

Küresel Kuantum Noktasında Hidrostatik Basınç ve Dielektrik Sabitinin 2p Uyarılmış Durum Bağlanma Enerjisi ve Yabancı Atom Self-Polarizasyonuna Etkisi

Ali İhsan MEŞE^{1,*}

ÖZET: GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs küresel kuantum noktasında, hidrostatik basınca bağlı dielektrik sabitinin 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonuna etkisi nokta yarıçapı ve basıncın fonksiyonu olarak varyasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dielektrik sabitinin ve hidrostatik basıncın 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisini ve yabancı atom self-polarizasyonunu değiştirdiği görülmüştür. Yabancı atom self-polarizasyon ve bağlanma enerjisi nokta yarıçapına, hidrostatik basınca ve dielektrik sabitine bağlı değişimleri gösterilmiştir. Yabancı atom self-polarizasyonun küresel nokta yarıçapı ve hidrostatik basıncın artması ile azaldığı, bağlanma enerjisinin ise küresel nokta yarıçapının artması ile azaldığı hidrostatik basıncın artması ile arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalar ile uyumludur.

Anahtar Kelimeler: Yabancı atom self-polarizasyon, dielektrik sabiti, bağlanma enerjisi, hidrostatik basınç

Effect of Hydrostatic Pressure and Dielectric Constant on 2p Excited State Binding Energy and Impurity Self-Polarization in Spherical Quantum Dot

ABSTRACT: In GaAs / Ga_{1-x}Al_xAs spherical quantum dot, the effect of the dielectric constant, which is a function of hydrostatic pressure, on 2p excited state binding energy and impurity self-polarization, was calculated using the variation method as a function of the dot radius and pressure. According to the results obtained, the dielectric constant and hydrostatic pressure have been shown to change the 2p excited state binding energy and impurity self-polarization. The variations of impurity self-polarization and binding energy depending on dot radius, hydrostatic pressure and dielectric constant are shown. It has been observed that impurity self-polarization decreases with increasing spherical dot radius and hydrostatic pressure, and binding energy increases with increasing hydrostatic pressure, which decreases with increasing spherical dot radius. The obtained results are in compatible with the previous studies.

Keywords: Impurity self-polarization, dielectric constant, binding energy, hydrostatic pressure

¹Ali İhsan MEŞE(Orcid ID: 0000-0002-3901-590X), Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Edirne, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ali İhsan MEŞE, e-mail: aliihsanmese@trakya.edu.tr

GİRİŞ

Düşük boyutlu yarıiletken hetero-yapılardaki yabancı atom durumları, teorik ve deneysel çalışmalarda kapsamlı araştırma konusu olmuştur (Montenegro ve Merchancano, 1992; Bastard, 1981; Greene ve Bajaj, 1985; Brown ve Spector, 1986; Mese ve Okan, 2004; Baskoutas ve Terzis, 2009). Son yıllarda kuantum noktalarında yabancı atom ile ilgili optik ve elektronik özellikler yoğun olarak araştırılmaktadır (Fraizzoli ve ark., 1990; Chuu, 1992; Sadeghi, 2009; Özmen ve ark. 2009; Rezaei, 2012; Sivakami ve Gayathri, 2013). Yabancı atom varlığında kuantum noktasının fiziksel özelliklerini anlamak önemlidir. Kuantum noktalarında varyasyon yöntemi kullanılarak etkin kütle yaklaşıklığı altında kuantum noktasının merkezinde veya merkez dışında yabancı atom varlığında taban ve uyarılmış durum bağlanma enerjisi, elektrik alan self-polarizasyon ve yabancı atom self-polarizasyonu farklı sınırlandırıcı potansiyelleri, kuantum noktasının farklı şekilleri, basınç, sıcaklık, manyetik ve elektrik alan etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Ghazi ve ark., 2013; Akankan ve ark., 2006; Erdogan ve ark., 2006; Erdogan ve ark., 2013; Tangarife ve Duque, 2011; Mese ve ark., 2017; Esuanu ve ark., 2009; Kang ve ark., 2013; Wang ve ark., 2014; Sucu ve ark., 2008; Bulut ve ark., 2014; Okan ve ark., 2004; Ulas ve ark., 2004; Al ve ark., 2020; Johrami ve Dezhkam, 2020; Mikhail ve Ismail, 2010; Sadeghi ve Rezaie, 2010; Wang ve ark., 2014; Zhu ve ark., 1990).

Bununla birlikte kuantum noktalarında bu etkiler altında yapılan bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyon hesaplamalarında genellikle dielektrik sabitinin etkisi ihmal edilmiştir. Ancak dielektrik sabitinin etkisini ihmal etmek yapının boyutsal özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır (Mese ve ark., 2017; Csavinszky ve Oyoka, 1991; Aghasyan ve Kirakosyan, 2000). 2p uyarılmış durumda (Mese ve ark., 2017) tarafından bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonuna dielektrik sabitinin etkisi araştırılmış ancak dielektrik sabitinin hidrostatik basınca bağlılığı incelenmemiştir.

Bu çalışmada, GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs küresel kuantum noktasında hidrostatik basınca bağlı dielektrik sabitinin 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonuna etkisi nokta yarıçapı ve basıncın fonksiyonu olarak yabancı atomun sabit $r_i = R/2$ konumu için varyasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Küresel kuantum noktasında, hidrostatik basınç ve $\vec{r}_i = (0,0,z_i)$ doğrultusunda yabancı atom varlığında etkin kütle yaklaşıklığı kullanılarak Hamiltonyen şöyle tanımlanır (Bulut ve ark., 2014).

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*(P)} \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon(P) \sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos \theta}} + V(r, P) \quad (1)$$

Bu denklemde r_i yabancı atomun konumu, e serbest elektron yüküdür. $m^*(P)$, $\epsilon(P)$ ve $V(r, P)$ ise sırasıyla hidrostatik basınca bağlı etkin kütle, dielektrik sabiti ve sınırlandırıcı nokta potansiyelini ifade etmektedir. Hidrostatik basıncın fonksiyonu olarak $m^*(P)$ ve $\epsilon(P)$ şöyle tanımlanmaktadır (Bulut ve ark., 2014; Erdogan ve ark., 2013).

$$m^*(P) = m(0)\exp(0.078P) \quad (2)$$

ve

$$\varepsilon(P) = 12.5 - 0.088P \quad (3)$$

Burada P, kbar biriminde hidrostatik basınç ve m_0 serbest elektron kütlesidir.

Eşitlik 1. deki $V(r, P)$ sınırlandırıcı nokta potansiyeli

$$V(r, P) = \begin{cases} V_0(x, P) , & r \geq R(P) \\ 0 & , r < R(P) \end{cases} , \quad (4)$$

olarak tanımlanır. Burada $V_0(x, P) = (0.658)[1.155x + 0.37x^2 + (-1.3 \times 10^{-3} x)P]$ ile ifade edilen hidrostatik basınca ve alüminyum konsantrasyonuna bağlı sınırlandırıcı nokta potansiyelin bariyer yüksekliğidir.

Nokta yarıçapı hidrostatik basınca bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$R(P) = R_0 [1 - 1.5082 \times 10^{-3} P] , \quad (5)$$

Burada R_0 hidrostatik basınç yokluğundaki nokta yarıçapıdır (Bulut ve ark., 2014; Erdogan ve ark., 2013).

Yabancı atom yokluğunda 2p uyarılmış durum ($n = 2, l = 1, m = 0$) deneme dalga fonksiyonu,

$$\psi_{2p}^0(\vec{r}, V_0, R) = \begin{cases} N_{2pi}^0 \left(\frac{\sin(k_{2pi}r)}{(k_{2pi}r)^2} - \frac{\cos(k_{2pi}r)}{(k_{2pi}r)} \right) \cos \theta & , r \leq R \\ N_{2po}^0 \left(\frac{1}{k_{2po}r} + \frac{1}{(k_{2po}r)^2} \right) \cos \theta & , r \geq R \end{cases} \quad (6)$$

olarak tanımlanır (Jeice ve ark., 2015; Sadeghi 2009; Bulut ve ark., 2014). Burada

$$k_{2pi} = \sqrt{2m^*(P)E_{2p}^0(P)/\hbar^2} \quad (7)$$

ve

$$k_{2po} = \sqrt{2m^*(P)(V_0(P) - E_{2p}^0(P))/\hbar^2} \quad (8)$$

$r = R$ sınırında dalga fonksiyonlarını ve onların türevlerini eşitleyerek aşağıdaki transandantal denklem elde edilir.

$$\frac{\cot(k_{2pi}R)}{k_{2pi}R} - \frac{1}{(k_{2pi}R)^2} = \frac{1}{k_{2p0}R} + \frac{1}{(k_{2p0}R)^2} . \quad (9)$$

Transandantal denklem çözülerek yabancı atom yokluğunda 2p subband enerjisi $E_{2p}^0(P)$ belirlenir.

Yabancı atom varlığında 2p uyarılmış durumu ($n = 2, l = 1, m = 0$) için deneme dalga fonksiyonu (Bella ve Navaneethakrishnan, 2004; Villamil ve Montenegro, 1999; Sadeghi 2009; Mese ve ark., 2017),

$$\psi_{2p}(\vec{r}, V_o, R, r_i) = \begin{cases} N_{2pi} \left(\frac{\sin(k_{2pi}r)}{r} \right) r \cos \theta \exp \left(-\lambda_p \sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos \theta} \right), r \leq R \\ N_{2p0} \left(\exp(-k_{2p0})/r \right) r \cos \theta \exp \left(-\lambda_p \sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i \cos \theta} \right), r \geq R \end{cases} \quad (10)$$

olarak tanımlanır. Burada λ_p varyasyon parametresidir. 2p durumu yabancı atom enerjisi $E_{i2p}(V_o, R, r_i, P, T)$ aşağıdaki denklemin varyasyon yöntemi kullanılarak çözümünden elde edilir (Sadeghi, 2009).

$$E_{i2p}(V_o, P, R, r_i) = \min_{\lambda_p} \left[\frac{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | H | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle}{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle} \right] \quad (11)$$

2p durumu bağlanma enerjisi ise şöyle tanımlanır (Mese ve ark., 2017; Bulut ve ark., 2014),

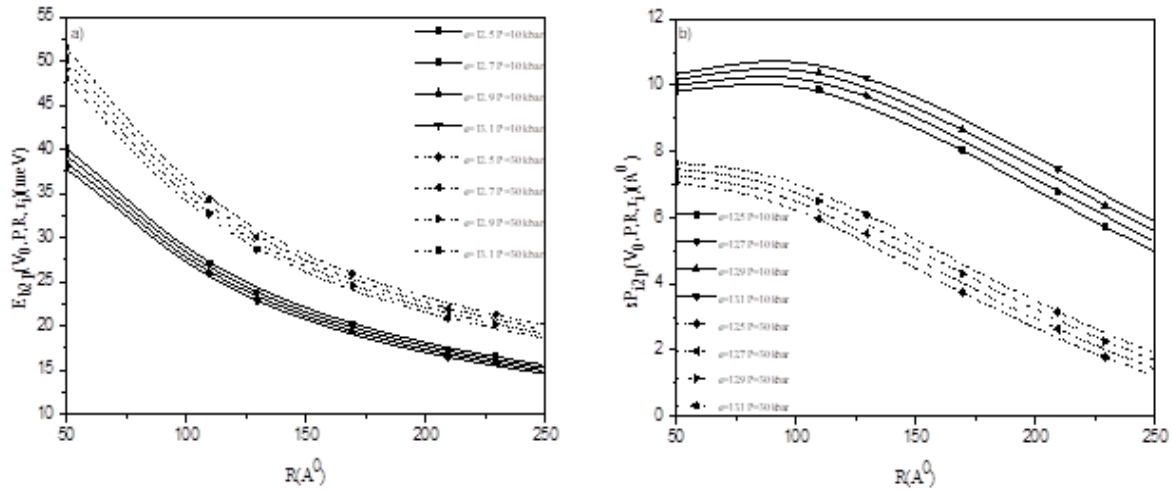
$$E_{b2p}(V_o, P, R, r_i) = E_{2p}^0(P) - E_{i2p}(V_o, P, R, r_i) . \quad (12)$$

Yabancı atom self-polarizasyonu yabancı atomun konumu ve nokta yarıçapına bağlı fiziksel bir niceliktir. Yabancı atom dalga fonksiyonu bulunduktan sonra \vec{r}_i doğrultusundaki 2p uyarılmış durum yabancı atom self-polarizasyonuna hidrostatik basınç ve dielektrik sabitinin hidrostatik basınca bağlı etkileri aşağıdaki denklem ile bulunur (Okan, 2004; Erdogan ve ark., 2006; Akankan ve ark., 2006) .

$$sP_{i2p}(V_o, P, R, r_i) = \frac{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | -e(r \cos \theta - r_i) | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle}{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle}_{r_i \neq 0} - \frac{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | -e(r \cos \theta - r_i) | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle}{\langle \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) | \psi_{2p}(\vec{r}, r_i, R) \rangle}_{r_i = 0} . \quad (13)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs küresel kuantum noktasında hidrostatik basınca bağlı dielektrik sabitinin 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonuna etkisi nokta yarıçapı ve hidrostatik basıncın fonksiyonu olarak alüminyum konsantrasyonu x=0.3 değeri ve yabancı atomun sabit ri=R/2 konumu için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 1-3 ile gösterilmiştir.

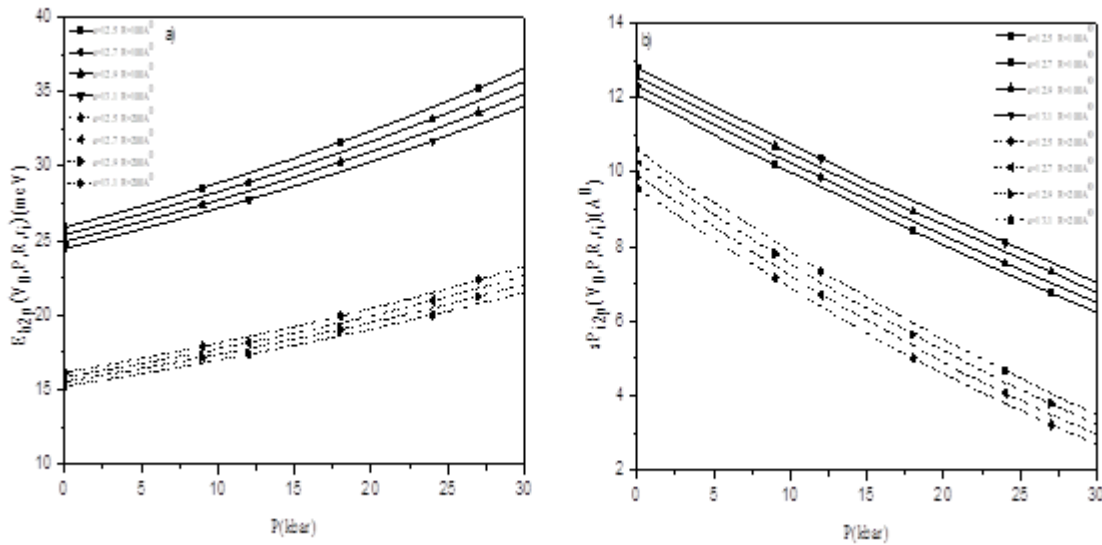


Şekil 1. a) Bağlanma enerjisinin b) yabancı atom self-polarizasyonunun nokta yarıçapına göre değişimi

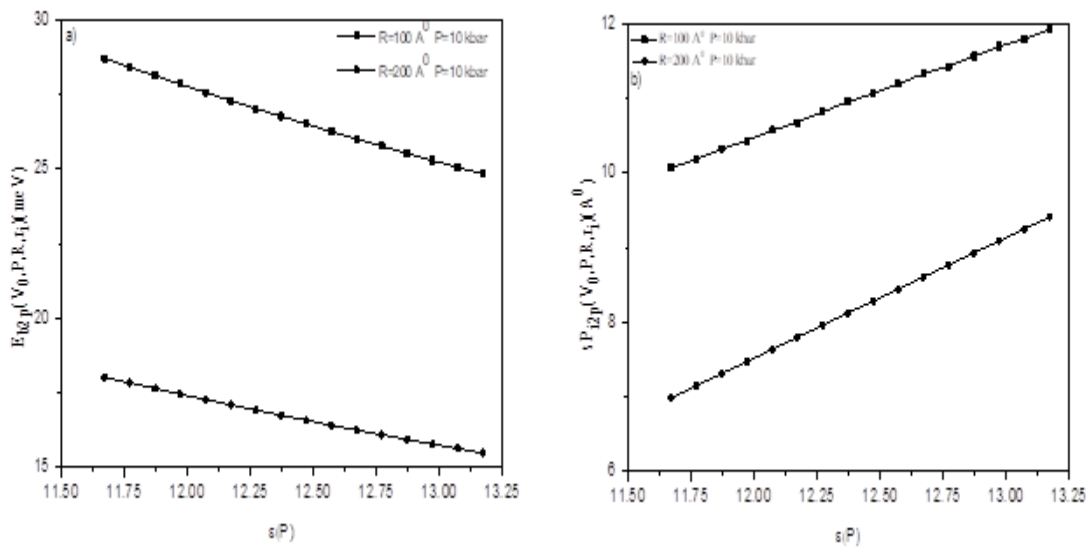
Şekil 1. a) ve b).’de, 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonu nokta yarıçapının fonksiyonu olarak farklı dielektrik sabiti ve hidrostatik basınç değerlerinde hesaplanmıştır. Şekil 1 a).’da, 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi nokta yarıçapı ve dielektrik sabiti arttığında azaldığı buna karşılık hidrostatik basınç arttığında ise arttığı görülmüştür. Nokta yarıçapı arttığında serbest elektron daha geniş alanda hareket imkanı bulacağından yabancı atom ile bağlanma enerjisi azalmaktadır. Bu çalışmada dielektrik sabitinin literatürde GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yapı için en çok kullanılan (12.5 ile 13.1) arası değerleri ele alınmıştır. Hidrostatik basınç arttığında nokta yarıçapı ve dielektrik sabiti azaldığı için (eşitlik 3 ve 5) bağlanma enerjisinin önemli oranda arttığı görülmüştür. Nokta yarıçapı $R=200$ Å değerinden sonra bağlanma enerjisindeki değişimin azaldığı ve sabit bir değere doğru yaklaştığı görülmektedir. Şekil 1 b).’de 2p uyarılmış durum yabancı atom self-polarizasyonunun nokta yarıçapı ve hidrostatik basınç arttığında azaldığı, dielektrik sabitinin arttığında ise arttığı görülmüştür. Nokta yarıçapı $R=100$ Å değerinden daha küçük olduğunda yabancı atom self-polarizasyonunun fazla değişmediği bunun nedeni ise serbest elektronun sınırlandırıcı nokta potansiyelini daha çok hissetmesidir. Elde edilen bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyon değerlerinin (Sivakami ve Gayathri, 2013; Mikhail ve Ismail, 2010; Mese ve ark., 2017) çalışmaları ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonu hidrostatik basıncın fonksiyonu olarak farklı dielektrik sabiti ve nokta yarıçapı değerleri için değişimi Şekil 2. a) ve b).’de gösterilmiştir. Şekil 2 a).’da, hidrostatik basınç değeri arttığında bağlanma enerjisinin arttığı, dielektrik sabiti ve nokta yarıçapı arttığında ise azaldığı görülmüştür. Ayrıca, hidrostatik basınç arttığında nokta yarıçapı, dielektrik sabiti ve sınırlandırıcı nokta potansiyeli değiştiği için elektron dalga fonksiyonunun daha fazla kuantum noktası içinde hapsoldüğü ve bunun sonucunda bağlanma enerjisinin arttığı

görülmüştür. Buna ilaveten, nokta yarıçapı ($R=200 \text{ \AA}^0$) için dielektrik sabitinin farklı değerlerinde hidrostatik basıncın değişimi bağlanma enerjisinin üzerinde daha az etki etmektedir. Elde edilen bağlanma enerjisi değerlerinin (Jahrami ve Dezhkam, 2020) çalışması ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Şekil 2 b).’de yabancı atom self-polarizasyonun hidrostatik basınca bağlı değişimi gösterilmiştir. Hidrostatik basınç ve nokta yarıçapı arttığında yabancı atom self-polarizasyonun azaldığı, dielektrik sabiti arttığında ise arttığı görülmüştür. Hidrostatik basıncın artması elektronun hapsediciliğini artırır. Bunun sonucunda elektron dalga fonksiyonunun kuantum noktası içerisinde bulunma olasılığı artar ve yabancı atom self-polarizasyonu azalır (Rezaei ve ark., 2012).



Şekil 2. a) Bağlanma enerjisinin b) yabancı atom self-polarizasyonunun hidrostatik basınca bağlı değişimi



Şekil 3. a) Bağlanma enerjisinin b) yabancı atom self-polarizasyonunun dielektrik sabitine göre değişimi

Şekil 3. a) ve b).’de, 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonu dielektrik sabitinin fonksiyonu olarak farklı nokta yarıçapı ($R=100 \text{ \AA}$ ve $R=200 \text{ \AA}$) ve hidrostatik basıncın $P=10 \text{ kbar}$ değeri için hesaplanmıştır. Şekil 3 a).’da 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisinin dielektrik sabiti ve nokta yarıçapının artması ile azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni, dielektrik katsayısının artması ile elektron dalga fonksiyonunun daha fazla kuantum noktanın içinde lokalize olmasıdır. Şekil 3 a) sabit yabancı atom konumu ve sabit nokta yarıçapı değerleri için bağlanma enerjisinin hesaplanması kuantum noktasını oluşturan yapının uygun dielektrik sabitinin bulunmasını sağlayacaktır. Şekil 3 b).’de yabancı atom self-polarizasyonun dielektrik sabitine bağlı değişimi sabit hidrostatik basınç $P=10 \text{ kbar}$ ve nokta yarıçapı ($R=100 \text{ \AA}$ ve $R=200 \text{ \AA}$) değerleri için gösterilmiştir. Dielektrik sabiti arttığında yabancı atom self-polarizasyonun da arttığı görülmüştür. Dielektrik sabiti yabancı atom self-polarizasyon üzerinde büyük nokta yarıçaplarında daha etkindir. Elde edilen sonuçların birbirini desteklediği ve literatürdeki çalışmalar ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

SONUÇ

Hidrostatik basınç ve hidrostatik basınca bağlı dielektrik sabitinin 2p uyarılmış durum bağlanma enerjisi ve yabancı atom self-polarizasyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yabancı atom self-polarizasyonun küresel nokta yarıçapı ve hidrostatik basıncın artması ile azalır. Buna ilaveten, bağlanma enerjisinin ise küresel nokta yarıçapının artması ile azaldığı hidrostatik basıncın artması ile de arttığı görülmüştür. Bu çalışma GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs küresel kuantum noktalarında yapılacak deneysel çalışmalara da katkı sağlayacaktır. 2p uyarılmış durumda hidrostatik basınca bağlı dielektrik sabitinin yabancı atom self-polarizasyonuna etkisi ilk kez bu çalışma ile hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aghasyan MM, Kirakosyan AA, 2000. Binding energy of impurity in a size-quantized coated semiconductor wire: role of the dielectric-constant mismatch. *Physica E* (8): 281.
- Akankan O, Erdogan I, Akbas H, 2006. Spatial electric field effect on the self-polarization in GaAs/AlAs square quantum-well wires. *Physica E*, 35 (1): 217-221.
- Al EB, Kasapoglu E, Sakiroglu S, Sari H, Sökmen I, Duque CA, 2020. Binding energies and optical absorption of donor impurities in spherical quantum dot under applied magnetic field. *Physica E* 119: 114011.
- Baskoutas S, Terzis AF, 2009. Binding energy of hydrogenic impurity states in an inverse parabolic quantum well under static external fields. *The European Physical Journal B*, 69: 237-244.
- Bastard G, 1981. Hydrogenic impurity states in a quantum well: A simple model. *Physical Review B*, 24(8): 4714-4722.
- Bella RSD, Navaneethakrishnan K, 2004. Donor binding energies and spin-orbit coupling in a spherical quantum dot. *Solid State Communications*, 130 (11): 773-776.
- Brown JW, Spector HN, 1986. Hydrogen impurities in quantum well wires. *Journal of Applied Physics*, 59 (4): 1179-1186.
- Bulut P, Erdogan I, Akbas H, 2014. Binding energy of 2p-bound state of a hydrogenic donor impurity in a GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs spherical quantum dot under hydrostatic pressure. *Physica E*, 63: 299-303.
- Chuu DS, Hsiao CM, Mei WN, 1992. Hydrogenic impurity states in quantum dots and quantum wires. *Physical Review B*, 46 (7): 3898-3905.
- Csavinszky P, Oyoko H, 1991. Binding energy of on-axis hydrogenic and nonhydrogenic donors in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum-well wire of circular cross section. *Physical Review B*, 43 (11): 9262

- Erdogan I, Akankan O, Akbas H, 2006. Electric and magnetic field effects on the self-polarization in GaAs/AlAs cylindrical quantum well-wires. *Physica E*, 33 (1): 83–87.
- Erdogan I, Akankan O, Akbas H, 2006. Binding energy and self-polarization as function of energy density in GaAs/AlAs quantum well wires. *Physica E*, 35 (1): 27-32.
- Erdogan I, Akankan O, Akbas H, 2013. Simultaneous effects of temperature, hydrostatic pressure and electric field on the self-polarization and electric field polarization in a GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As spherical quantum dot with a donor impurity. *Superlattices and Microstructures*, 59: 13-20.
- Fraizzoli S, Bassani F, Buczko R, 1990. Shallow donor impurities in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs quantum-well structures: Role of the dielectric-constant mismatch. *Physical Review B*, 41 (8): 5096-5103.
- Ghazi HE, Jorio A, Zorkani I, 2013. Impurity binding energy of lowest-excited state in (In,Ga)N–GaN spherical QD under electric field effect. *Physica B*, 426: 155-157.
- Greene RL, Bajaj KK, 1985. Binding energy of the 2p₀-like level of a hydrogenic donor in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs quantum-well structures. *Physical Review B*, 31 (6): 4006-4008.
- Jahrami ZG, Dezhkam M, 2020. Temperature and hydrostatic pressure effects on the electronic structure, optical properties of spherical segment quantum dot/wetting layer and group velocity of light *Laser Physics* 30; 055402
- Jeice AR, Jayam G, Wilson KSJ, 2015. Effect of hydrostatic pressure and polaronic mass of the binding energy in a spherical quantum dot Chinese. *Physics B* 24(11): 110303.
- Johnson NF, 1995. Quantum dots: few-body, low-dimensional systems. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7 (1): 965-989.
- Mese AI, Okan SE, 2004. Binding energy of relativistic hydrogenic impurities in cylindrical quantum well wires under an applied electric field. *Physica Status Solidi B*, 241 (15): 3525-3531.
- Mese AI, Cicek E, Erdogan I, Akankan O, Akbas H, 2017. The effect of dielectric constant on binding energy and impurity self-polarization in a GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs spherical quantum dot. *Indian Journal of Physics*, 91(3): 263-268.
- Mikhail IFI, Ismail IMM, 2010. Hydrogenic impurity in a quantum dot: Comparison between the variational and strong perturbation methods. *Superlattices and Microstructures*, 48: 388-400
- Montenegro NP, Merchancano STP, 1992. Hydrogenic impurities in GaAs-(Ga,Al)As quantum dots. *Physical Review B*, 46(15): 9780-9783.
- Okan SE, Erdogan I, Akbas H, 2004. Anomalous polarization in an electric field and self-polarization in GaAs/AlAs quantum wells and quantum well wires. *Physica E*, 21 (1): 91-95.
- Özmen A, Yakar Y, Çakır B, Atav Ü, 2009. Computation of the oscillator strength and absorption coefficients for the intersubband transitions of the spherical quantum dot. *Optics Communications*, 282 (19): 3999-4004.
- Rezaei G, Mousavi S, Sadeghi E, 2012. External electric field and hydrostatic pressure effects on the binding energy and self-polarization of an off-center hydrogenic impurity confined in a GaAs/AlGaAs square quantum well wire. *Physica B*, 407 (13): 2637-2641.
- Sivakami A, Gayathri V, 2013. Hydrostatic pressure and temperature dependence of dielectric mismatch effect on the impurity binding energy in a spherical quantum dot. *Superlattices and Microstructures*, 58: 218-227.
- Sadeghi E, 2009. Impurity binding energy of excited states in spherical quantum dot. *Physica E*, 41 (7): 1319-1322
- Sadeghi E, Rezaie GH, 2010. Effect of magnetic field on the impurity binding energy of the excited states in spherical quantum dot. *Pramana-Journal of Physics*, 75: 749-755.

- Sucu S, Mese AI, Okan SE, 2008. The role of confinement and shape on the binding energy of an electron in a quantum dot. *Physica E*, 40 (8): 2698-2702.
- Tangarife E, Duque CA, 2011. Simultaneous effects of hydrostatic pressure and electric field on impurity binding energy and polarizability in coupled InAs/GaAs quantum wires. *Physica B*, 406 (4): 952-956.
- Ulas M, Cicek E, Dalgic SS, 2004. Electric field effect on the binding energy of a non-hydrogenic donor impurity in a cylindrical cross-sectional quantum well wire. *Physica Status Solidi B*, 241 (13): 2968-2974.
- Villamil PV, Montenegro NP, 1999. Excited-States and Infrared Transition Energies of a Donor Impurity in a Disc-Shaped GaAs Quantum Dot under the Action of an Applied Magnetic Field. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 11: 9723-9730.
- Wang S, Kang Y, LiLi X, 2014. Binding energy of the ground and first few excited states of hydrogenic donor impurity in a rectangular GaAs quantum dot in the presence of electric field. *Superlattices and Microstructures*, 76: 221-233.
- Zhu JL, Xiong JJ, Gu BL, 1990. Confined electron and hydrogenic donor states in a spherical quantum dot of GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs. *Physical Review B*, 41 (9): 6001-6007.