

# ANTİSİMETRİK $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$ KUANTUM KUYUSUNDA SICAKLIK VE HİDROSTATİK BASINÇ ETKİLERİ

Serpil SUCU<sup>1\*</sup>, Sema MİNEZ<sup>1</sup>, Hasan AKBAŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Edirne, Türkiye

**Özet:** Bu çalışmada sıcaklık ve hidrostatik basınç etkisi altında simetrik  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  ve antisimetrik  $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$  kuantum kuyularında engel yükseklik oranlarının etkileri, etkin kütle yaklaşımında varyasyonel yöntem kullanılarak çalışıldı. Taban durum yabancı atom enerjileri, yabancı atom enerjisinin dönüm noktaları ve taban durum normalize edilmiş bağlanma enerjileri hesaplandı. Sıcaklık, hidrostatik basınç, farklı engel yükseklikleri ve yabancı atom konumunun, taban durum yabancı atom enerjisini ve yabancı atom enerjisinin dönüm noktalarını önemli ölçüde değiştirdiği gösterildi.

**Anahtar Kelimeler:** Dönüm noktası, Sıcaklık, Hidrostatik basınç, Bağlanma enerjisi, Normalize edilmiş bağlanma enerjisi

## THE TEMPERATURE AND HYDROSTATIC PRESSURE EFFECTS IN THE ASYMMETRIC $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$ QUANTUM WELL

**Abstract:** In this work, we studied the effects of barrier height ratio  $V_L/V_R$  on symmetric  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  and asymmetric  $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$  quantum wells under the presence of hydrostatic pressure and temperature by using variational method with in the effective mass approximation. We calculated ground state impurity energies, impurity energy turning points and ground state normalized binding energies as functions of the impurity position. We observed that the ground state impurity energies and impurity energy turning points depends strongly on hydrostatic pressure, temperature, different barrier heights and impurity positions.

**Keywords:** Turning point, Temperature, hydrostatic pressure, Binding energies, Normalized binding energies

### Giriş

Düşük boyutlu sistemlerde yabancı atom durumları üzerine kuantum sınırlamalarının etkilerini anlamak önemlidir. Son yıllarda, kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi düşük boyutlu sistemlerde yabancı atom durumları yeni devre tasarımlarına olanak sağladığından dolayı elektronik ve iletişim teknolojisini daha iyi bir duruma getirebilmek için teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır.

Yabancı atom durumları üzerine sıcaklık ve hidrostatik basıncın etkileri ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Küresel kuantum noktasında yabancı atomun bağlanma enerjisi üzerinde sıcaklığın etkisi Elabsy tarafından çalışılmıştır (Elabsy,

1992). Kuantum kuyusunda sıcaklık ve hidrostatik basıncın etkileri Klar vd. tarafından çalışılmıştır (Klar, 2001). Küresel kuantum noktasında bağlanma enerjisinin üzerine elektrik alan hidrostatik basınç ve sıcaklığın etkileri çalışılmıştır (Erdoğan, 2013; Rezaei, 2012). Antisimetrik kuantum kuyusuna hidrostatik basınç ve elektrik alan etkisi Niculescu vd. tarafından çalışılmıştır (Niculescu, 2010). Herhangi bir dış etkinin olmadığı antisimetrik  $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$  kuantum kuyusuna farklı engel yükseklik oranlarının etkileri çalışılmıştır (Akbas, 2014; Zhang, 2010). Normalize edilmiş bağlanma enerjisi üzerine elektrik alan, manyetik alan ve hidrostatik basıncın etkileri çalışılmıştır (Dane, 2009; Dane, 2010; Dane, 2011).

Biz de bu çalışmada etkin kütle yaklaşımında varyasyonel yöntem kullanarak sıcaklığın ve hidrostatik basıncın etkisi altındaki simetrik  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  ve antisimetrik  $Al_{xL}Ga_{1-xL}As/GaAs/Al_{xR}Ga_{1-xR}As$  kuantum kuyusunu inceledik. Farklı engel yükseklik oranları, sıcaklık ve hidrostatik basınç değerleri için taban durum yabancı atom enerjisinin pozitif değerlerden negatif değerlere geçtiği dönüm noktalarını (DN) hesapladık. Ayrıca taban durum bağlanma enerjisini taban durum yabancı atom enerjisine bölerek normalize edilmiş bağlanma enerjisini hesapladık. Görülmektedir ki engel yükseklik oranlarını ve yabancı atom konumunu değiştirmek elektron-yabancı atom mesafesini

değiştirmektedir ve aynı zamanda  $z$  doğrultusundaki dalga fonksiyonunu kaydırmakta ve sistemin simetrisini bozmaktadır (Akbas, 2014). Bu durum kuantum kuyusunun elektronik ve optiksel özelliklerini değiştirmede önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle bizim sonuçlarımız yeni elektronik cihazların tasarlanmasında kullanılabilir. Bu çalışmada sıcaklık Kelvin ve hidrostatik basınç kbar birimindedir.

### Yöntem

Etkin kütle yaklaşımında  $Al_{xL}Ga_{1-xL}As/GaAs/Al_{xR}Ga_{1-xR}As$  kuantum kuyusunda sıcaklık ve hidrostatik basınç etkisi altında  $\vec{r}_i = (0,0,z_i)$  ' de konumlandırılmış hidrojenik donör yabancı atom için silindirik koordinatlarda Hamiltonyen (Akbas, 2014),

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*(P,T)} \left[ \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] - \frac{e^2}{\varepsilon(P,T)\sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} + V(z,P,T) \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada  $e$  elektron yükü,  $\sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}$  elektron ile yabancı atom arasındaki mesafe,  $\varepsilon(P,T)$  kuantum kuyusunun içindeki ortamın dielektrik sabiti ve  $m^*(P,T)$  etkin küttedir,  $\varepsilon(P,T)$  ve  $m^*(P,T)$  hidrostatik basıncın ve sıcaklığın fonksiyonu olarak,

$$\varepsilon(P,T) = \begin{cases} 12.74 \exp(-1.73 \times 10^{-3} P) \exp[9.4 \times 10^{-5} (T - 75.6)] & T \leq 200K \\ 13.18 \exp(-1.73 \times 10^{-3} P) \exp[20.4 \times 10^{-5} (T - 300)] & T \geq 200K \end{cases} \quad (2)$$

ve

$$m^*(P,T) = \left[ 1 + 7.51 \left( \frac{2}{E_g^\Gamma(P,T)} + \frac{1}{E_g^\Gamma(P,T) + 0.341} \right) \right]^{-1} m_0 \quad (3)$$

şeklinindedir (John Peter, 2008; Yeşilgül, 2010).

Buradaki  $E_g^\Gamma(P,T)$ ,  $GaAs$  için hidrostatik basınç ve sıcaklığa bağlı yasak enerji aralığıdır ve

$$E_g^\Gamma(P,T) = 1.519eV + \alpha \frac{T^2}{T + 204K} + bP + cP^2 \quad (4)$$

şeklinindedir. Burada  $\alpha = -5.405 \times 10^{-4}$  eV/K,  $b = 1.26 \times 10^{-2}$  eV/kbar,  $c = -3.77 \times 10^{-5}$  eV/kbar<sup>2</sup>dir (John Peter, 2008).

Antisimetrik kuantum kuyusu için sınırlayıcı potansiyel  $V(z,P,T)$ ,

$$V(z,P,T) = \begin{cases} V_L(x_L,P,T) & , z < 0 \\ 0 & , 0 \leq z \leq L(P) \\ V_R(x_R,P,T) & , L(P) < z \end{cases} \quad (5)$$

dir. Kuantum kuyusunun kuyu genişliği, dış etki yokken  $L_0$  ile gösterilir ve kuyu genişliğine sıcaklığın etkisi ihmal edilebilecek kadar az olduğundan dolayı

$$L(P) = L_0 \left( 1 - 1.5082 \times 10^{-3} P \right) \quad (6)$$

şeklinde hidrostatik basıncın bir fonksiyonu olarak ifade edilir (John Peter, 2008).  $V(z,P,T)$  sınırlayıcı potansiyeli farklı  $Al$  mol kesirleri ile üç katmanlı olarak üretilir ve

$$x(z) = \begin{cases} x_L & , z < 0 \\ 0 & , 0 \leq z \leq L(P) \\ x_R & , L(P) < z \end{cases} \quad (7)$$

dir.  $\Delta E_g$  eV,  $D(x_{L,R})$  eV/kbar ve  $G(x_{L,R})$  eV/K biriminde olmak üzere

$$\text{şeklinde dir. Biz bu çalışmada } \beta = \frac{x_L}{x_R} \text{ 'yı } \Delta E_g^\Gamma(x_{L,R}) = 1.155x_{L,R} + 0.37x_{L,R}^2 \quad (10)$$

$$\text{antisimetrik parametre olarak tanımladık. } D(x_{L,R}) = -1.3 \times 10^{-3} x_{L,R} \quad (11)$$

$$\text{Hesaplarımızda herhangi bir dış etkinin olmadığı } G(x_{L,R}) = -1.15 \times 10^{-4} x_{L,R} \quad (12)$$

durumda, sabit  $Al$  mol kesrinin  $x_L = 0.3$  olduğu duruma karşılık gelen  $V_L = 228 \text{ meV}$  değerini kullandık.

dir[13].

Yabancı atomun yokluğunda Hamiltonyenin özfonksiyonları taban durum için

Uygulanan basıncın etkisi altında engel yüksekliği

$$V_{L,R}(x_{L,R}, P, T) = Q_c \Delta E_g(x_{L,R}, P, T) \quad (8)$$

olup, burada  $Q_c = 0,658$  iletkenlik bant aralığı ve

$$\psi_0(z) = \begin{cases} B_l e^{\alpha_l z} & , 0 < L(P) \\ A_c \sin(\alpha_c z + \Phi) & , 0 \leq z \leq L(P) \\ B_r e^{-\alpha_r z} & , L(P) < z \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta E_g^\Gamma(x_{L,R}, P, T) = \Delta E_g^\Gamma(x_{L,R}) + PD(x_{L,R}) + TG(x_{L,R}) \text{ olarak ifade edilir. Burada}$$

$$\alpha_{l,r} = \sqrt{2m^*(P,T)(V_{L,R}(x_{L,R}, P, T) - E_0(L(P), P, T)) / \hbar^2} \text{ ve } \alpha_c = \sqrt{2m^*(P,T)E_0(L(P), P, T) / \hbar^2} \quad (14)$$

dir. Burada  $E_0(L(P), P, T)$  ;

$$\tan(\Phi + \alpha_c L(P)) = -\frac{\alpha_c}{\alpha_r} \text{ ve } \sin(\Phi) = \sqrt{\frac{E_0(L(P), P, T)}{V_L(x_L, P, T)}} \quad (15)$$

transandantal denklemdeki  $E_0$  taban durum enerjisidir. Yabancı atomun varlığında antisimetrik kuantum kuyusu için zamandan bağımsız Schrödinger denklemi yaklaşık yöntemlerden varyasyonel yöntemle çözülecektir. Bu durum için deneme dalga fonksiyonu

$$\psi(\rho, z) = N \psi_0(z) \exp(-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - z_i)^2}) \quad (16)$$

olarak seçilir. Burada  $\lambda$  varyasyonel parametre ve  $N$  normalizasyon sabitidir.

$E_i(L(P), z_i, V_{L,R}(x, P, T))$  taban yabancı atom enerjisi

$$E_i(L(P), z_i, V_{L,R}(x, P, T)) = \min_\lambda \frac{\langle \psi(\rho, z) | \hat{H} | \psi(\rho, z) \rangle}{\langle \psi(\rho, z) | \psi(\rho, z) \rangle} \quad (17)$$

ifadesinden  $\lambda$  'nın minimizasyonu ile elde edilir. Bu çalışmada yabancı atom enerjisi üzerine farklı engel yükseklik oranları  $\beta$  'nın etkileri ve yabancı atom konumundaki değişikliklerin etkileri araştırıldı. Yabancı atomun olmadığı durumda taban durum

enerjisi  $E_0(L(P), P, T)$  ve yabancı atom varlığında taban durum yabancı atom enerjisi  $E_i(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T))$  olmak üzere sistemin bağlanma enerjisi

$$E_b(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T)) = E_0(L(P), P, T) - E_i(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T)) \quad (18)$$

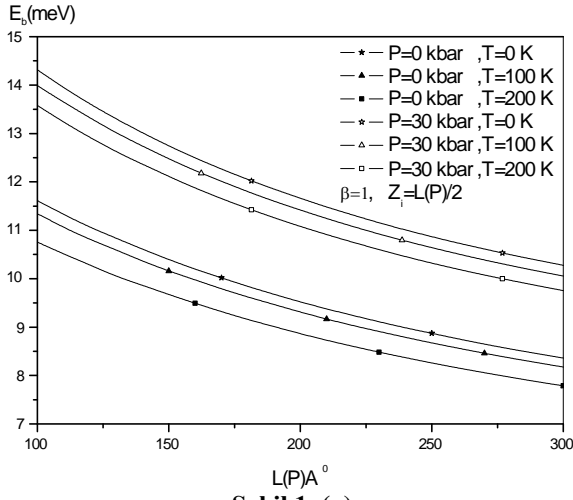
şeklinde tanımlanır ve normalize edilmiş bağlanma enerjisi,

$$NE_b(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T)) = \frac{E_b(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T))}{E_i(L(P), z_i, V_{L,R}(x_{L,R}, P, T))} \quad (19)$$

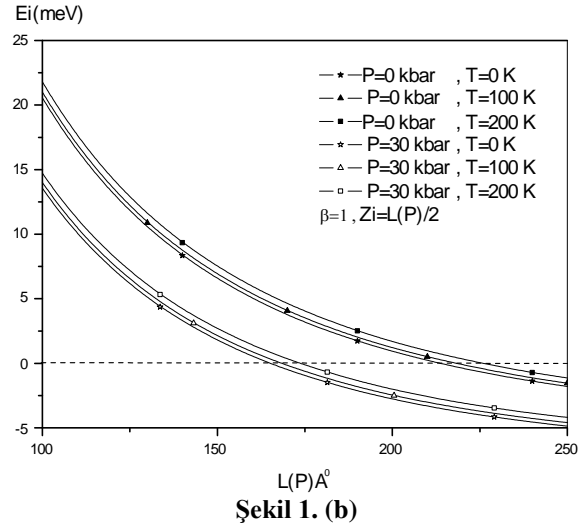
olarak tanımlanır (Dane, 2009; Dane, 2010; Dane, 2011).

### Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu kısımda  $z_i \in [0, L]$  için simetrik  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  ve antisimetrik  $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_{xR} Ga_{1-xR} As$  tekli kuantum kuyuları için nümerik hesaplamalar gerçekleştirildi. Farklı engel yükseklikleri  $\beta = 0.75$ ,  $\beta = 1$ ,  $\beta = 1.5$  seçildi. Sınırlayıcı potansiyel değeri için herhangi bir dış etkinin olmadığı durumda,  $x_L = 0.3$  seçildi. Dış etki yokken kuantum kuyu genişliği  $L_0 = 240 \text{Å}$  alınmıştır. Sıcaklık (0-250) K ve hidrostatik basınç (0-30) kbar, aralığında incelenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki beş grafikte verilmiştir.



Şekil 1. (a)



Şekil 1. (b)

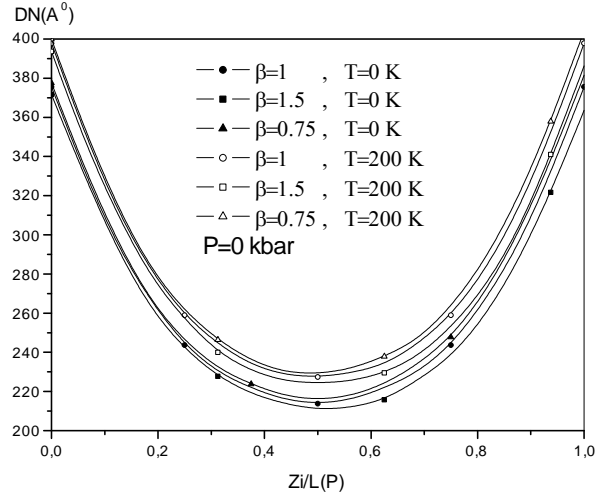
Şekil 1. (a) taban durum yabancı atom enerjisinin ve (b) taban durum bağlanma enerjisinin kuantum kuyusunun genişliğine göre değişimi

Şekil 1' de farklı sıcaklık ve hidrostatik basınç değerleri için yabancı atomun simetrik kuantum kuyusunun merkezinde olduğu durumda (a) taban durum yabancı atom enerjisinin (b) taban durum bağlanma enerjisinin kuantum kuyusunun genişliğine göre değişim grafiği gösterilmektedir. (a) da  $E_i$  taban durum yabancı atom enerjisi kuyu genişliği ve basınç arttıkça azalmakta, sıcaklık arttıkça artmaktadır. Ayrıca sıcaklığın artırılmasıyla dönüm noktalarının (DN) daha büyük kuyu genişliklerinde, basıncın artırılmasıyla DN'nın daha küçük kuyu genişliklerinde olduğu gözlenmektedir. (b) de  $E_b$  taban durum bağlanma enerjisi kuyu genişliği ve sıcaklık arttıkça azalmakta, hidrostatik basınç arttıkça artmaktadır. Bu sonuçlar literatürle uyumludur (Dane, 2011), (Karki, 2011).

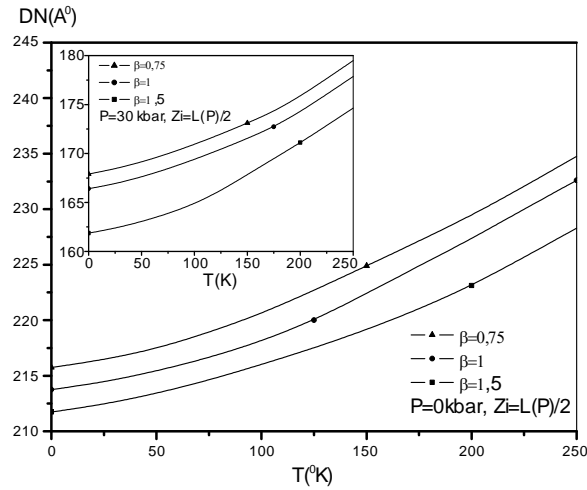
Şekil 2' de sıcaklığın farklı sabit değerleri için simetrik ve antisimetrik kuantum kuyusunda taban durum yabancı atom enerjisinin dönüm noktalarının yabancı atomun konumunun bir fonksiyonuna bağlı

olarak değişim grafiği gösterilmektedir. Yabancı atom merkezdeyken yabancı atom enerjisinin en küçük değeri aldığı görülmektedir.

Dönüm noktası eğrisi yabancı atomun konumunun  $z_i/L$  nin 0 ile 1 aralığındaki yer değiştirmesiyle ilk



**Şekil 2.** Farklı antisimetrik parametreler  $\beta$  ve sıcaklıklar  $T$  için dönüm noktalarının yabancı atomun konumunun fonksiyonu olan  $z_i/L(P)$  ye göre değişim grafiği.



**Şekil 3.** Farklı antisimetrik parametreler  $\beta$  için dönüm noktalarının sıcaklığa göre değişim grafiği

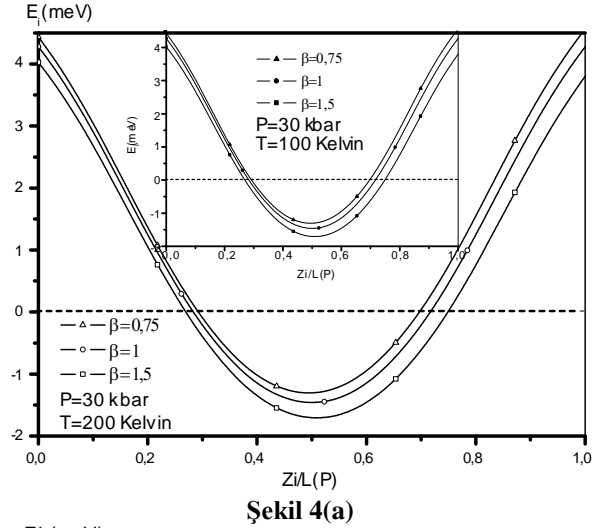
olarak  $z_i/L=0.5$  değerine kadar azalmaktadır daha sonra artmaktadır. Yani dönüm noktası eğrileri  $z_i/L=0.5$  değerinde minimumdur ve  $\beta=1$  simetrik engel yükseklik oranı durumunda dönüm noktası eğrisinin  $z_i=L(P)/2$  etrafında simetrik,  $\beta=0.75$  ve  $\beta=1.5$  durumlarında ise antisimetrik dağıldığı

görülmektedir. Dönüm noktaları engel yükseklik oranı arttıkça azalmaktadır, sıcaklık arttıkça artmaktadır.

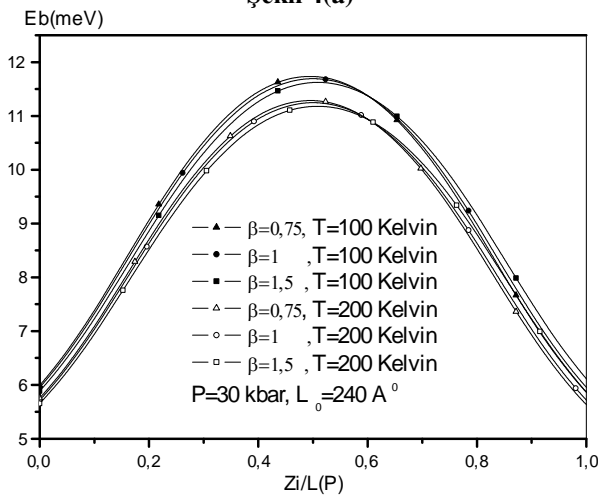
Şekil 3'de Üç farklı antisimetrik parametreler  $\beta=0.75$ ,  $\beta=1$ ,  $\beta=1.5$  için ve yabancı atomun konumunun kuantum kuyusunun merkezinde olduğu durum  $z_i=L(P)/2$  için kuantum kuyusunun taban durum yabancı atom enerjisinin dönüm noktalarının sıcaklığa göre değişimi gösterilmektedir. Dönüm noktaları  $\beta$  antisimetrik parametre arttıkça azalmakta ve sıcaklık arttıkça artmaktadır.  $P=0$  kbar değerinde farklı  $\beta$  için dönüm noktası eğrileri arasındaki fark hemen hemen birbirine çok yakındır. Ancak  $P=30$  kbar değerinde  $\beta=1.5$  için dönüm noktası eğrisinin oluşturduğu fark diğer iki dönüm noktası eğrisinin oluşturduğu farktan daha büyüktür.

Şekil 4' de  $\beta=0.75$ ,  $\beta=1$ ,  $\beta=1.5$  ve herhangi bir etkinin olmadığı durumda kuyunun genişliği  $L_0=240A^0$  için a) taban durum yabancı atom enerjisi b) taban durum bağlanma enerjisinin yabancı atom konumunun fonksiyonu olan  $z_i/L(P)$  ye göre değişim grafiği gösterilmektedir.

Her iki grafikte de  $\beta=1$  simetrik kuantum kuyusu durumu için eğrilerin kuantum kuyusunun merkezi  $z_i=L(P)/2$  ye göre simetrik olduğunu görmekteyiz.  $\beta=0.75$ ,  $\beta=1.5$  için bu simetrimin bozulduğu görülmektedir. (a) da engel yükseklik oranı arttıkça taban durum yabancı atom enerjisi  $E_i$  nin azaldığı ayrıca sıcaklık arttıkça taban durum yabancı atom enerjisi  $E_i$  nin arttığı görülmektedir.  $\beta=0.75$  için taban durum yabancı atom enerjisinin negatif bölgede

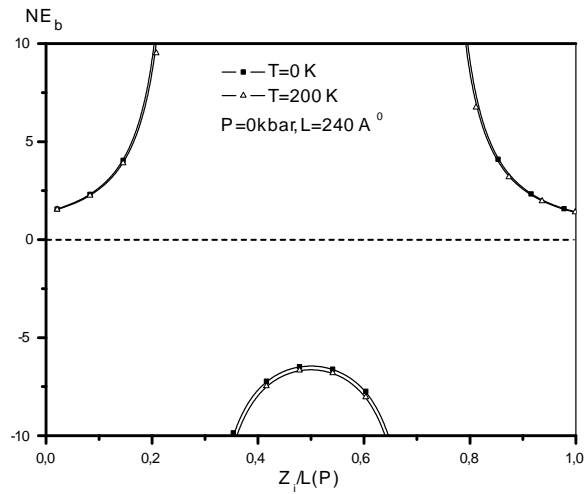


Şekil 4(a)



Şekil 4(b)

Şekil 4. (a) taban durum yabancı atom enerjisinin (b) taban durum bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumunun fonksiyonu olan  $z_i/L(P)$  ye göre değişim grafiği.



Şekil 5. Normalize edilmiş bağlanma enerjisinin yabancı atom konumuna bağlı değişim grafiği.

kapladığı alan en küçük iken  $\beta=1.5$  için taban durum yabancı atom enerjisinin negatif bölgede kapladığı alan en büyüktür. Ayrıca  $z_i > L(P)/2$  durumu için taban durum yabancı atom enerjileri arasındaki fark  $z_i < L(P)/2$  durumuna göre belirgin şekilde artmaktadır. (b) de bağlanma enerjisi eğrisinin maksimum değeri  $\beta=0.75$  durumu için kuantum kuyusunun sol bölgesine doğru ve  $\beta=1.5$  için kuantum kuyusunun sağ bölgesine doğru kaymaktadır. Ayrıca sıcaklık arttıkça bağlanma enerjisinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 5' de Normalize edilmiş bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumuna göre değişim grafiği iki farklı sıcaklık değeri için gösterilmektedir. Bu grafikte kuantum kuyu genişliği  $L=240\text{Å}$  antisimetrik parametre  $\beta=1$  ve hidrostatik basınç  $P=0$  kbar olarak seçilmiştir. Normalize edilmiş bağlanma enerjisinin artan sıcaklık ile azaldığı ve dönüm noktalarında sonsuz değer aldığı görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada etkin kütle yaklaşımı içerisinde varyasyonel yöntem kullanılarak antisimetrik kuantum kuyusu üzerinde farklı antisimetrik parametrelerin, sıcaklığın ve hidrostatik basıncın taban durum yabancı atom, taban durum bağlanma ve normalize edilmiş bağlanma enerjileri üzerine etkileri araştırıldı. Elektron-yabancı atom mesafesinin, yabancı atomun konumu  $z_i$  ve antisimetrik parametre  $\beta$  ile değiştiği gözlemlendi.  $\beta$  ve  $z_i$  nin yalnızca elektron-yabancı atom mesafesini etkilemediği aynı zamanda  $z$  doğrultusundaki dalga fonksiyonunu kaydırıldığı ve sistemin simetrisini bozduğu gözlemlendi. Antisimetrik parametre  $\beta$  ve hidrostatik basıncın artmasıyla dönüm noktalarının (DN) daha küçük kuyu genişliklerinde, sıcaklığın artmasıyla dönüm noktalarının (DN) daha büyük kuyu genişliklerinde olduğu görüldü.

**Kaynakça**

- AKBAS H, DANE C.,ERDOGAN I., AKANKAN O., Hydrogenic donor in asymmetric  $Al_xL Ga_{1-x}L As/GaAs/Al_xR Ga_{1-x}R As$  quantum wells, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 60, p. 196-199, 2014.
- DANE C., AKBAS H., GULEROGLU A., MİNEZ S., The effect of magnetic field in a GaAs/AlAs spherical quantum dot with a hydrogenic impurity, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 41, p. 605-608, 2009.
- DANE C., AKBAS H., MİNEZ S., GULEROĞLU A., Simultaneous effects of electric and magnetic fields in a GaAs/AlAs spherical quantum dot with a hydrogenic impurity, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 42, p. 1901-1904, 2010.
- DANE C. , AKBAS H. , GULEROĞLU A. , MİNEZ S. ; KASAPOĞLU K. , The hydrostatic pressure and electric field effects on the normalized binding energy of hydrogenic impurity in a GaAs/AlAs spherical quantum dot, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 44, p. 186-189, 2011
- ELABSY A.M., Temperature dependence of shallow donor states in GaAs- $Al_x Ga_{1-x} As$  compositional superlattice, *Physica Scripta*, no. 46, p. 473-475, 1992.
- ERDOGAN I., AKANKAN O., AKBAS H., Simultaneous effects of temperature, hydrostatic pressure and electric field on the self-polarization and electric field polarization in GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As spherical quantum dot with a donor impurity, *Superlattices and Microstructures*, no. 59, p. 13-20, 2013.
- JOHN PETER A., NAVANETHAKRISHNAN K., Effects of position-dependent effective mass and dielectric function of a hydrogenic donor in a quantum dot, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 40, p. 2747-2751, 2008.
- KARKI H.D., ELAGOZ S., BASER P., The high hydrostatic pressure effect on shallow donor binding energies in GaAs-(Ga, Al)As cylindrical quantum well wires at selected temperatures, *Physica B Condensed Matter*, no. 406(11), p. 2116-2120, 2011.
- KLAR P.J., GRÜNİNG H, HEİMBRODT W., Pressure and Temperature Dependent Studies of GaN<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub>/GaAs Quantum Well Structures, *Phys.Status solidi B*, no. 223, p. 163, 2001.
- NICULESCU E.C., ESEANU N., Hydrostatic pressure and electric field effects on the normalized binding energy in asymmetrical quantum wells, *Eur. Phys. J. B*, no. 75, p. 247-251, 2010.
- REZAEI G., KISH S.S., Effects of external electric and magnetic fields, hydrostatic pressure and temperature on the binding energy of a hydrogenic impurity confined in a two-dimensional quantum dot, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 45, p. 56-60, 2012.
- YESILGUL U., SAKIROGLU S., KASAPOGLU E., SARI H., SOKMEN I., The effects of temperature and hydrostatic pressure on the photoionization cross-section and binding energy of impurities in quantum-well wires, *Superlattices and Microstructures*, no. 48, p. 106-113, 2010.
- ZHANG C., WANG Z., LIU Y., GUO K., Binding energy of shallow donor impurity in asymmetric quantum wells, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, no. 43, p. 372-374, 2010.