

Atf İçin: Bilekkaya A, 2021. Eş-eksenli Al, As ve Ga Alaşım Katmanlarından Oluşan Silindirik Kuantum Tellerinde Eksiton Bağlanma Enerjilerinin Dış Elektrik Alanlar Altında İncelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(4): 2782-2789.

To Cite: Bilekkaya A, 2021. An Investigation of Exciton Binding Energies in Cylindrical Quantum Wires Consist of Various Coaxial Al, As and Ga Alloys under External Electric Fields. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(4): 2782-2789.

Eş-eksenli Al, As ve Ga Alaşım Katmanlarından Oluşan Silindirik Kuantum Tellerinde Eksiton Bağlanma Enerjilerinin Dış Elektrik Alanlar Altında İncelenmesi

Abdullah BİLEKKAYA

ÖZET: İçten dışa eş-eksenli silindirik $AlAs/GaAs/Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As/GaAs/Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ katmanlarından oluşan bir kuantum telindeki ağır-deşik ve hafif-deşik eksitonlarının bağlanma enerjileri dış elektrik alan etkisi altında elde edilmiştir. Hesaplamalar sayısal olarak 4. Derece Runge-Kutta ve varyasyonel yaklaşım yöntemlerinin birleşimi kullanılarak yapılmıştır. Eksiton bağlanma enerjileri yapıdaki $GaAs$ tel kalınlıklarına ve uygulanan dış elektrik alan şiddetine bağlı olarak bulunmuştur. Sonuçlar eksiton bağlanma enerjilerinin belli yapısal parametre değerlerinde teknolojiye kullanışlı olabileceği düşünülen keskin değişimler gösterdiği ve elektrik alanın da bağlanma enerjileri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eksiton, kuantum teli, elektrik alan

An Investigation of Exciton Binding Energies in Cylindrical Quantum Wires Consist of Various Coaxial Al, As and Ga Alloys under External Electric Fields

ABSTRACT: The binding energies of the heavy-hole and light-hole excitons in a cylindrical quantum wires composed of coaxial $AlAs/GaAs/Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As/GaAs/Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ layers from inside to outside are calculated under the external electric fields. The numerical calculations were carried out by combining 4th order Runge-Kutta method and variational approaches. The exciton binding energies were found as functions of inner $GaAs$ wire thicknesses and the external electric field strengths. The results show that, the exciton binding energies exhibit sharp changes at the certain values of structural parameters and the electric field has significant effects on the binding energies. These properties are thought to be useful technological applications.

Keywords: Exciton, quantum wire, electric field

¹Abdullah BİLEKKAYA ([Orcid ID: 0000-0003-4153-8686](https://orcid.org/0000-0003-4153-8686)), Trakya Üniversitesi, Edirne Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Edirne, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Abdullah BİLEKKAYA, e-mail: abdullahbilekkaya@trakya.edu.tr

GİRİŞ

Bir eksiton, iletim bandındaki bir elektron ile valans bandındaki bir deşğin bağılı durumdur. Düşük boyutlu yarıiletken sistemlerdeki eksitonların fiziksel özellikleri elektronik ve optoelektronik cihazlarda yüksek kullanım potansiyeline sahip olmasından dolayı son yıllarda geniş bir biçimde araştırılmaktadır (Zhai ve ark., 2011; Lopes ve ark., 2013; Harris ve ark., 2015; Rojas ve ark., 2017). Yarıiletken kuantum noktalarındaki bir eksitonun temel optik kontrol özellikleri Kolodka ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır (Kolodka ve ark., 2020). Ayrıca *InAs/AlGaAs* kuantum noktalarındaki eksiton kuantum durumlarının spektrumu Galimov ve arkadaşları tarafından deneysel olarak incelenmiştir (Galimov ve ark., 2019). Chafaia ve arkadaşları bir *GaN/AlN* kuantum noktasında boyutsal sınırlamaların ve uygulanan dış elektrik alanın eksiton bağlanma enerjileri üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve bu etkilerin tek ve ilişkili parçacıkları modüle etmek için iyi bir yol oluşturduğunu göstermişlerdir (Chafaia ve ark., 2019). Aktürk ve arkadaşları çok kabuklu bir kuantum nanokristalindeki eksiton, bieksiton ve yüklü eksitonların elektronik ve optik özelliklerinin ayrıntılı bir araştırmasını sunmuşlardır (Aktürk ve ark., 2014).

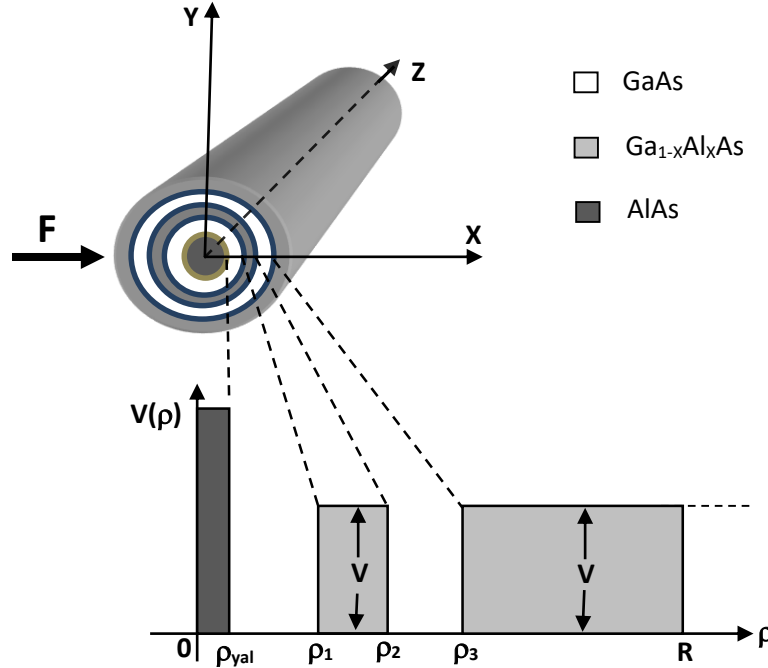
Uygulanan dış elektrik ve manyetik alanlar ile boyutsal sınırlandırmalar eksitonların fiziksel özellikleri üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Yapılan çalışmalarda elektrik alanın eksiton bağlanma enerjisi üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir (Wu, 2011; Saravanan ve ark., 2015). Kuantum tellerindeki eksitonların bağlanma enerjileri ve bantlar arası optik soğurma Kasapoğlu ve arkadaşları tarafından incelenmiş, eksiton bağlanma enerjisinin telin boyutlarına ve uygulanan elektrik alana bağılı olarak deştiği gösterilmiştir (Kasapoğlu ve ark., 2003). Wang ve arkadaşları *InGaAsP/InP* silindirik kuantum tellerinde eksiton durumlarını inceledikleri bir çalışmada tel yarıçapının, malzeme bileşiminin ve uygulanan elektrik alanın eksiton bağlanma enerjisi üzerinde çok etkili olduğunu göstermişlerdir (Wang ve ark., 2016).

Çok katmanlı kuantum teli ve kuantum noktalarındaki yabancı atom bağlanma enerjileri üzerindeki geometrik etkiler, elektrik ve manyetik alan etkileri daha önce bir kaç çalışmada ele alınmıştır (Boz ve ark., 2005, 2009, 2010, Aktaş ve ark., 2005, 2008, 2009, Karki ve ark., 2007, Kes ve ark., 2017). Yakın zamanda ise Kes ve arkadaşları çok katmanlı kuantum telinde eksitonları ve manyetik alan etkilerini araştırmışlar, manyetik alanın eksitonların elektronik özelliklerini belirgin biçimde etkilediğini göstermişlerdir (Kes ve ark., 2020).

Bu çalışmada silindirik *AlAs* malzemesi *GaAs* ve *AlGaAs* malzemeleriyle sırasıyla tabakalar halinde sarılmıştır. Eş-eksenli *Al*, *As* ve *Ga* alaşım katmanlarından oluşan silindirik kuantum telinde eksiton bağlanma enerjileri farklı yapısal parametre değerlerinde ve farklı elektrik alan şiddetleri altında incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Göz önüne alınan eş eksenli düşük boyutlu yapı şematik olarak Şekil 1' de gösterilmektedir. Bu yapı; yalıtkan bir *AlAs* silindirinin sırasıyla, *GaAs*, $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$, *GaAs*, $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ tabakaları ile çevrenmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapıdaki *GaAs* tabakaları kuantum kuyu telleri olarak görev yaparken, $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ ve $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ tabakaları sonlu potansiyel bariyerlerini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Eş-eksenli Al, As ve Ga alaşım katmanlarından oluşan silindirik kuantum telinin şematik gösterimi ve potansiyel profili

Etkin kütle yaklaşımı içinde, çok katmanlı kuantum telinde bir ağır-deşik (İng.: heavy-hole) eksitonun x yönünde uygulanan F elektrik alanı altındaki Hamiltonyeni silindirik koordinatlarda

$$H = \frac{p_e^2}{2m_e^*(\rho_e)} + V_e(\rho_e) + \eta \rho_e \cos \varphi + \frac{p^2}{2m_{hh}(\rho_{hh})} + V_{hh}(\rho_{hh}) - \eta \rho_{hh} \cos \varphi - \frac{e^2}{\epsilon |\vec{r}_e - \vec{r}_{hh}|}, \quad (1)$$

olarak verilir. Bu denklemde e alt indisi iletkenlik bandı elektronlarını ve hh alt indisi ise uluslararası bilimsel notasyona uygun biçimde ağır-deşiği göstermektedir. \vec{P}_e ve \vec{P}_{hh} momentum operatörler, ϵ , statik dielektrik sabitidir ve $\eta = |e| \cdot F$ olarak verilir.

Yukarıdaki denklemde $|\vec{r}_e - \vec{r}_{hh}|$ elektron-deşik çifti arasındaki uzaklığı tanımlayan parametredir ve $\sqrt{\rho_e^2 + \rho_{hh}^2 - 2\rho_e\rho_{hh} \cos(\varphi_e - \varphi_{hh}) + (z_e - z_{hh})^2}$ ile ifade edilir.

Hafif-deşik (İng.: light-hole) eksitonları için hesaplamalar Denklem 1 ve aşağıda izleyen tüm denklemlerde hh alt indisi yine uluslararası bilimsel notasyonda hafif-deşikleri temsil edecek biçimde lh alt indisi ile değiştirilerek hafif-deşik eksitonlarını incelemek için gerçekleştirilmiştir.

Denklem 1'deki Hamiltonyen aşağıdaki gibi elektron ve ağır-deşik için taban durumlarında ayrı ayrı

$$\left[\frac{p_e^2}{2m_e(\rho_e)} + V_e(\rho_e) + \eta \rho_e \cos \varphi \right] \psi_{0e}(\rho_e) = E_{0e} \psi_{0e}(\rho_e) \quad (2a)$$

$$\left[\frac{p_{hh}^2}{2m_{hh}(\rho_{hh})} + V_{hh}(\rho_{hh}) - \eta \rho_{hh} \cos \varphi \right] \psi_{0h}(\rho_{hh}) = E_{0h} \psi_{0h}(\rho_{hh}) \quad (2b)$$

olarak ifade edilir. Elektrik alan yokken $\eta=0$ Denklem 2a yardımıyla elektron taban durum dalga fonksiyonu $\psi_{0e}(\rho_e)$ taban durum enerjisi E_{0e} nümerik olarak 4. Derece Runge-Kutta metodu kullanılarak hesaplanır (Kes ve ark., 2017). Aynı hesaplamalar Denklem 2b üzerinden ağır-deşik için $\psi_{0h}(\rho_{hh})$ taban durum dalga fonksiyonunu ve E_{0h} taban durum enerjilerini bulmak için tekrarlanır.

Tel eksenine dik olarak pozitif x -ekseni boyunca uygulanan elektrik alan altında elektronun değişen enerjisiyle Denklem 2a Hamiltonyeni üzerinden

$$\psi_e^F(\rho, \varphi) = N_F \psi_{0e}(\rho_e) e^{-\rho_e \cos \varphi / a_e} \quad (3a)$$

elektrik alan etkisini içeren deneme dalga fonksiyonunu kullanarak, ancak bu defa varyasyon yöntemiyle a_e varyasyon parametresi ile E_e enerji beklenen değeri minimize edilir.

Denklem 3a'da N_F normalizasyon sabiti, φ silindirik koordinatlarda açılı parametresidir. Ağır-deşikler için ise Denklem 2b hamiltonyeni

$$\psi_{hh}^F(\rho, \varphi) = N_F \psi_{0hh}(\rho_{hh}) e^{-\rho_{hh} \cos \varphi / a_{hh}} \quad (3b)$$

deneme dalga fonksiyonunu kullanarak a_{hh} üzerinden E_{hh} enerji beklenen değeri bulunur.

Elektron ve ağır-deşik arasındaki Coulomb etkileşmesinin dahil edilmesiyle, varyasyonel çözümde kullanılan eksitonik deneme dalga fonksiyonu

$$\psi_{e-hh} = N \psi_e^F(\rho_e) \psi_{hh}^F(\rho_{hh}) e^{-|\vec{r}_e - \vec{r}_{hh}| / \lambda} \quad (4)$$

olarak seçilmiştir. Burada N normalizasyon sabiti ve Bohr yarıçapı olan λ sistemin toplam enerjisini minimize etmek için sistematik biçimde değiştirilen varyasyonel bir parametre olarak kullanılmıştır (Wang ve ark., 2016). Toplam eksiton enerjisinin beklenen değeri

$$E_{e-h} = \min_{\lambda} \frac{\langle \psi_{e-h} | H | \psi_{e-h} \rangle}{\langle \psi_{e-h} | \psi_{e-h} \rangle} \quad (5)$$

denklemden bulunur. Eksiton bağlanma enerjisi

$$E_{e-h}^{bağ} = E_e + E_h - E_{e-h} \quad (6)$$

bağıntısından hesaplanır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'deki eş-eksenli kuantum tellerinde yalıtkan AlAs telinin yarıçapı ρ_{yal} ve tüm yapının dış yarıçapı R ile gösterilmiştir. İç GaAs tabaka tel kalınlığı $R_1 = \rho_1 - \rho_{yal}$, bunu izleyen engel potansiyeli oluşturan $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}As$ tabaka tel kalınlığını $R_2 = \rho_2 - \rho_1$, dış GaAs tabaka tel kalınlığını $R_3 = \rho_3 - \rho_2$ ve son olarak tüm yapıyı çevreleyen engel potansiyeli $Al_{x_2}Ga_{1-x_2}As$ tabaka kalınlığını da $R_4 = R - \rho_3$ parametreleri ile tanımlayalım.

Eksiton bağlanma enerjileri elektrik alan altında kuantum telinde potansiyel kuyusu işlevi gören iç telin kalınlığına bağlı olarak hesaplanmıştır. Al konsantrasyon değeri $x=0.3$ olarak alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan yapı parametreleri $\rho_{yal}=40 \text{ \AA}$, $R_1=50 \text{ \AA}$, $R_2=60 \text{ \AA}$, $R_3=40 \text{ \AA}$ dır. Ağır-deşik (hh) eksitonlar için $R^* = 3.7401 meV$, $a^*=155.2408 \text{ \AA}$ ve hafif-deşik (lh) eksitonlar için $R^*=4.4525 meV$, $a^*=130.4038 \text{ \AA}$ olarak alınmıştır. Farklı tabakalardaki elektron ve deşik kütleleri ve potansiyelleri Tablo 1' de verilmiştir (Kes ve ark. 2020).

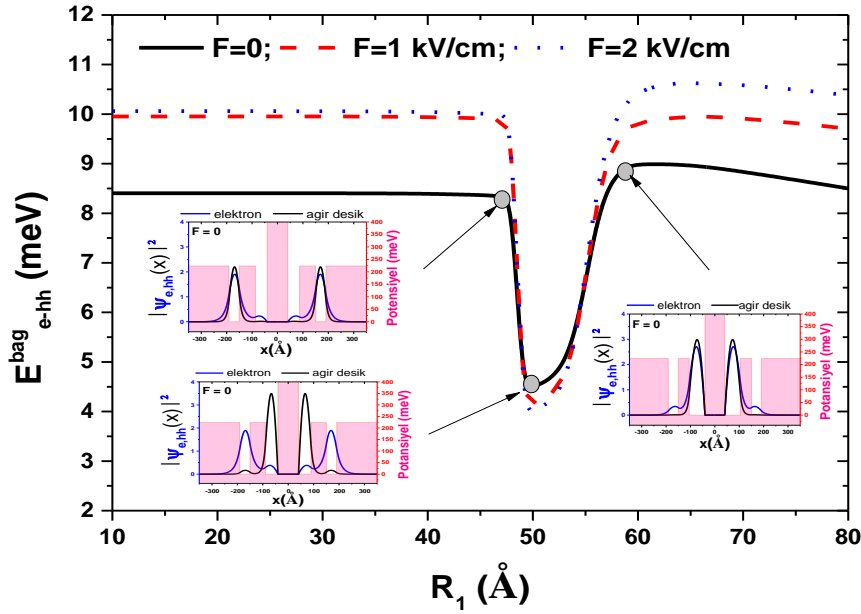
Tablo 1. Tabakalardaki elektron, ağır-deşik (hh) ve hafif-deşik (lh) kütleleri ve potansiyelleri. ($m_0=9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$).

Tabaka	m_e^* / m_0	m_{hh}^* / m_0	m_{lh}^* / m_0	$V_e (meV)$	$V_{hh} (meV)$	$V_{lh} (meV)$
AlAs	0.180	0.500	0.149	∞	∞	∞
GaAs	0.067	0.340	0.095	0	0	0
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	0.098	0.0382	0.109	224	149	149

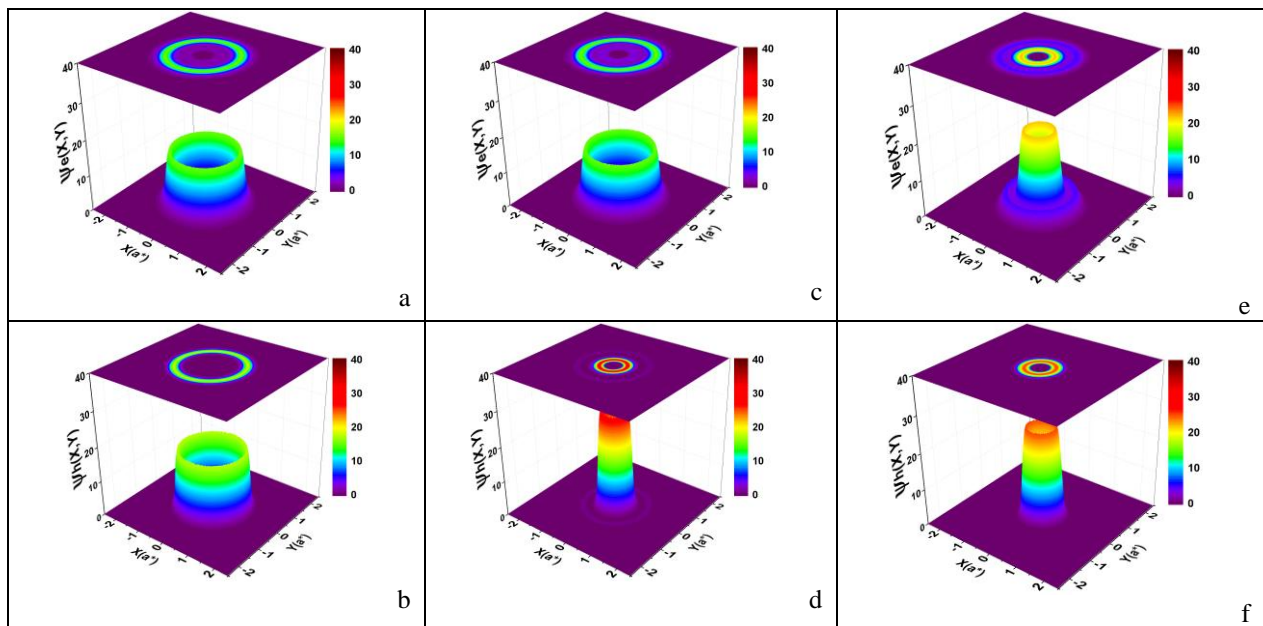
İlk önce Şekil 2'de $F=0$, $F=1 \text{ kV/cm}$ ve $F=2 \text{ kV/cm}$ değerlerinde ağır-deşik için, iç tel kalınlığının (R_1) eksiton bağlanma enerjisine etkisi gösterilmiştir. Bu inceleme sırasında yapının toplam kalınlığı sabit tutulmuştur ($R_1+R_2+R_3=150 \text{ \AA}$, $R_2=110-R_1$, $R_3=40 \text{ \AA}$). Ayrıca bu şekillerde $F=0$ değerinde eksiton bağlanma enerjilerinde çarpıcı değişimlerin görüldüğü kritik R_1 değerlerindeki ($R_1=46 \text{ \AA}$, $R_1=49 \text{ \AA}$ ve $R_1=59 \text{ \AA}$) elektron ve ağır-deşikler için olasılık dağılımları da Şekil 2 iç grafiklerinde gösterilmiştir.

$R_3=40 \text{ \AA}$ için $R_1=10 \text{ \AA}$ 'dan $R_1=80 \text{ \AA}$ 'a arttırılırken, R_2 değeri ise $R_2=100 \text{ \AA}$ 'dan $R_2=30 \text{ \AA}$ 'a kadar düşmektedir. Görüldüğü gibi bağlanma enerjisi 1. kritik değere kadar ($R_1=46 \text{ \AA}$) değişmeyip bu değerden sonra keskin bir düşüş ile minimum değerine ulaşmaktadır. İkinci kritik değerden sonra ($R_1=49 \text{ \AA}$)

bağlanma enerjisi bir maksimum değere kadar artmakta ve daha sonra hafif bir azalış göstermektedir. Bu davranışın sebebi kritik R_I değerlerine ait elektron ve ağır-deşik dalga fonksiyonlarının Şekil 3'te gösterilmesiyle açıklanmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi elektron ve ağır-deşik, birinci kritik değerde hemen hemen aynı olasılık dağılımı ile dış telde lokalize olmayı tercih ederken, ikinci kritik değerde ağır-deşik iç telde, elektron da dış telde lokalize olmayı tercih etmektedir. Üçüncü kritik değerde ($R_I=59\text{\AA}$) ise elektron ve ağır boşluğun iç telde lokalize olmayı tercih ettiği ve bağlanma enerjisinin maksimum değerini aldığı görülmektedir.

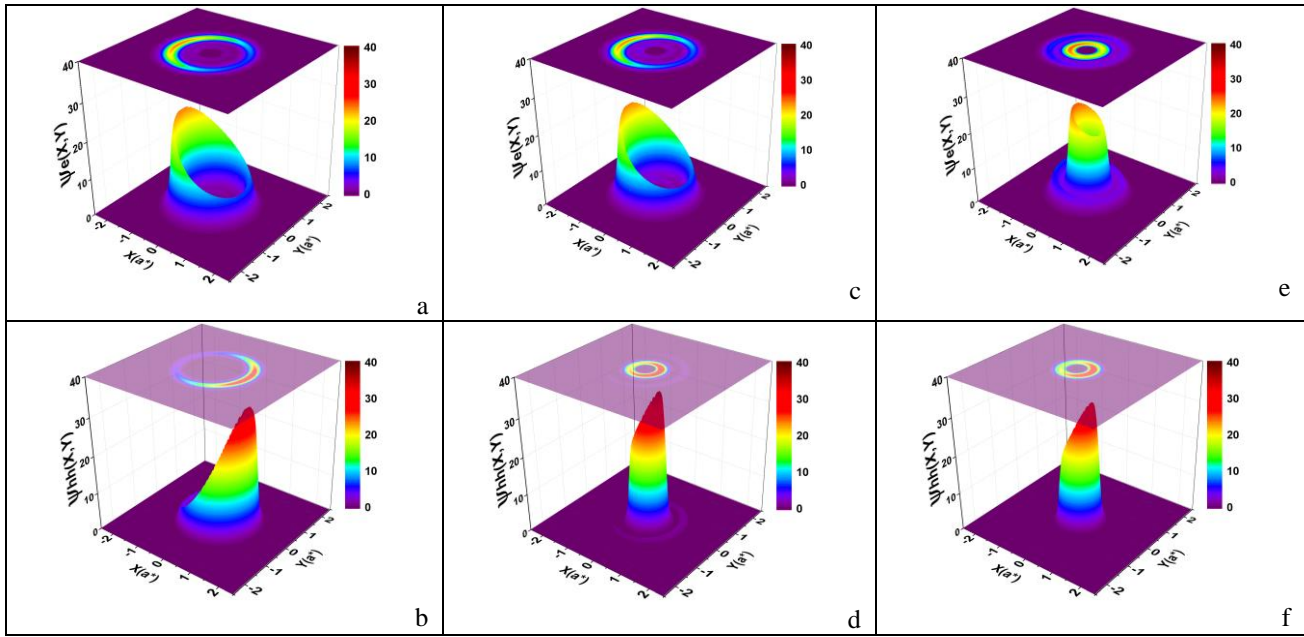


Şekil 2. Eş-eksenli çok katmanlı kuantum telindeki ağır-deşik eksiton bağlanma enerjilerinin farklı elektrik alan şiddetleri altında iç tel kalınlığı R_I ile değişimi. Düz çizgi $F=0$, kesikli çizgi $F=1 \text{ kV/cm}$ ve noktali çizgi $F=2 \text{ kV/cm}$ için verilmiştir

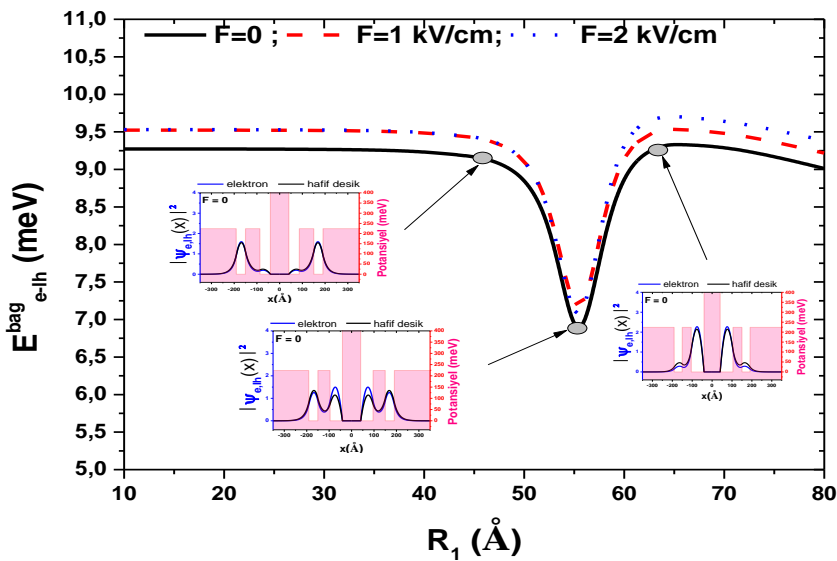


Şekil 3. $F=0$ değerinde elektron ve ağır-deşik (hh) için dalga fonksiyonları. Şekil a-b'de $R_I=46 \text{ \AA}$, Şekil c-d 'de $R_I=49 \text{ \AA}$ ve Şekil e-f 'de $R_I=59 \text{ \AA}$ olarak alınmıştır

Şekil 2’de bu yapıya elektrik alan uygulandığında bağlanma enerjisinin 1. kritik değere kadar arttığı, 1. kritik noktadan 3. kritik noktaya kadar olan kısım arasında elektrik alan şiddetinin etkili olmadığı gözlenmiştir. Elektrik alan şiddeti etkisinin 3. kritik noktadan sonra belirgin biçimde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu davranışlar Şekil 4’te gösterilen $F=2 \text{ kV/cm}$ değerindeki elektron ve ağır-deşik için gösterilen dalga fonksiyonları ile daha iyi açıklanabilir. Elektrik alan şiddetinin artmasıyla elektron ve ağır-deşik zıt yönde yönelmiş olmasına rağmen ikisi de dış telde lokalize olmuştur. Elektrik alan yokken dalga fonksiyonları x - y düzleminde homojen olarak dağılmakta iken, elektrik alan uygulandığında ise elektron ve ağır-deşik aynı telde ve x yönünde lokalize olup dalga fonksiyonları da x yönünde yoğunlaştığı için bağlanma enerjisi artmıştır.



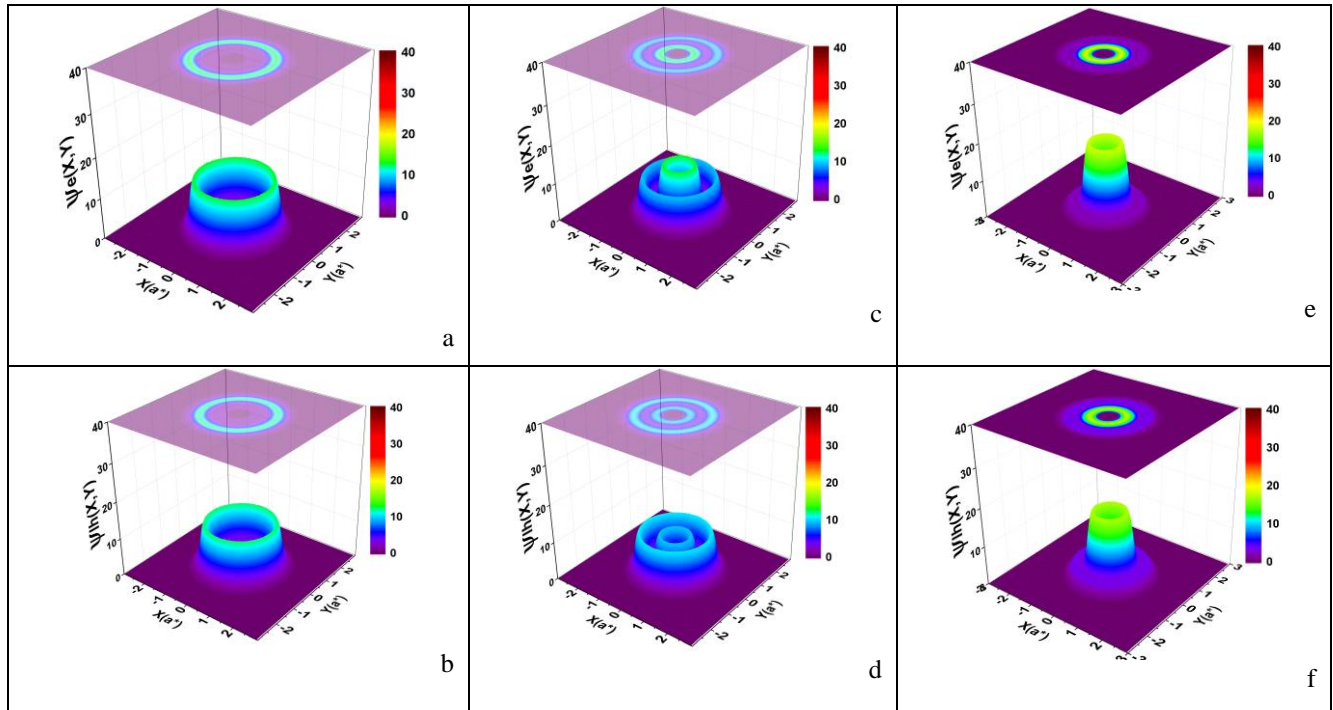
Şekil 4. $F=2 \text{ kV/cm}$ değerinde elektron ve ağır-deşik (hh) dalga fonksiyonları. Şekil a-b’de $R_l=46 \text{ Å}$, Şekil c-d’de $R_l=49 \text{ Å}$ ve Şekil e-f’de $R_l=59 \text{ Å}$ olarak alınmıştır



Şekil 5. Eş-eksenli çok katmanlı kuantum telindeki hafif-deşik eksiton bağlanma enerjilerinin farklı elektrik alan şiddetleri altında iç tel kalınlığı R_l ile değişimi. Düz çizgi $F=0$, kesikli çizgi $F=1 \text{ kV/cm}$ ve noktalı çizgi $F=2 \text{ kV/cm}$ için verilmiştir.

Şekil 5’de elektron ile hafif-deşik arasındaki bağlanma enerjisi, iç tel kalınlığı R_1 ’e bağlı olarak incelenmiştir. Bu inceleme sırasında yapının toplam kalınlığı yine sabit tutulmuştur ($R_1+R_2+R_3=150\text{Å}$, $R_2=110-R_1$, $R_3=40\text{Å}$). $F=0$ değerinde eksiton bağlanma enerjisinde çarpıcı değişimlerin görüldüğü kritik R_1 değerlerindeki ($R_1=46\text{Å}$, $R_1=55\text{Å}$ ve $R_1=64\text{Å}$) elektron ve hafif-deşikler için olasılık dağılımları Şekil 5 iç grafiklerinde verilmiştir. Buradaki bağlanma enerjisi karakteristik olarak Şekil 3’teki elektron ve ağır-deşik bağlanma enerjisine benzese de, kritik noktalar için verilen olasılık dağılımlarından bağlanma enerjisindeki değişimlerin Şekil 3’e göre daha az keskin olduğu gözlenmiştir. Bu durum elektrik alan yokken Şekil 6’da dalga fonksiyonları 2. kritik nokta için verilen hafif-deşik ve elektron dalga fonksiyonları ile açıklanabilir. Buna göre $R_1=55\text{Å}$ değerinde elektron olasılık yoğunluğu bir miktar dış telde yer aldığı için çok keskin bir davranış göstermemiştir. $F=2\text{ kV/cm}$ için kritik noktadaki hafif-deşik ve elektron dalga fonksiyonlarına bakılmış ve bunların Şekil 4’teki durumlara benzediği görülmüştür.

Şekil 2 ve Şekil 5 birbiriyle karşılaştırılırsa elektrik alanın ağır-deşik eksiton bağlanma enerjileri üzerinde daha etkili olduğu görülebilir.



Şekil 6. $F=0$ değerinde elektron ve hafif-deşik (lh) dalga fonksiyonları. Şekil a-b’de $R_1=46\text{Å}$, Şekil c-d’de $R_1=55\text{Å}$ ve Şekil e-f’de $R_1=64\text{Å}$ olarak alınmıştır

SONUÇ

Sonuç olarak ağır-deşik ve elektron ile hafif-deşik ve elektron arasındaki bağlanma enerjileri iç tel kalınlığının artmasıyla ilginç değişimler göstermiştir. Teorik olarak ağır-deşik ve elektron arasındaki bağlanma enerjisinin elektrik alan yokken veya varken belirli bir yapısal değer aralığında keskin değişimler gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca elektron ve hafif-deşik bağlanma enerjilerinde elektrik alan etkisinin, elektron ve ağır-deşik bağlanma enerjilerinde olduğu kadar etkili olmadığı gözlenmiştir. Bu sistemlerde elektrik alan etkisi önemli olsa da ağır-deşikler üzerinde çalışmanın daha doğru olacağı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aktas S, Boz FK, 2008. The binding energy of hydrogenic impurity in multilayered spherical quantum dot. *Physica E*, 40: 753–758.
- Aktas S, Boz FK, Bilekkaya A, Okan SE, 2009. The electronic properties of a coaxial square GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well wire in an electric field. *Physica E*, 41: 1572–1576.
- Aktas S, Boz FK, Dalgic SS, 2005. Electric and magnetic field effects on the binding energy of a hydrogenic donor impurity in a coaxial quantum well wire. *Physica E*, 28: 96–105.
- Akturk A, Sahin M, Koc F, Erdinc A, 2014. A detailed investigation of electronic and optical properties of the exciton, the biexciton and charged excitons in a multi-shell quantum dot nanocrystal. *Journal of Physics D- Applied Physics*, 47:28.
- Boz FK, Aktas S, Bilekkaya A, Okan SE, 2010. The multilayered spherical quantum dot under a magnetic field. *Applied Surface Science*, 256: 3832–3836.
- Boz FK, Aktas S, 2005. Magnetic field effect on the binding energy of a hydrogenic impurity in coaxial GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well wires. *Superlattices and Microstructures*, 37: 281–291.
- Boz FK, Aktas S, Bilekkaya A, Okan SE, 2009. Geometric effects on energy states of a hydrogenic impurity in multilayered spherical quantum dot. *Applied Surface Science*, 255: 6561–6564.
- Chafaia A, Essaoudi I, Ainanea A, Dujardin F, Ahuja R, 2019. Binding energy of an exciton in a GaN/AlN nanodot: Role of size and external electric field. *Physica B: Condensed Matter*, 559: 23–28.
- Galimov AI, Rakhlin MV, Belyaev KG, Klimko GV, Evropeytsev EA, Toropov AA, 2019. Investigation of the spectrum of exciton excited states in self-organized InAs/AlGaAs quantum dots. *Acta Physica Polonica A*, (136): 4.
- Harris R, Terblans J, Swart H, 2015. Exciton binding energy in an infinite potential semiconductor quantum well–wire heterostructure. *Superlattices and Microstructures*, 86: 456–466.
- Karki HD, Elagoz S, Baser P, Amca R, Sokmen I, 2007. Barrier height effect on binding energies of shallow hydrogenic impurities in coaxial GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well wires under a uniform magnetic field. *Superlattices and Microstructures*, 41 (4), 227-236.
- Kasapoğlu E, Sari H, Bursal M, Sokmen I, 2003. Exciton absorption in quantum-well wires under the electric field. *Physica E*, 16: 272 – 243.
- Kes H, Bilekkaya A, Aktas S, Okan S E, 2017. Binding energy of a hydrogenic impurity in a coaxial quantum wire with an insulator layer. *Superlattices and Microstructures*, 111: 966-975.
- Kes H, Okan SE, Aktas S, 2020. The excitons in infinite potential centered multilayered coaxial quantum wire and the magnetic field effects on their properties, *Superlattices and Microstructures*, 139: 106421.
- Kolodka RS, Pundyk IP, Dmitruk I, 2020. Study of Coherent Properties of an Exciton in Semiconductor Quantum Dots. *Journal of Nano-and Electronic Physics*, 12 (3): 03022.
- Lopes EM, Cesar DF, Franchello F, Duarte JL, Dias JFL, Laureto E, Elias DC, Pereira MVM, Guimaraes PSS, Quivy AA, 2013. Exciton binding energy in a double quantum well: effect of the barrier shift. *Journal of Luminescence*, 144: 98–104.
- Rojas-Briseno JG, Miranda-Pedraza GL, Martinez-Orozco JC, 2017. Exciton binding energy in coupled double zinc blende GaN/InGaN quantum well. *Phys. Status Solidi B*, 254 (4): 1600461.
- Saravanan S, Peter AJ, Lee CW, 2015. Combined effects of magnetic and electric fields on the inter band optical transitions in InAs/InP quantum wire. *Physica E*, 67: 99–104.
- Wang H, Wang W, Gong Q, Wang S, 2016. External electric field effect on exciton binding energy in InGaAsP/InP cylindrical quantum wires. *Physica B*, 503:117–120.
- Wu S, 2011. Exciton binding energy and excitonic absorption spectra in a parabolic quantum wire under transverse electric field. *Physica B*, 406: 4634–4638.
- Zhai LX, Wang Y, Liu JJ, 2011. Exciton in an anisotropic parabolic quantum-well wire in the presence of a magnetic field. *Journal of Applied Physics*, 110: 043701.