**

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanımız bulunmadığını bildiririz.

### **Kaynakça**

- [1] J. H. Davies, *The Physics of Low-dimensional Semiconductors: An Introduction*. Cambridge University Press, 1998, pp 427.
- [2] B. Dieter, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, *Quantum Dot Heterostructures*. John Wiley and Sons, 1999, pp 325.
- [3] L. L. Chang and K. Ploog, *Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures*. Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp 677.
- [4] C. Lamberti, *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*. Elsevier B.V., 2008, pp 483.
- [5] N. G. Einspruch and W. R. Frensley, Eds., *Heterostructures and Quantum Devices*. Academic Press Inc., 1994 pp 446.
- [6] V. Mitin, V. Kochelap, and M. A. Stroschio, *Quantum Heterostructures: Microelectronics and Optoelectronics*. Cambridge University Press, 1999, pp 635.
- [7] E. Ivchenko and G. Pikus, *Superlattices and Other Heterostructures: Symmetry and Optical Phenomena*, Second. Springer-Verlag, 1997, pp 379.
- [8] R. F. Wallis and M. Balkanski, *Semiconductor Physics and Applications*. Oxford University Press, 2000, pp 512.
- [9] T. C. McGill, C. M. Sotomayor Torres, and W. Gebhardt, Eds., *Growth and Optical Properties of Wide-Gap II–VI Low-Dimensional Semiconductors*. Plenum Press, 1988, pp 344.
- [10] S. V. Gaponenko, *Optical Properties of Semiconductor Nanocrystals*. Cambridge University Press, 1998, pp 241.
- [11] D. C. Bensahel, L. T. Canham, and S. Ossicini, Eds., *Optical Properties of Low Dimensional Silicon Structures*. Springer, 1993, pp 235.
- [12] T. Ogawa and Y. Kanemitsu, *Optical Properties of Low-Dimensional Materials*. World Scientific, 1998, pp 468.
- [13] C. H. Liu and B. R. Xu, “Theoretical study of the optical absorption and refraction index change in a cylindrical quantum dot,” *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, 372 (6), 888–892, 2008.
- [14] F. Ugan, M. K. Bahar, S. Pal, and M. E. Mora-Ramos, “Electron-related nonlinear optical properties of cylindrical quantum dot with the Rosen-Morse axial potential,” *Commun. Theor. Phys.*, 72 (7), 2020.

- [15] G. Safarpour, A. Zamani, M. A. Izadi, and H. Ganjipour, "Laser radiation effect on the optical properties of a spherical quantum dot confined in a cylindrical nanowire," *J. Lumin.*, 147, 295–303, 2014.
- [16] G. Safarpour, M. A. Izadi, M. Novzari, E. Niknam, and M. Moradi, "Anisotropy effect on the nonlinear optical properties of a three-dimensional quantum dot confined at the center of a cylindrical nano-wire," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 59, 124–132, 2014.
- [17] E. Kasapoglu, C. A. Duque, M. E. Mora-Ramos, and I. Sökmen, "The effects of the intense laser field on the nonlinear optical properties of a cylindrical Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs quantum dot under applied electric field," *Phys. B Condens. Matter*, 74, 15–20, 2015.
- [18] R. Khordad, "Effect of magnetic field on linear and nonlinear optical properties in a parabolic cylindrical quantum dot," *J. Opt.*, 42 (2), 83–91, 2013.
- [19] F. Urgan, M. K. Bahar, M. G. Barseghyan, L. M. Pérez, and D. Laroze, "Effect of intense laser and electric fields on nonlinear optical properties of cylindrical quantum dot with Morse potential," *Optik (Stuttg.)*, 236 (September 2020), 2021.
- [20] R. E. Acosta, A. Zapata, C. A. Duque, and M. E. Mora-Ramos, "Electric field effects on excitons in cylindrical quantum dots with asymmetric axial potential. Influence on the nonlinear optical properties," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 44 (9), 1936–1944, 2012.
- [21] M. S. Atoyan, E. M. Kazaryan, and H. A. Sarkisyan, "Direct interband light absorption in a cylindrical quantum dot in quantizing magnetic field," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 22 (4), 860–866, 2004.
- [22] A. Efros, "Interband light absorption in semiconductor spheres," *Sov. physics. Semicond.*, 16 (7), 772–775, 1982.
- [23] S. Liang, W. Xie, and H. Shen, "Optical properties in a two-dimensional quantum ring: Confinement potential and Aharonov-Bohm effect," *Opt. Commun.*, 284, 24, 5818–5828, 2011.
- [24] O. Olendski and T. Barakat, "Magnetic field control of the intraband optical absorption in two-dimensional quantum rings," *J. Appl. Phys.*, 115, 8, 2014.
- [25] D. Bejan, C. Stan, and E. C. Niculescu, "Optical properties of an elliptic quantum ring: Eccentricity and electric field effects," *Opt. Mater. (Amst.)*, 78, 207–219, 2018.
- [26] A. Turkoglu, H. Dakhlaoui, M. E. Mora-Ramos, and F. Urgan, "Optical properties of a quantum well with Razavy confinement potential: Role of applied external fields," *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, 134 (June), p. 114919, 2021.
- [27] S. L. Chuang, *Physics of Photonic Devices*, Second. Wiley, 2009, pp 841.
- [28] A. Babanlı and V. Sabyrov, "Optical properties of cylindrical quantum dots with diluted magnetic semiconductors structure," *Low Temp. Phys.*, 48 (10), 934–940, Aug. 2022.