

T.C
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GaAs/GaAlAs KUANTUM KUYUSU

RECEP ADIYAMAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI
Prof.Dr. Hasan AKBAŞ
EDİRNE-2013

GaAs/GaAlAs KUANTUM KUYUSU

RECEP ADIYAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANA BİLİM DALI

2013

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof.Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof.Dr. Ş.Erol OKAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Hasan AKBAŞ
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Fizik Anabilim Dalında bir Yüksek lisans olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad):

İmza

Prof.Dr. Hasan AKBAŞ

Doç.Dr. İlhan ERDOĞAN

Yrd. Doç.Dr. Cengiz DANE

Tarih: / /

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

/ / 2013
Recep ADIYAMAN

Yüksek Lisans Tezi

GaAs/GaAlAs Kuantum Kuyusu

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, düzgün elektrik alanın simetrik GaAs/AlAs ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As kuantum kuyularında donör bağlanma enerjisi ve durum yoğunluğuna etkisi hesaplanmıştır. Hesaplar etkin kütle yaklaşımıyla varyasyonel yöntemle yapılmıştır. Donör bağlanma enerjisi ve durum yoğunluğu ile ilgili sonuçlar kuyu genişliği ve elektrik alanın fonksiyonu olarak verilmiştir.

Yıl : 2013

Sayfa Sayısı :78

Anahtar Kelimeler : durum yoğunluğu, düzgün elektrik alan, bağlanma enerjisi, kuantum kuyusu

Master Thesis

GaAs/GaAlAs Quantum Well

The Title of Thesis

Trakya University Institute of Natural Sciences

Physics Department

ABSTRACT

In this work ,the influence of an uniform electric field on the donor binding energy and density of state in single symetric GaAs/AlAs and GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As quantum wells have been calculated. The calculations have been performed using a variational prosedure within the effective –mass approximation. The results for the binding energies and the density of states as functions as well thicknesses , and electric field have been reported.

Year : 2013

Number of Pages :78

Keywords : density of states, uniform electric field ,binding energy,quantum well

TEŞEKKÜRLER

Tez danışmanlığını yaparak, çalıőmalarım sırasında tüm çalıőma ortamını ve İmkânlarını sağlayan, aydınlatıcı bilgileriyle yol gösteren ve desteğini hiç bir zaman esirgemeyen Trakya Üniversitesi Fen Fakóltesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Hasan AKBAŞ'a teőekkür ederim.

Çalıőmalarım esnasında aydınlatıcı bilgilerini ve desteğini esirgemeyen Trakya Üniversitesi Fen Fakóltesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. őaban AKTAŞ'a, Doç.Dr. İlhan ERDOĞAN' a, Yrd. Doç.Dr. Okan AKANKAN' a da ayrıca teőekkür ederim.

Tez çalıőmalarım sırasında tüm manevi desteğini benden esirgemeyen aileme ve ayrıca bana ayrı bir moral veren küçük kardeőim Emir Arda 'ya teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜRLER	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİL DİZİNİ	vii
GRAFİK DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
1.1 DÜŞÜK BOYUTLU YAPILARIN OLUŞTURULMASI	2
1.2 KUANTUM KUYULARI	2
1.3 DÜŞÜKBOYUTLU YAPILARDA HAPSEDİLEN BİR PARÇACIĞIN ÖZELLİKLERİ	4
1.4 NÜMERİK HESAPLARDA BİRİM SEÇİMİ	6
2.SONSUZ POTANSİYEL ENGELLİ KUANTUM KUYUSUNDA ELEKTRİK ALAN VE YABANCI ATOM	8
2.1 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusu	8
2.2 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alan	14
2.3 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom	19
2.4 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom ve Düzgün Elektrik Alan	25
3.SONLU POTANSİYEL KUANTUM KUYUSUNDA ELEKTRİK ALAN VE YABANCI ATOM	34
3.1 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusu	34

3.2 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alanın Etkisi.	37
3.3 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom	39
3.4 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusunda Yabancı Atom Ve Elektrik Alan	45
4. SONLU VE SONSUZ KUANTUM KUYULARINDA DURUM YOĞUNLUĞU..	52
4.1 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donor Durum Yoğunluğu	52
4.2 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusunda Donor Durum Yoğunluğu	58
4.3 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alan Etkisinde Donor Durum Yoğunluğu.....	64
4.4 GaAs/Ga _{0,7} Al _{0,3} As Sonlu Kuantum Kuyusunda Elektrik Alan Etkisinde Donor Durum Yoğunluğu.....	68
SONUÇ VE TARTIŞMA	72
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER DİZİNİ

∇^2	Laplasyen
a^*	Etkin Bohr yarıçapı
a_0	Bohr yarıçapı
E	Enerji
E_b	Bağlanma enerjisi
F	Elektrik alan şiddeti
m^*	Elektronun etkin kütlesi
R^*	Etkin Rydberg enerjisi
z_i	Yabancı atomun konumu
β	Varyasyonel parametre
ϵ	Dielektrik sabiti
η	Hamiltonien 'deki elektrik alan terimi
λ	Varyasyonel parametre
ψ	Dalga fonksiyonu

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1.1: Düşük boyutlu yapıların oluşumu.....	2
Şekil 1.2.1: Sonlu kuantum kuyusunun band yapısı.....	3
Şekil 2.1.1: Sonsuz Kuantum Kuyusu.....	8
Şekil 2.2.1: Elektrik alan altında sonsuz kuantum kuyusu.....	14
Şekil 2.3.1: Yabancı Atomlu Sonsuz Kuantum Kuyusu.....	19
Şekil 2.4.1: Sonsuz Kuantum Kuyusunda Yabancı Atom ve Elektrik Alan Etkisi.....	25
Şekil 3.1.1: Sonlu Kuantum Kuyusu.....	34
Şekil 3.2.1: Sonlu kuantum kuyusuna elektrik alanın etkisi.....	38
Şekil 3.3.1: Yabancı atomlu Sonlu kuantum kuyusu.....	39

GRAFİK DİZİNİ

Grafik 2.1.1: Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum enerjisinin kuyu genişliği L (Angstrom) ile değişimi.....	12
Grafik 2.1.2: Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban dalga fonksiyonları, $L=50 a^*$, $L=200 a^*$	13
Grafik 2.2.1:Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum subband enerjisinin elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) ile değişimi.....	17
Grafik 2.2.2: Konuma göre simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen elektronun taban durum subband enerjisinin üç farklı elektrik alan şiddeti F (kV/cm) altında kuantum kuyusu genişliği $L(a^*)$ ile değişimi.....	18
Grafik 2.3.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda beş farklı kuantum kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ yabancı atomun konumuna bağlı olarak değişimi.....	22
Grafik 2.3.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda üç farklı kuantum kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ yabancı atomun konumuna bağlı olarak değişimi.....	23

Grafik 2.3.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda dört farklı yabancı atom konumu için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ 'nin kuantum kuyusu genişliğine göre ($L(a^*)$) göre değişimi.....	24
Grafik 2.4.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine ($L(a^*)$) göre değişimi.....	28
Grafik 2.4.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi $z_i=0$	29
Grafik 2.4.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti F (kV/cm) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i=L/4$	30
Grafik 2.4.4: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisine $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i=L/2$	31
Grafik 2.4.5: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i=-L/2$	32
Grafik 2.4.6: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuyu genişlikleri için $L(a^*)$ donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine F (kV/cm) göre değişimi.....	33

Grafik 3.3.1:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda farklı kuyu genişlikleri ($L(a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atomun konumuna göre değişimi.....	43
Grafik 3.3.2:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda dört farklı yabancı atom konumu için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi.....	44
Grafik 3.4.1:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı konum için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine göre değişimi.....	48
Grafik 3.4.2:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı elektrik alan şiddeti için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi.....	49
Grafik 3.4.3:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı elektrik alan için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi $z_i=L/2$	50
Grafik 3.4.4:Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine göre değişimi, $z_i=0$	51
Grafik 4.1.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun farklı kuantum kuyu genişliklerinde ($L (a^*)$) donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi.....	54
Grafik 4.1.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun farklı kuantum kuyu genişliklerinde ($L (a^*)$) donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi.....	55
Grafik 4.1.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için ($L (a^*)$) durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $L=1a^*,2a^*$	56

Grafik 4.1.4: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için ($L (a^*)$) durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $L=3a^*,4a^*$	57
Grafik 4.2.1: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda hapsedilen bir elektronun farklı kuantum kuyu genişliklerinde ($L (a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40 R^*,L=1,2,3,4 a^*$	60
Grafik 4.2.2: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişliklerinde ($L (a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40 R^*,L=1,2a^*$	61
Grafik 4.2.3: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için ($L (a^*)$) durum yoğunluğunun yabancı atom donör bağlanma enerjisine göre değişimi $V=40 R^*,L=1,2 a^*$	62
Grafik 4.2.4: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için ($L (a^*)$) durum yoğunluğunun yabancı atom donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $V=40 R^*,L=3,4 a^*$	63
Grafik 4.3.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri ($F (kV/cm)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi.....	65
Grafik 4.3.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri ($F (kV/cm)$) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=0 kV/cm,,F=100 kV/cm$	66

Grafik 4.3.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=100$ kV/cm, $F=200$ kV/cm.....	67
Grafik 4.4.1: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40$ R*, $L=1,5$ a*.....	70
Grafik 4.4.2: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=0$ kV/cm, $F=100$ kV/cm, $V=40$ R*, $L=1,5$ a*.....	71

BÖLÜM 1

1.GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte gelişen, laboratuvar MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve LPE (Liquid Phase Epitaxy) üretim teknikleriyle ile kuantum kuyuları özelliğinde elektronik devre elemanları üretilmektedir. Her geçen gün teknolojinin paralelinde gelişen tekniklerle nano boyutlarda farklı ve uygun yarı iletken katmanlarının bir araya gelmesiyle kuantum kuyuları oluşturulmaktadır.

A	B	A
Yarı iletkeni	Yarı iletkeni	Yarı iletkeni

Çağımızdaki teknolojiyle üretilen elektronik devreler ve elemanlarının fiziği günümüzde fizik ve elektronik alanlarında büyük önem taşımaktadır. Bu gelişmelerle düşük boyutlu yapılar olarak tanımlanan kuantum kuyusu, kuantum teli ve kuantum noktaları üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

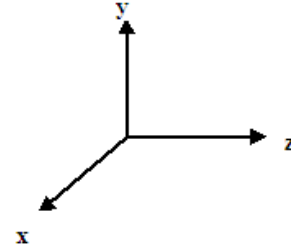
Bu çalışmada düzgün elektrik alan altındaki sonlu ve sonsuz kuantum kuyularına hapsedilmiş bir elektron incelendi. Sonlu ve sonsuz kuantum kuyularında, düzgün elektrik alan, donör yabancı atom, donör yabancı atom ve düzgün elektrik alanda incelenmiştir. Etkin kütle yaklaşımıyla varyasyonel metot kullanılarak hesaplanan bağlanma enerjisinin, yabancı atomun konumuna, elektrik alan şiddetine ve kuantum

kuyusunun genişliğine göre değişimleri incelenmiştir. Ayrıca bu durumlardaki durum yoğunluğu da incelenmiştir.

Bu çalışmadaki nümerik hesaplarda Fortran programlama diliyle kendi yazdığımız programlar kullanılmıştır.

1.1 DÜŞÜK BOYUTLU YAPILARIN OLUŞTURULMASI

A Yarı iletkeni	B Yarı iletkeni	A Yarı iletkeni
--------------------	--------------------	--------------------



Şekil 1.1.1: Düşük boyutlu yapıların oluşumu[23]

Kuantum kuyusunda serbest elektron hareketi tek yönde sınırlandırılmıştır. Örneğin z doğrultusunda potansiyel duvar engeli olsun. Bu durumda elektron z doğrultusunda sınırlı koşullarda hareket eder, x ve y doğrultusunda ise serbesttir.

Kuantum telinde serbest elektronun hareketi iki yönde sınırlandırılmıştır. Diğer yönde elektron serbesttir bu demektir ki elektron iki doğrultuda da potansiyel engelle karşılaşır.

Kuantum noktasında ise serbest elektronun hareketi tüm doğrultularda sınırlıdır. Çünkü her yönde karşılaşacağı potansiyel engeller vardır.

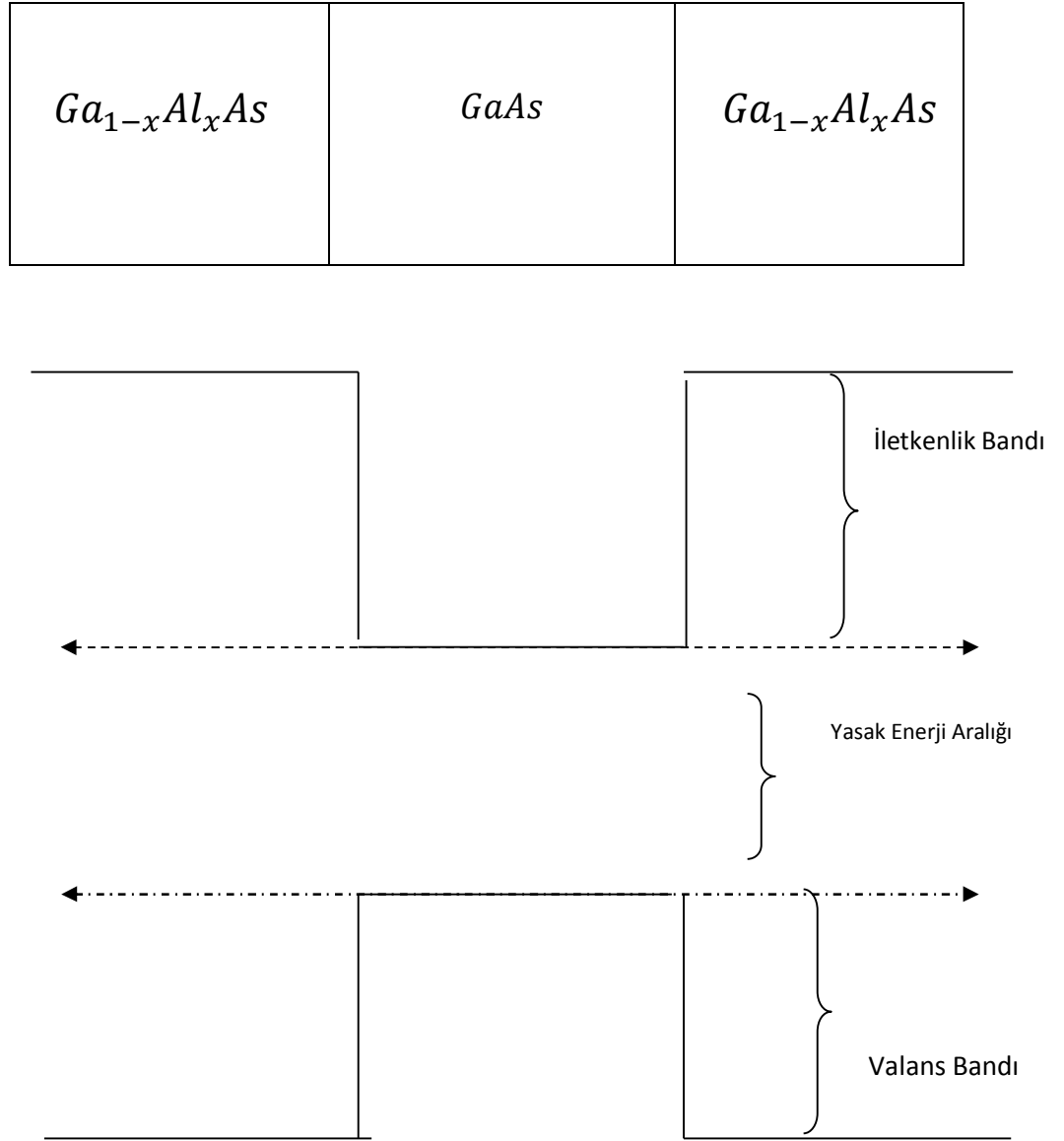
Bu çalışmada konuma göre simetrik, z doğrultusuna yerleştirilmiş sonlu ve sonsuz potansiyel duvarlardan oluşan sabit, düzgün elektrik alan ve yabancı atom varlığında kuantum kuyusu içine hapsedilmiş donör elektronun hareketi incelenecektir.

1.2 KUANTUM KUYULARI

Kuantum kuyuları yüksek iletkenlik bant enerjisi olan iki yarı iletken tabaka arasına yerleştirilmiş çok ince düz bir yarı iletkenlerden oluşur, iki malzemenin iletkenlik

bandı enerjilerinin farkı, elektronları ince bir tabakada kısıtlar. Elektronlar kuyuda dikey yönde hareket etmek için serbest değildir fakat yalnız yanlamasına hareket edebilirler.

Genel olarak kuantum kuyuları oluşturmak için kullanılan malzeme $GaAs$ 'tır ve engel olarak kullanılan da $Ga_{1-x}Al_xAs$ 'dır. Buradaki 'x' mol kesri olarak adlandırılır ve malzemede bulunan alüminyum miktarını yani potansiyel duvar belirler.



Şekil 1.2.1: Sonlu kuantum kuyusunun band yapısı [23]

$0 < x < 1$ için Sonlu potansiyel kuyusu elde edilir.

$x = 1$ için Sonsuz potansiyel kuyusu elde edilir.

Al konsantrasyonu her iki $Ga_{1-x}Al_xAs$ yarı iletkeninde aynı ise simetrik kuantum kuyusu, farklı ise antisimetrik kuantum kuyusu oluşur. Biz bu çalışmada simetrik kuantum kuyusunu inceledik

1.3 DÜŞÜKBOYUTLU YAPILARDA HAPSEDİLEN BİR PARÇACIĞIN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada düşük boyutlu yapılardaki bir parçacığı incelerken Zamandan Bağımsız Schrödinger Denklemine çözdük. Schrödinger denklem çözümü sistemi tanımamız için gereken bilgiyi veren dalga fonksiyonları ve parçacığın sahip olduğu enerji seviyeleri bulunur.

Schrödinger denklemi bir kuantum sistemi hakkında bilgileri veren dalga fonksiyonu adında bir fonksiyondur. Dalga fonksiyonunun uzaya ve zamana bağlı değişimini gösteren denklemi ilk bulan Avusturyalı Fizikçi Erwin Schrödinger' dir.

Zamandan bağımsız Schrödinger denklemi ,

$$H \psi = E \psi \quad (1.3.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada H, zamandan bağımsız Hamiltonyeni temsil eder. Hamiltonyen operatörü;

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(\vec{r}) \quad (1.3.2)$$

zamandan bağımsızdır. Zamandan bağımsız Schrödinger denklemi daha açık olarak;

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) \psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}) \quad (1.3.3)$$

olur.Burada;

$\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$ j.s , indirgenmiş Planck sabiti,

m ; parçacığın kütlesi,

$\psi(\vec{r})$; parçacığa eşlik eden dalga fonksiyonu,

E ; parçacığın beklenen toplam enerjisi

$V(\vec{r})$; parçacığın potansiyel enerjisi

dır.

- V 'nin sıfır olması serbest parçacık durumu ortaya çıkar. Sıfırdan farklı durumlarda parçacığın enerjisinin, parçacığın gördüğü potansiyel enerjiden büyük veya küçük olması koşullarına göre değişen çözümler bulunur.
- $V = V(\vec{r})$ Değişen potansiyellere örnek olarak basit harmonik titreştirici ve Coulomb potansiyelleri örnek verilebilir.

1.4 NÜMERİK HESAPLARDA BİRİM SEÇİMİ

Hidrojen atomunda kararlı elektron yörüngelerinin yarıçapları

$$r_n = \frac{n\hbar^2\epsilon_0}{\pi m_0} \quad n=1,2,3,\dots \quad (1.4.1)$$

şeklinindedir. Burada m_0 serbest elektronun kütlesidir.

En iç yörüngenin yarıçapına, Bohr yarıçapı denir ve a sembolüyle gösterilir.

$$a = r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{m} = 0,53 \text{Å}$$

bulunur. ,

Burada malzeme içinde olduğumuzdan dolayı etkin kütle yaklaşımını kullanıyoruz. Elektronun kütlesi etkin kütle, m^* ve Bohr yarıçapı a^* da etkin Bohr yarıçapı olur. Schrödinger denkleminin nümerik çözümlerinde uzunluk birimi olarak etkin Bohr yarıçapı ve enerjiler Rydberg cinsinden yazılırsa,

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} = 1$$

olur ve Hamiltonyen bu durumda;

$$H = -\nabla^2 + V(\vec{r}) \quad (1.4.2)$$

olarak ifade edilir.

$$R^* = \frac{2e^4 m^* \pi^2}{(4\pi\epsilon\epsilon_0)^2 c h^3} \quad (1.4.3)$$

$$a^* = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 \hbar^3}{e^2 m^*} \quad (1.4.4)$$

olarak aldık.

Kuantum kuyusunda,elektronun düzgün elektrik alan altında, $\vec{F} = F\vec{e}_3$, kaynaklanan enerjisi

$$H_{elek} = eFz \quad (1.4.5)$$

dir.

$$\eta = eF \quad (1.4.6)$$

$$\eta = \frac{F(0,01)}{R^*} a^* \quad (1.4.7)$$

a^*, R^* birim sisteminde bu enerji;

$$H_{elek} = \eta z \quad (1.4.8)$$

olur.

Yapılan hesaplarda GaAs için $\epsilon = 13$, $m^* = 0,067m_0$ için $R^* = 5,36 meV$,

$a^* = 103A^0$ olarak aldık.

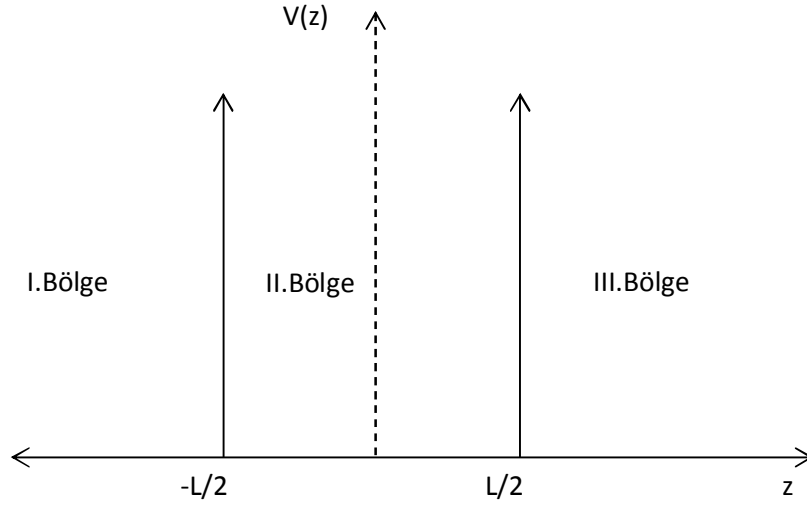
uzunluk \rightarrow etkin Bohr yarıçapı a^*

enerji \rightarrow etkin Rydberg enerjisi R^*

BÖLÜM 2

2.SONSUZ POTANSİYEL ENGELLİ KUANTUM KUYUSUNDA ELEKTRİK ALAN VE YABANCI ATOM

2.1 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusu



Şekil 2.1.1:Sonsuz Kuantum Kuyusu[23]

$$V(z) = \begin{cases} 0, & |z| < L/2 \\ \infty, & |z| \geq L/2 \end{cases} \quad (2.1.1)$$

Yukarıda gösterilen ve tanımlanan sonsuz potansiyel kuyunun içindeki m^* etkin kütleli parçacığın durumunu inceleyelim;

I. ve III. Bölgelerde potansiyel sonsuz olduğundan bu bölgelerde elektron bulunma olasılığı sıfırdır. Bu yüzden I. ve III. Bölgelerde $\psi(z)$ incelemeyiz. II. Bölgede parçacığın durumunu incelememiz yeterli olacaktır 20];

$$H \psi(z) = E \psi(z), \quad (2.1.2)$$

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \quad (2.1.3)$$

Bu bölgelerde Schrödinger denklemi;

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + V(z) \psi(z) = E \psi(z) \quad (2.1.4)$$

II. Bölgede sonsuz potansiyel kuyuda $V(z) = 0$ için Schrödinger denklemi,

$$-\frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} = \frac{2m^* E}{\hbar^2} \psi(z) \quad (2.1.5)$$

şeklinde olur ve buradaki m^* etkin küttedir. $k_z = \sqrt{\frac{2m^* E}{\hbar^2}}$ olmak üzere dalga fonksiyonu da aşağıdaki gibi olur:

$$\psi(z) = A e^{ik_z z} + B e^{-ik_z z}, \quad (2.1.6)$$

veya

$$\psi(z) = A \cos k_z z + B \sin k_z z. \quad (2.1.7)$$

Sınır koşulları:

$$1) \psi(z = L/2) = 0$$

$$2) \psi(z = -L/2) = 0$$

Yukarıdaki sınır koşullarını uygularsak;

$$\psi\left(z = \frac{L}{2}\right) = A \cos \frac{k_z L}{2} + B \sin \frac{k_z L}{2} = 0 \quad (2.1.8)$$

$$\psi\left(z = -\frac{L}{2}\right) = A \cos \frac{k_z L}{2} - B \sin \frac{k_z L}{2} = 0 \quad (2.1.9)$$

Bu denklemleri çözmek için determinantına bakarsak

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{k_z L}{2} & \sin \frac{k_z L}{2} \\ \cos \frac{k_z L}{2} & -\sin \frac{k_z L}{2} \end{bmatrix} = 0$$

Buradan $k_z = \frac{n\pi}{L} \rightarrow n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$$k_z^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} = \frac{2m^*}{\hbar^2} E_n$$

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m^* L^2} \quad (2.1.10)$$

elde edilir.

Yukarıdaki $\psi(z)$ denklemini göz önüne alırsak tek ve çift çözüm olarak iki çözüm elde ederiz.

n çift sayı iken;

$$\psi(z)_n^- = B \sin \frac{n\pi}{L} z \quad (2.1.11)$$

n tek sayı iken;

$$\psi(z)_n^+ = A \cos \frac{n\pi}{L} z \quad (2.1.12)$$

Yukarıdaki A ve B normalizasyon sabitleridir..

Normalizasyon sabiti için;

$$\int_{-L/2}^{+L/2} \psi(z)^* \psi(z) dz = 1 \quad (2.1.13)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \left(A \cos \frac{n\pi}{L} z \right)^* \left(A \cos \frac{n\pi}{L} z \right) dz = 1$$

Buradan

$A = \sqrt{\frac{2}{L}}$ olarak buluruz.

Buna göre dalga fonksiyonları;

$$\psi(z)_n^+ = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) \quad (2.1.14)$$

$$\psi(z)_n^- = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L} z\right) \quad (2.1.15)$$

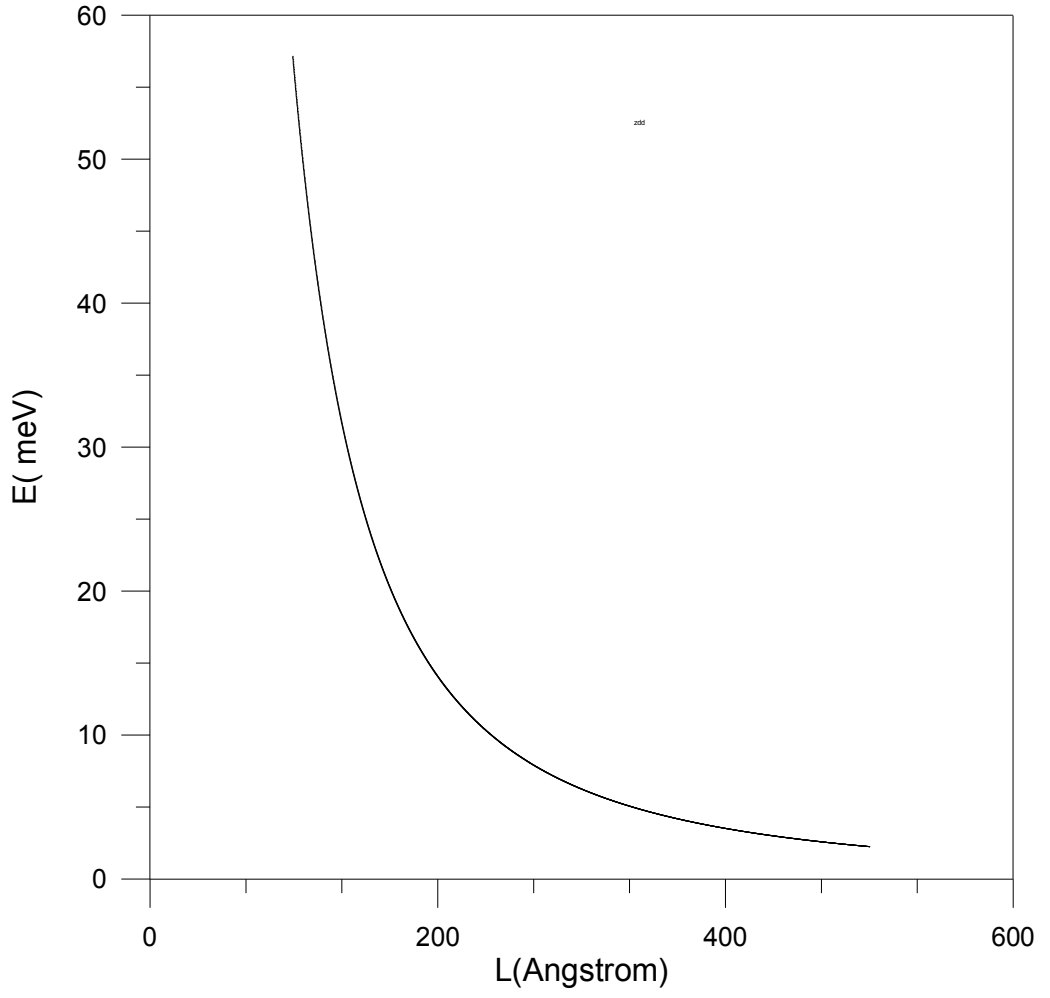
Subband enerjisinin beklenen değeri;

$$E_n = \left(\frac{\langle \psi(z)_n | H | \psi(z)_n \rangle}{\langle \psi(z)_n | \psi(z)_n \rangle} \right) = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m^* L^2} \quad (2.1.16)$$

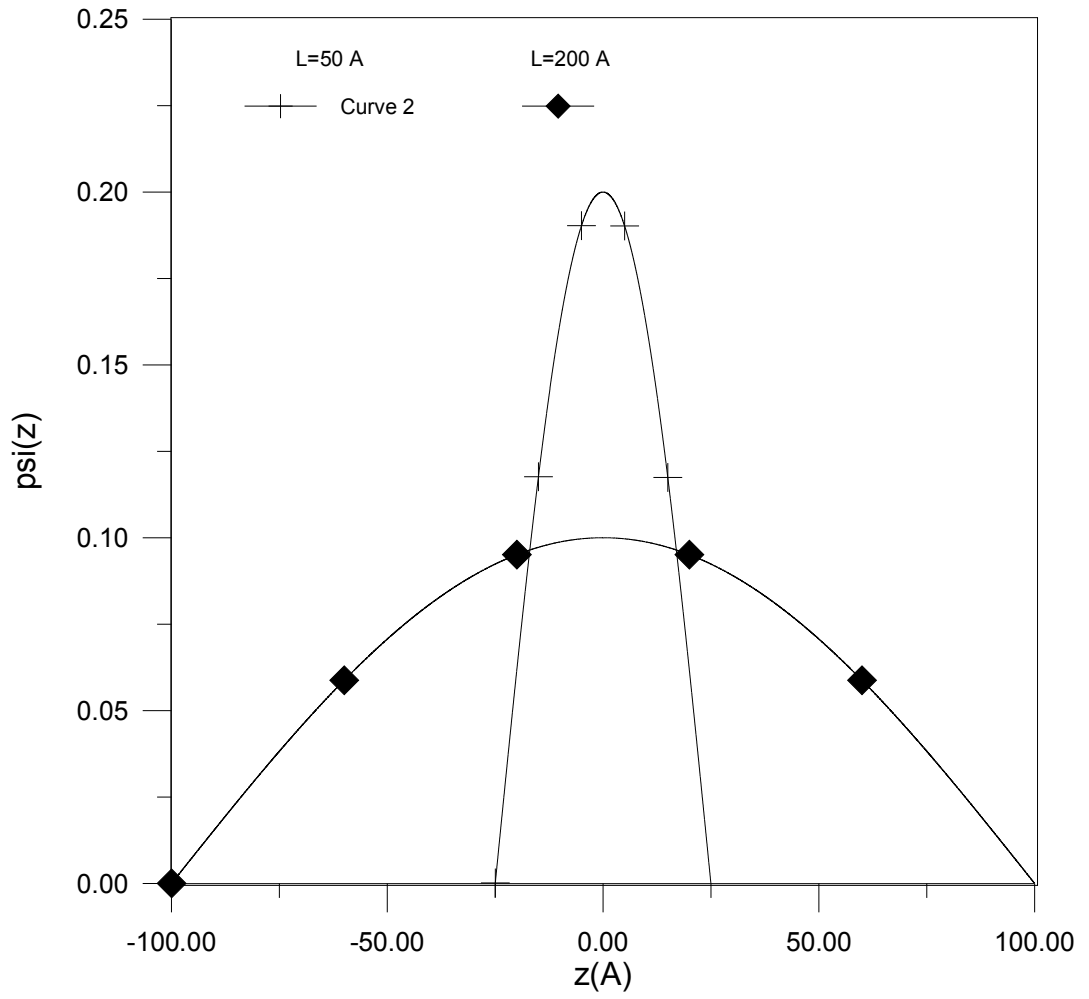
olur.

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda taban durum subband enerjisi; Denklem (2.1.16) 'den $n=1$ için hesaplandı. Taban durum subband enerjisinin kuyu genişliğine bağlı olarak değişimi Grafik 2.1.1 de verildi. Grafik 2.1.1 de görüldüğü gibi taban durum subband enerjisi kuantum kuyu genişliği arttıkça önce hızlı , daha sonra yavaş olarak azalmaktadır. Grafik 2.1.2 de $L=50 \text{ a}^*$ ve $L=200 \text{ a}^*$ için elektronun taban durum dalga fonksiyonlarının kuyu içindeki elektronun konumuna göre değişimi verilmiştir.

Bu sonuçlar literatürle uyumludur.[2,12,19]



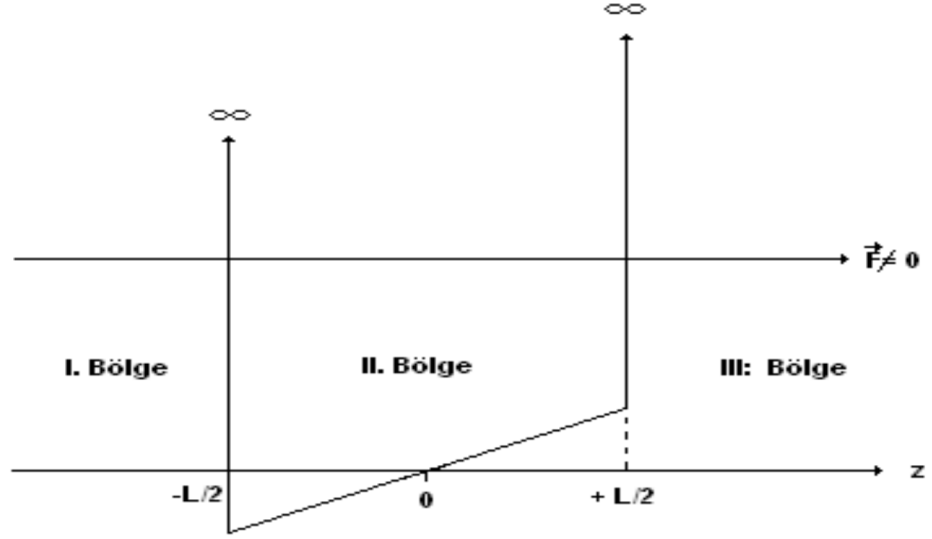
Grafik 2.1.1: Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum enerjisinin kuyu genişliği L (Angstrom) ile değişimi



Grafik 2.1.2: Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban dalga fonksiyonları, $L=50 \text{ \AA}$, $L=200 \text{ \AA}$

2.2 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alan

Bir sonsuz potansiyel kuantum kuyusunda, elektrik alan etkisinde inceleyelim. Elektrik alan z doğrultusunda ve düzgün olsun [2,3,4,5,9,12,18];



Şekil 2.2.1: Elektrik alan altında sonsuz kuantum kuyusu[22]

Yükü q olan bir parçacık elektrik alanın \vec{F} olduğu bir yerde bulunursa parçacığa etkiyen elektrik kuvveti \vec{F}_k aşağıdaki gibi olur;

$$\vec{F}_k = q \vec{F} \quad (2.2.1)$$

ve iş;

$$W = - \int_0^z qF dz = -qFz \quad (2.2.2)$$

olur.

Parçacık $-e$ yüklü elektron ve bu elektron elektrik alan doğrultusunda z kadar yer değiştirirse;

$$W = -(-e)Fz = eFz \quad (2.2.3)$$

olur.

Bu durumda elektron için Schrödinger denklemi [2,12,19];

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + eFz\psi(z) = E \psi(z) \quad (2.2.4)$$

veya

$$\frac{d^2\psi(z)}{dz^2} - \frac{2m^*e}{\hbar^2} Fz\psi(z) = -\frac{2m^*E}{\hbar^2} \psi(z) \quad (2.2.5)$$

Buna göre;

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \quad (2.2.6)$$

$$H_{elek} = eFz \quad (2.2.7)$$

$$H_2 = H + H_{elek} \quad (2.2.8)$$

$$H_2 = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + eFz \quad (2.2.9)$$

olur.

Elektrik alan altındaki dalga fonksiyonumuzu varyasyonel yöntemle dayanarak aşağıdaki gibi seçeriz;

$$\psi(z)_{elek} = A \cos\left(\frac{n\pi}{L}z\right)e^{-\beta z} \quad (2.2.10)$$

Elektronun beklenen enerjisi, E_{elek} ,

$$E_{elek} = \left(\frac{\langle \psi(z)_{elek} | H_2 | \psi(z)_{elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{elek} | \psi(z)_{elek} \rangle} \right) \quad (2.2.11)$$

olur.

Yapılan nümerik hesaplarda R^* ve a^* cinsinden yapılan işlemlerde aşağıdaki bilgileri esas aldık;

$$\eta = eF \quad (2.2.12)$$

a^*, R^* birim sisteminde

$$\eta = \frac{F(0,01)}{R^*} a^* \quad (2.2.13)$$

olur. Schrödinger denklemi de;

$$-\frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + \eta z\psi(z) = E\psi(z) \quad (2.2.14)$$

halini alır.

$$\psi(z)_{elek} = A \cos\left(\frac{n\pi}{L}z\right)e^{-\beta z} \quad (2.2.15)$$

$$E_{elek} = \left(\frac{\langle \psi(z)_{elek} | H_2 | \psi(z)_{elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{elek} | \psi(z)_{elek} \rangle} \right) \quad (2.2.16)$$

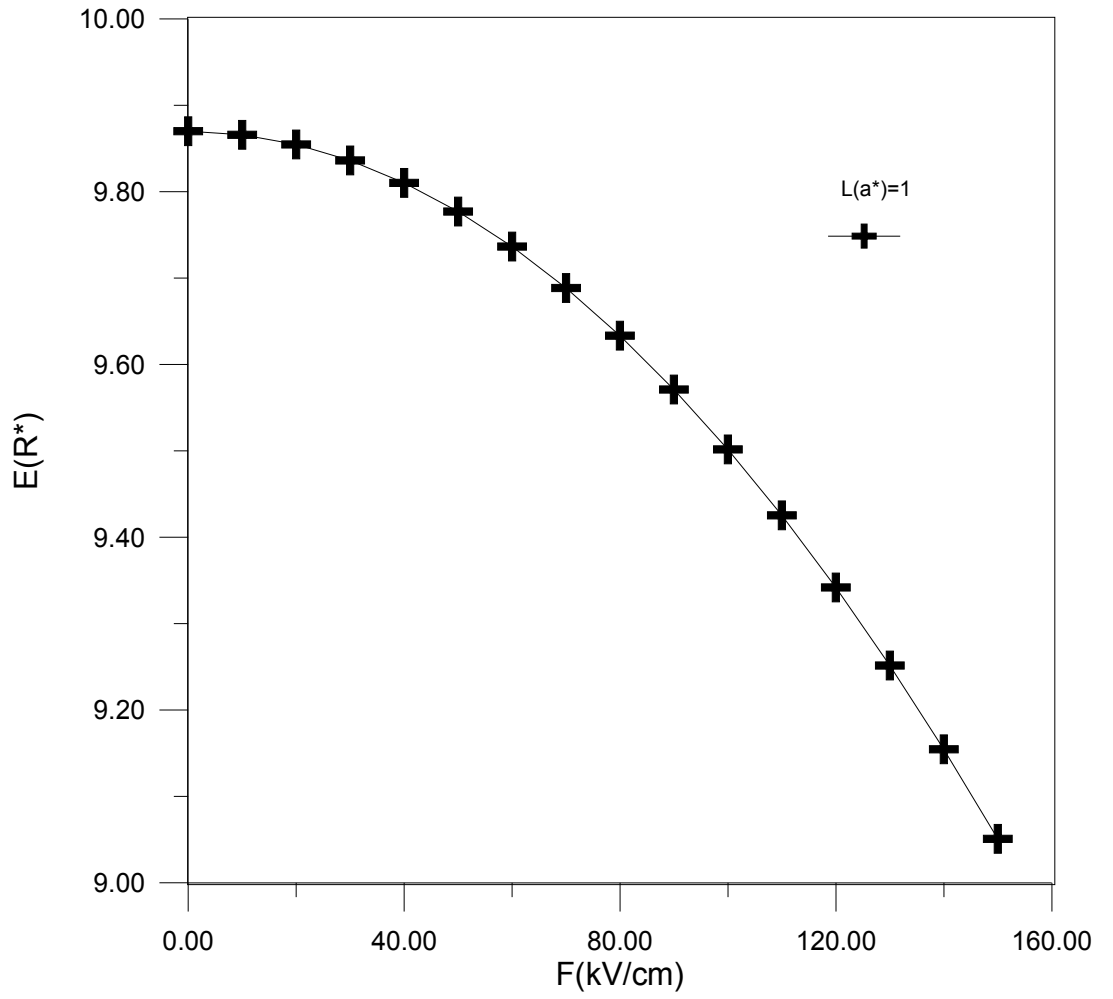
Burada;

$$H_2 = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z \quad (2.2.17)$$

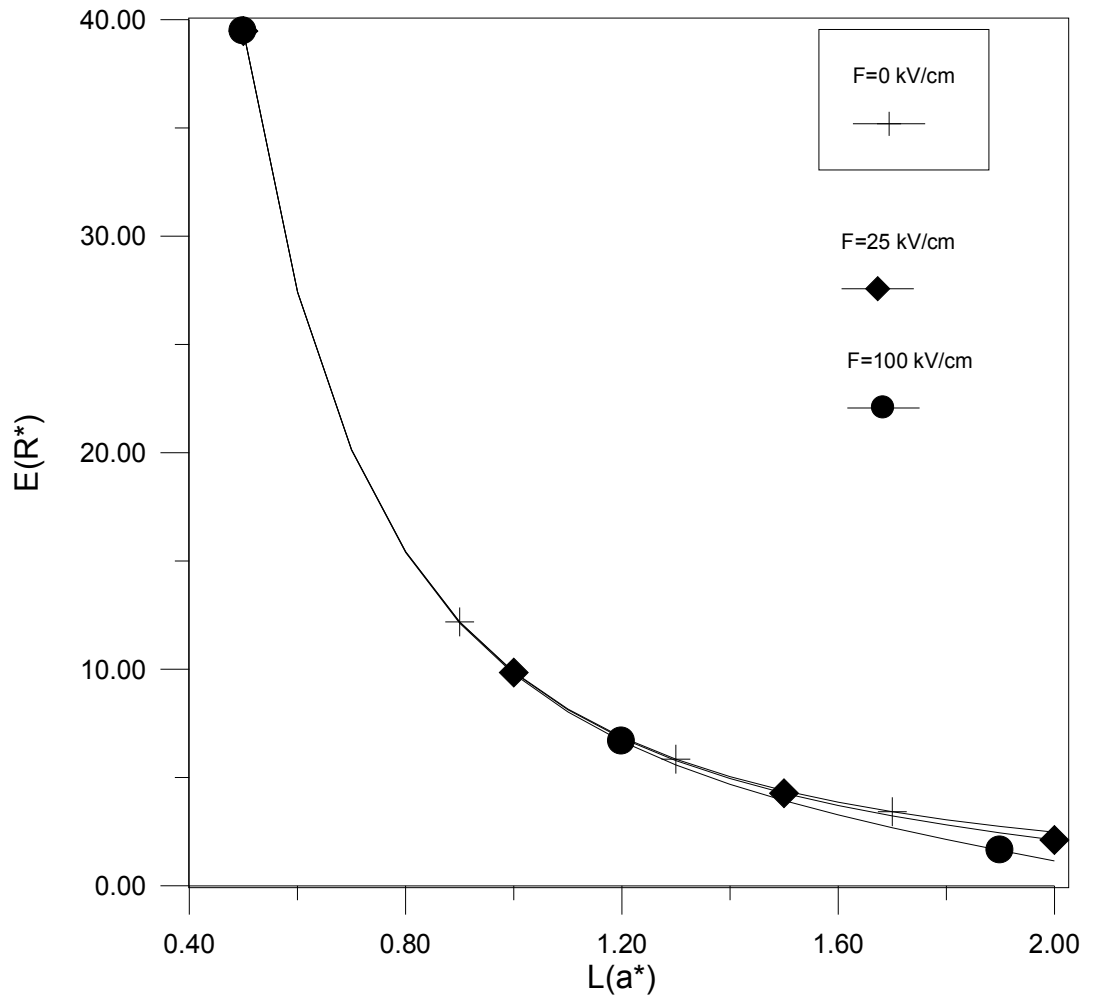
dır. Benzer işlemler tek çözümler içinde geçerlidir

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda taban durum subband enerjisi; Denklem (2.2.16) 'den hesaplandı. Taban durum subband enerjisinin elektrik alan şiddetine $F(\text{kV/cm})$ bağlı olarak değişimi Grafik 2.2.1 de verildi. Grafik 2.2.1 de görüldüğü gibi taban durum subband enerjisi, elektrik alan şiddeti $F(\text{kV/cm})$ arttıkça azalıyor. Grafik 2.2.2 'de üç farklı elektrik alan için taban durum subband enerjisi kuantum kuyu genişliğine göre değişimi verildi. Grafik 2.2.2 de görüldüğü gibi kuantum kuyu genişliği ve elektrik alan şiddeti arttıkça taban durum subband enerjisinin azalıyor.

Bu sonuçlar literatürle uyumludur.[2,12,19]

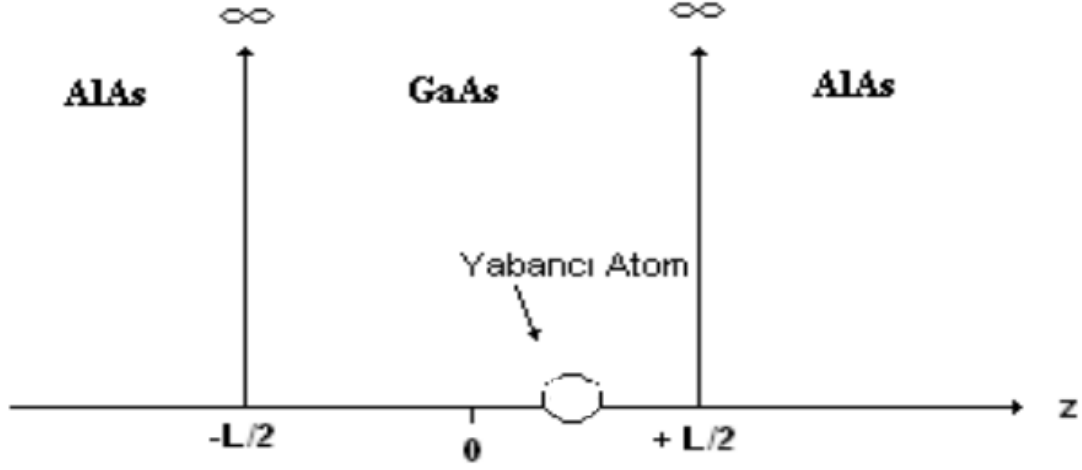


Grafik 2.2.1: Simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum subband enerjisinin elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) ile değişimi



Grafik 2.2.2: Konuma göre simetrik sonsuz potansiyel kuyusuna hapsedilen elektronun taban durum subband enerjisinin üç farklı elektrik alan şiddeti F (kV/cm) altında kuantum kuyusu genişliği L (a*) ile değişimi

2.3 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom



Şekil 2.3.1: Yabancı Atomlu Sonsuz Kuantum Kuyusu [22]

Sonsuz kuantum kuyusunda donör yabancı atomu incelersek Hamilton denkleminiz aşağıdaki halini alır.[1,2,9,10,17];

$$H_3 = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 - \frac{e^2}{k\epsilon r} \quad (2.3.1)$$
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

İşlem kolaylığı olsun diye silindirik koordinatları seçtik.

$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2$$

Donorlu kuantum kuyusunda, elektron -yabancı atom \vec{r} ile gösterilirse;

$$r = \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}$$

olur burada zi yabancı atom konumudur. Bu durumda sistemin Hamiltonyeni, H_3 ;

$$H_3 = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{e^2}{k\epsilon \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \quad (2.3.2)$$

olur, Hamilton ve Schrödinger R^* , a^* birim sisteminde;

$$H_{yab} = -\frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}}$$

$$H_3 = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \quad (2.3.3)$$

ve

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi(z)_{yab} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi(z)_{yab} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \psi(z)_{yab} = E \psi(z)_{yab} \quad (2.3.4)$$

olur. [1,2,3,4,5,9];

Denklemlerin çözümü için, varyasyonel yöntemeye dayanarak $\psi(z)_{yab}$;

$$\psi(\rho, z)_{yab} = N \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \quad (2.3.5)$$

olarak seçilir ve enerjisinin beklenen değeri

$$E_{yab} = \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | H_3 | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle}{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle} \right) \quad (2.3.6)$$

olur.

Bağlanma enerjisi sistemin yabancı atom yokluğundaki enerjisinden (subband enerjisi) yabancı atomun varlığındaki enerjiyi çıkarmakla tanımlanır, başka bir deyimle

$$E_b = E_0 - E_{yab} \quad (2.3.7)$$

ve seçilen sistemimiz için bağlanma enerjisi;

$$E_b = \left(\frac{\langle \psi(z) | H | \psi(z) \rangle}{\langle \psi(z) | \psi(z) \rangle} \right) - \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | H_3 | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle}{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle} \right) \quad (2.3.8)$$

olur. Taban durum subband enerjisi için,

$$H = -\frac{d^2}{dz^2}$$

$$\psi(z)_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right)$$

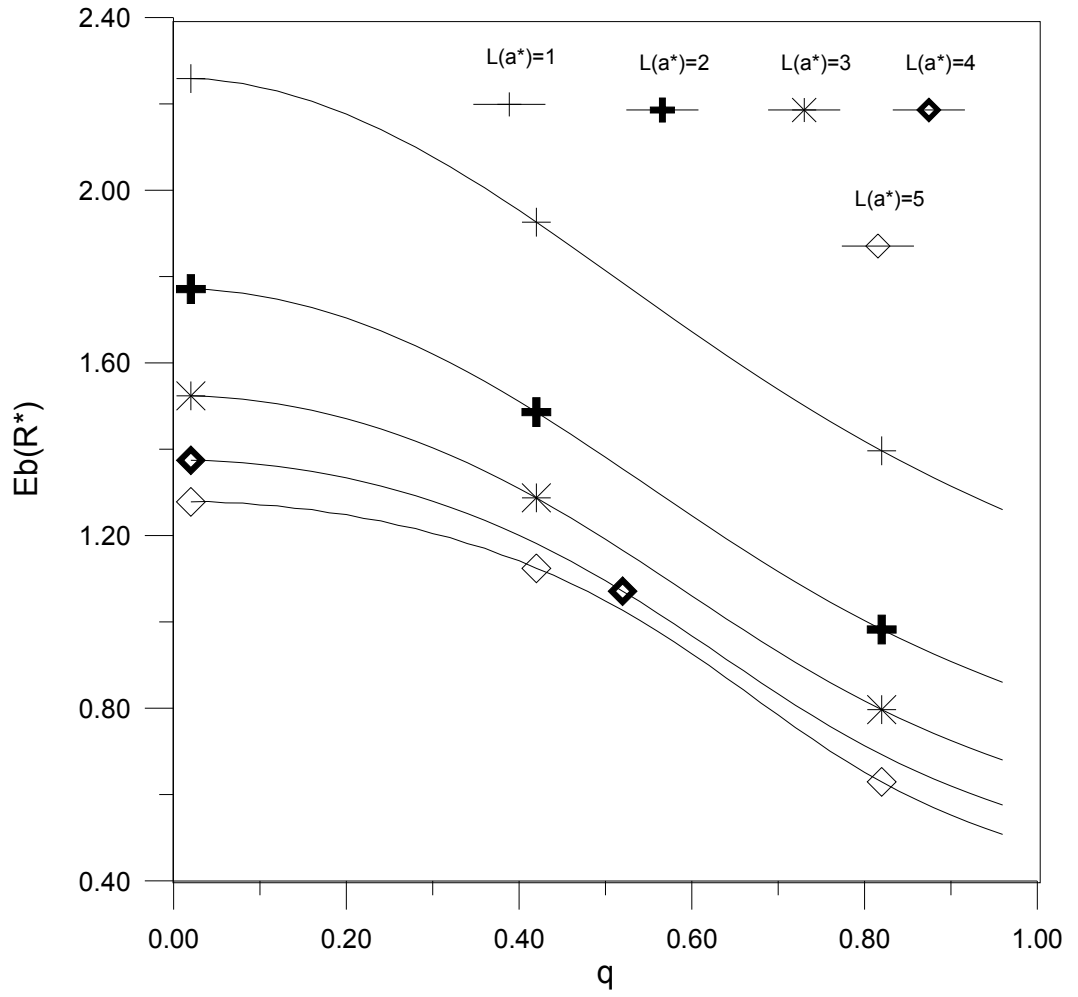
dır.

Yapılan nümerik hesaplarda kolaylık açısından yabancı atomun konumu için q değişkenini seçtik.

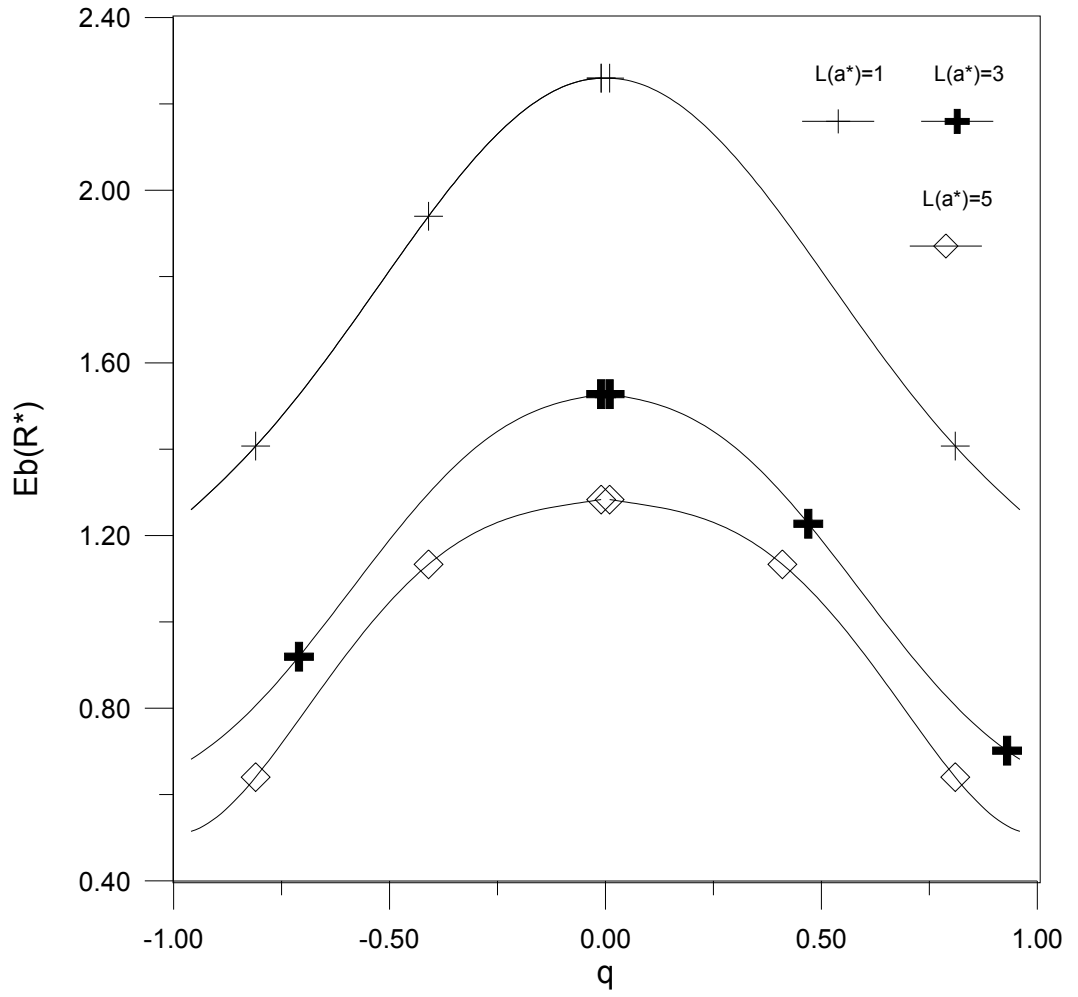
$$q = zi/(L/2) \quad ; \quad q \in [-1,1]$$

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi; Denklem (2.3.8) 'den hesaplandı. Donör bağlanma enerjisi yabancı atomun konumuna göre değişimi Grafik 2.3.1 ve Grafik 2.3.2 verildi. Grafik 2.3.1 ve Grafik 2.3.2 de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisinin, yabancı atom kuyu merkezine yaklaştıkça arttığını görmekteyiz. Grafik 2.3.3 de donör bağlanma enerjisinin kuyu genişliğine göre değişimi verildi ve kuantum kuyusunun genişliği artıkça donör bağlanma enerjisinin azaldığını görmekteyiz.

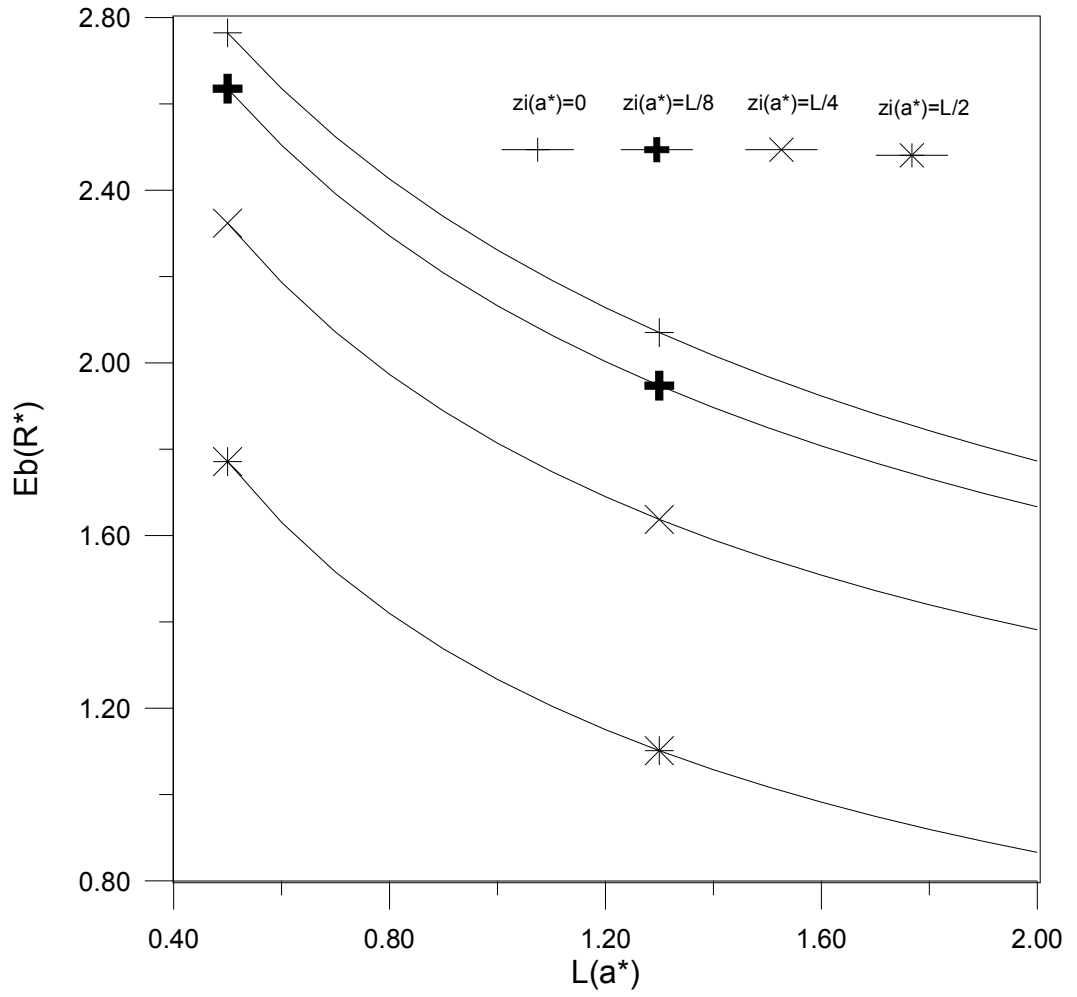
Bu sonuçlar literatürle uyumludur.[1,2,9,10,17]



Grafik 2.3.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda beş farklı kuantum kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ yabancı atomun konumuna bağlı olarak değişimi

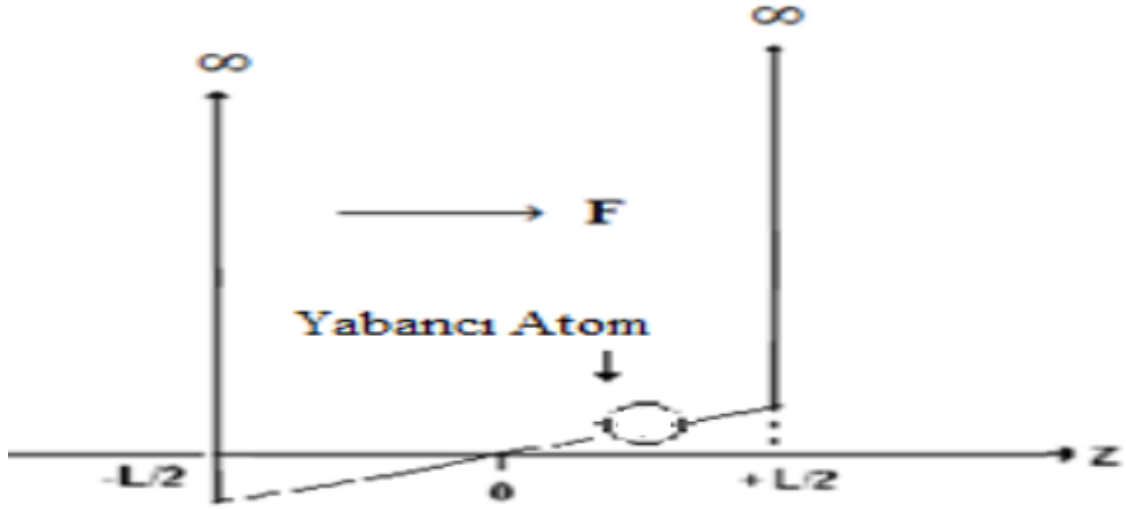


Grafik 2.3.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda üç farklı kuantum kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ yabancı atomun konumuna bağlı olarak değişimi



Grafik 2.3.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda dört farklı yabancı atom konumu için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ 'nin kuantum kuyusu genişliğine göre ($L(a^*)$) göre değişimi

2.4 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom ve Düzgün Elektrik Alan



Şekil 2.4.1: Sonsuz Kuantum Kuyusunda Yabancı Atom ve Elektrik Alan Etkisi[22]

Sonsuz kuantum kuyusunda yabancı atom ve elektrik alan etkisini incelersek; elektrik alandan aşağıdaki gibi bir katkı gelir [2,3,4,5,10,12,14,15,18];

$$H_{elek} = eFz$$

$$\eta = eF$$

R^* , a^* biriminde;

$$\eta = \frac{F(0,01)}{R^*} a^*$$

$$H_{elek} = \eta z \quad (2.4.1)$$

Silindirik koordinatlarda ve a^* , R^* , birim sisteminde elektronun donora göre potansiyel enerjisi;

$$H_{yab} = -\frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} \quad (2.4.2)$$

olur. Sistemin Hamiltonyeni [2,3,4];

$$H_4 = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} + \eta z \quad (2.4.3)$$

ve Schrödinger denklemi de;

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi(z)_{yab,elek} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi(z)_{yab,elek} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} \psi(z)_{yab,elek} + \eta z \psi(z)_{yab,elek} = E \psi(z)_{yab,elek}. \quad (2.4.4)$$

Dalga fonksiyonda varyasyonel yöntemle aşağıdaki gibi seçilir.

$$\psi(z)_{yab,elek} = N \cos\left(\frac{n\pi}{L}\right) z e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} e^{-\beta z}, \quad (2.4.5)$$

burda β ve λ varyasyon parametreleridir. Bu durumda, sistemin enerjisi

$$E_{yab,elek} = \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi(z)_{yab,elek} | H_4 | \psi(z)_{yab,elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{yab,elek} | \psi(z)_{yab,elek} \rangle} \right). \quad (2.4.6)$$

Bağlanma enerjisinin elektrik alana bağlılığı

$$E_b = \min_{\beta} \left(\frac{\langle \psi(z)_{elek} | H_2 | \psi(z)_{elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{elek} | \psi(z)_{elek} \rangle} \right) - \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi(z)_{yab,elek} | H_4 | \psi(z)_{yab,elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{yab,elek} | \psi(z)_{yab,elek} \rangle} \right) \quad (2.4.7)$$

olur ve daha önce Bölüm 2.2 verildiği gibi taban durum subband enerji hesabında;

$$\psi(z)_{elek} = A \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) e^{-\beta z}$$

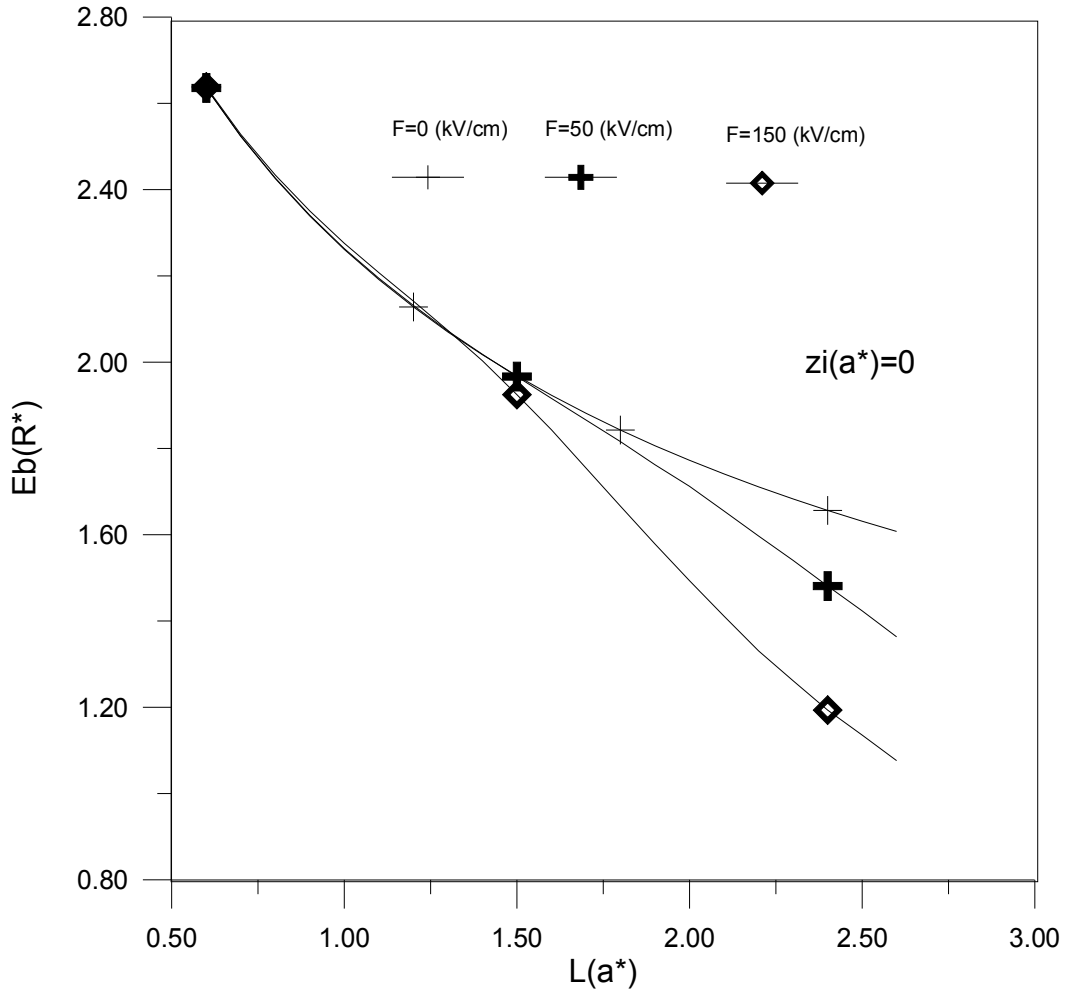
$$H_2 = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z$$

dır.

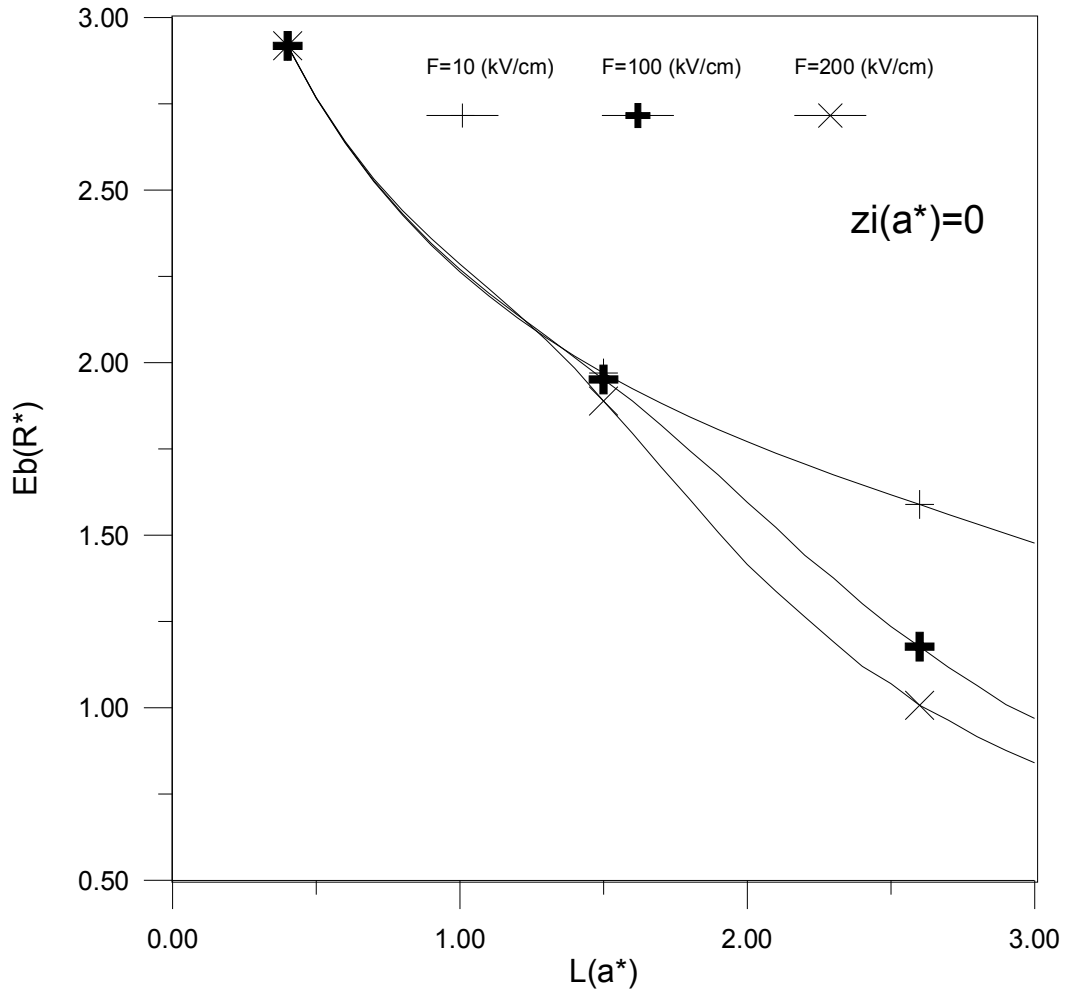
GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi; Denklem (2.4.7) 'den hesaplandı. Donör bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumuna ve elektrik alan şiddetine F(kV/cm) göre değişimleri Grafik 2.4.1, Grafik 2.4.2, Grafik 2.4.3 Grafik 2.4.4 ve Grafik 2.4.5 verildi. Grafik 2.4.1, Grafik 2.4.2, Grafik 2.4.3 Grafik 2.4.4 ve Grafik 2.4.5 de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisinin, yabancı atom kuyu merkezine yaklaştıkça arttığını görmekteyiz. Ayrıca donör bağlanma enerjisinin, kuantum kuyu genişliği arttıkça azaldığını, elektrik alan şiddeti F(kV/cm) arttıkça azaldığını görmekteyiz. Grafik 2.4.6 da donör bağlanma enerjisinin elektrik alan şiddeti F(kV/cm) göre değişimi verildi. Grafik 2.4.6 da donör bağlanma enerjisinin

elektrik alan şiddeti $F(\text{kV/cm})$ artıkça azaldığını ve elektrik alan şiddetinin $F(\text{kV/cm})$ etkisini $L=1,5 a^*$ ve daha geniş kuyularda daha belirgin olarak görüyoruz.

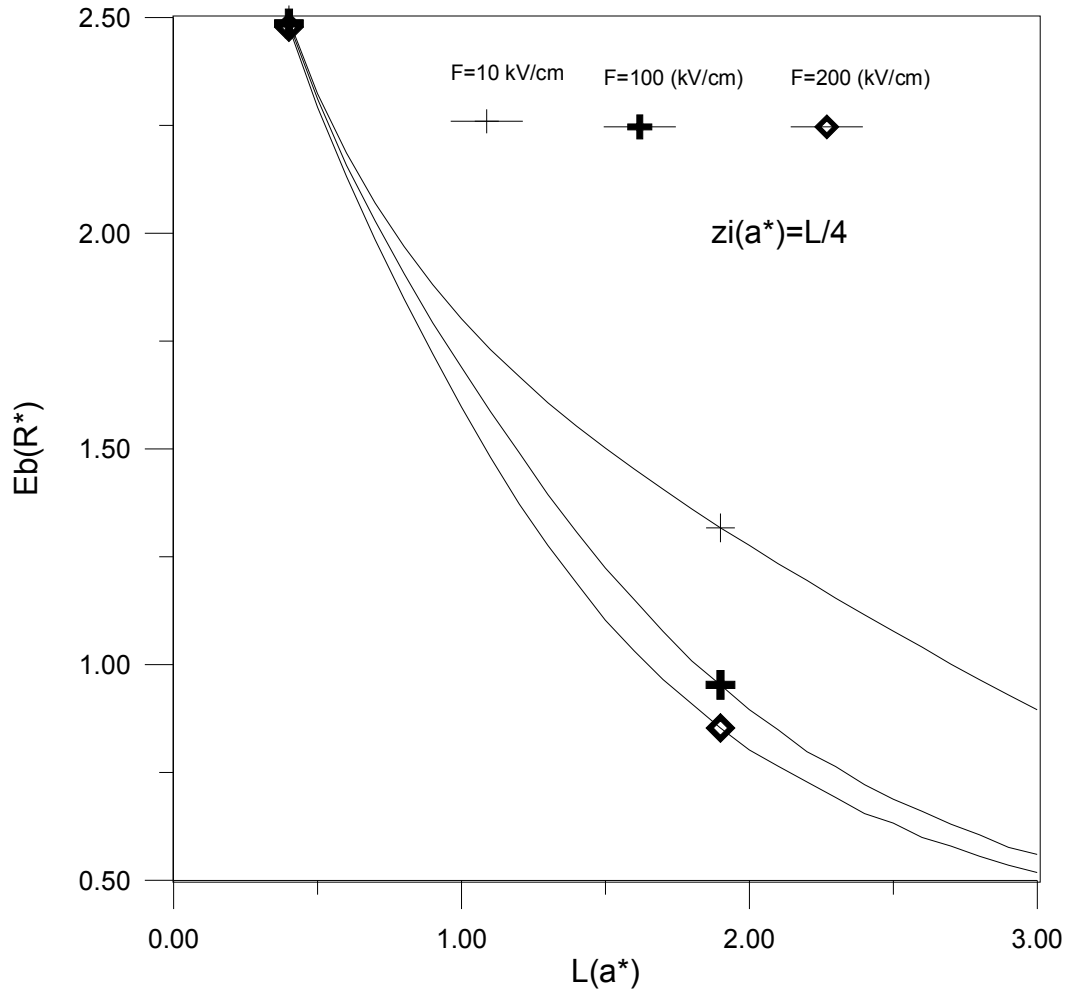
Bu sonuçlar literatürle uyumludur.[2,3,4,5,10,12,14,15,18]



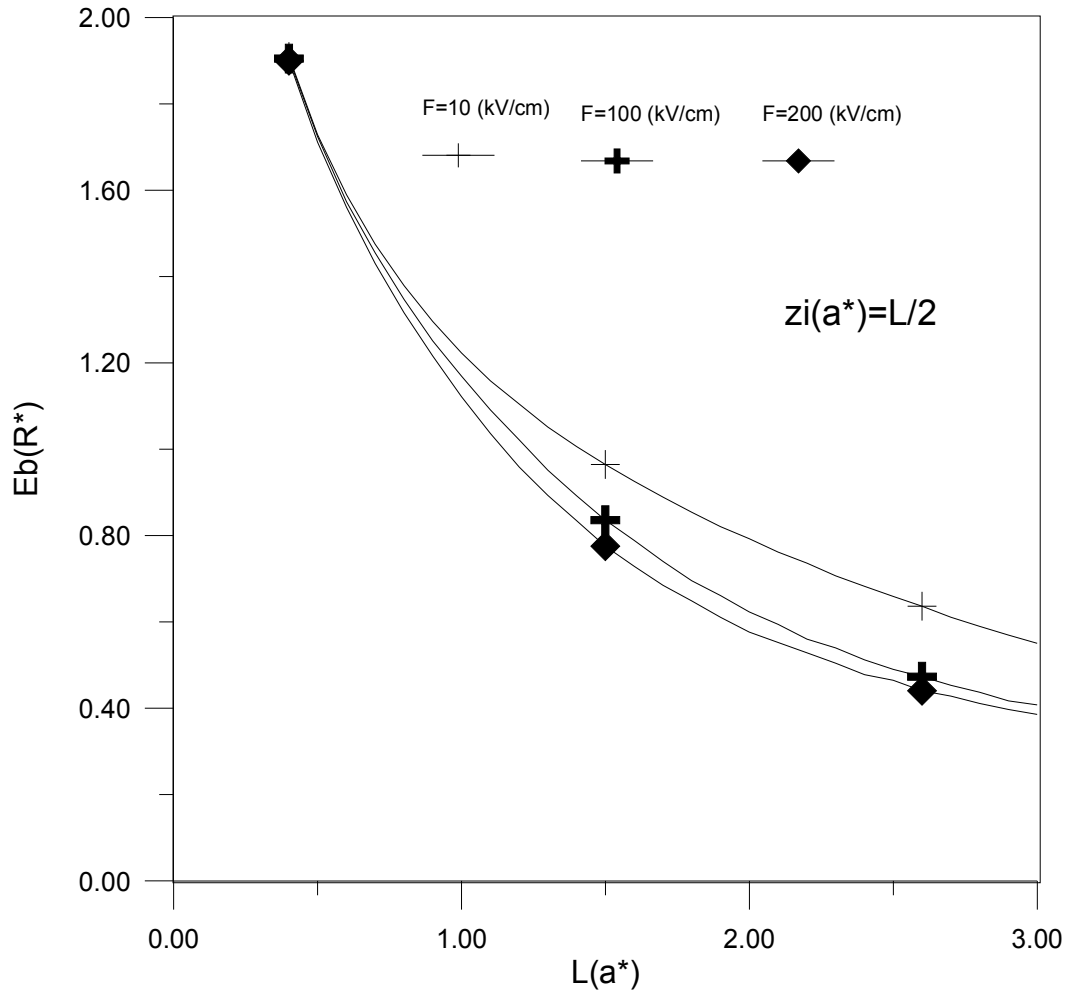
Grafik 2.4.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine ($L(a^*)$) göre değişimi



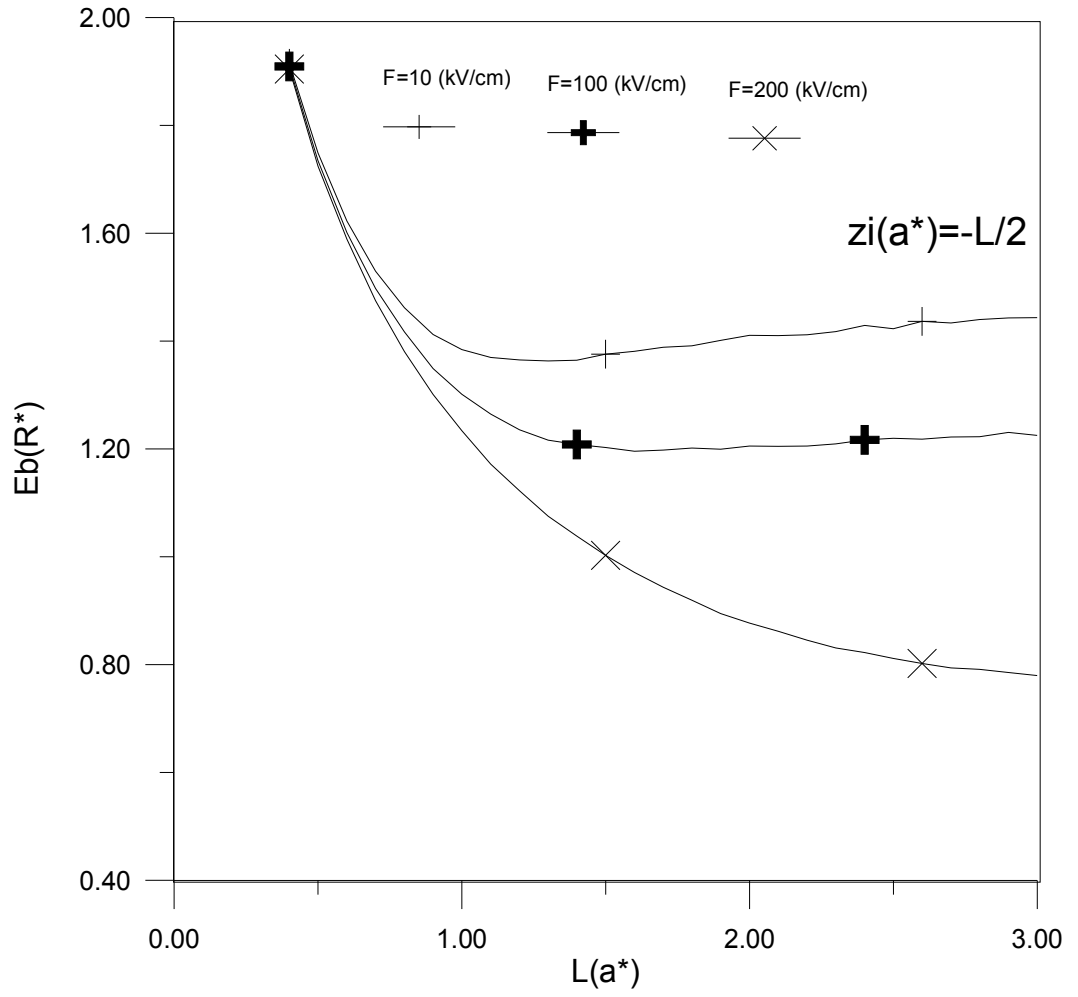
Grafik 2.4.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi $z_i=0$



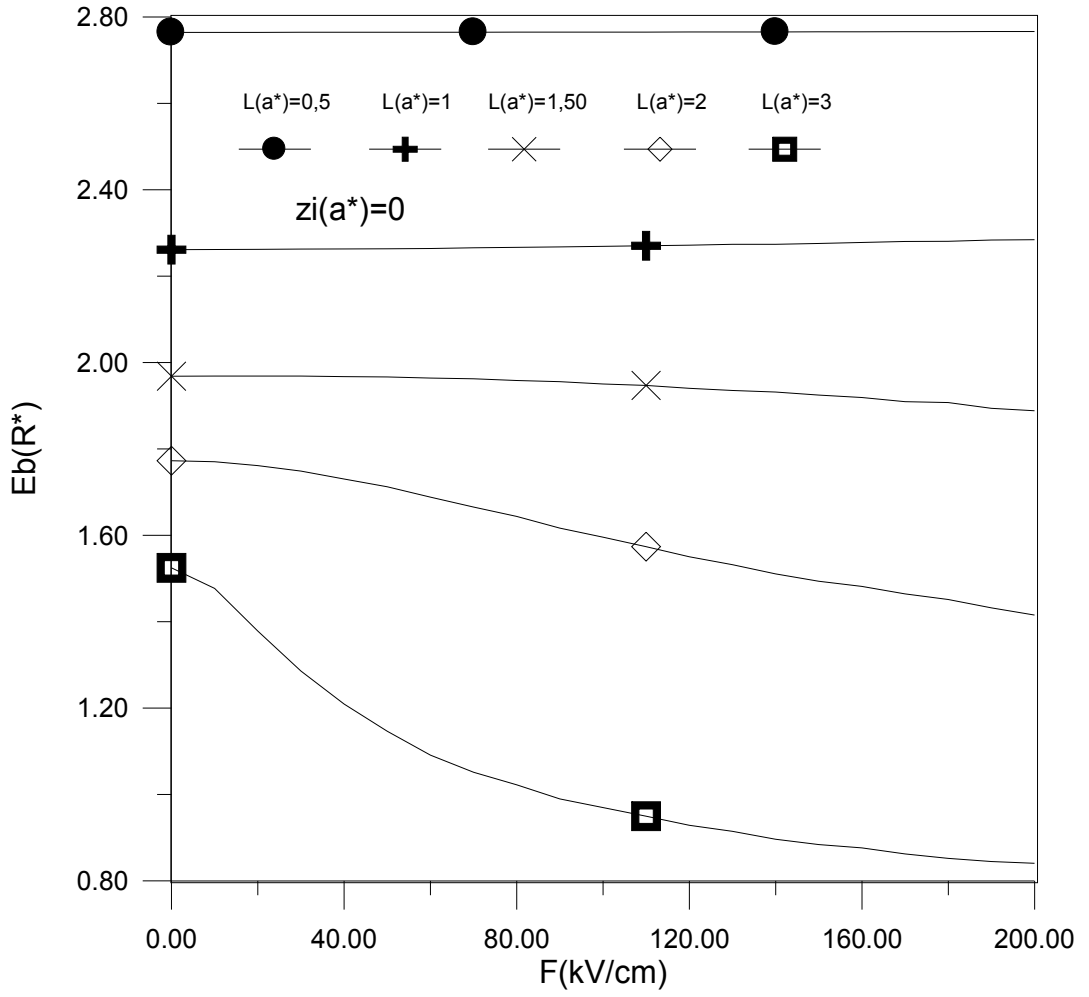
Grafik 2.4.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti F (kV/cm) için donör bağlanma enerjisinin $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i=L/4$



Grafik 2.4.4: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisine $E_b(R^*)$ kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i=L/2$



Grafik 2.4.5: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddeti (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine $L(a^*)$ göre değişimi, $z_i = -L/2$

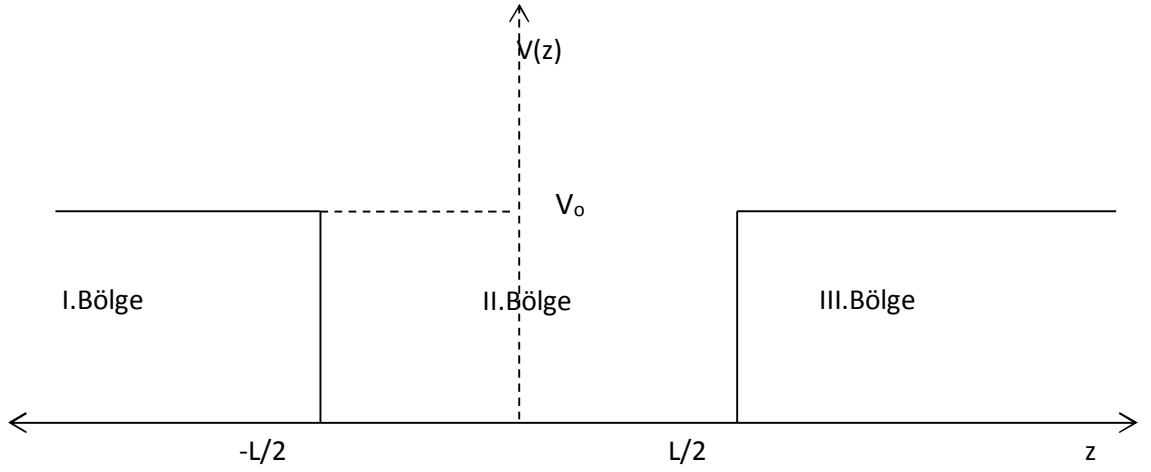


Grafik 2.4.6: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuyu genişlikleri için $L(a^*)$ donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine F (kV/cm) göre değişimi

BÖLÜM 3

3.SONLU POTANSİYEL KUANTUM KUYUSUNDA ELEKTRİK ALAN VE YABANCI ATOM

3.1 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusu



Şekil 3.1.1: Sonlu Kuantum Kuyusu [23]

Şekildeki kuantum kuyusunu inceleyelim;

$$V(z) = \begin{cases} 0, & -L/2 \leq z \leq L/2 \\ V_0, & |z| > L/2 \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Sonlu kuantum kuyusuna hapsedilmiş m^* etkin kütleli parçacığın durumunu inceleyelim [6,20];

II. Bölgede Hamiltonyen;

$$H_{12} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} \quad (3.1.2)$$

olur.

Schrödinger denkleminiz de;

$$H_{12} \psi(z) = E \psi(z) \quad (3.1.3)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} + E \psi(z) = 0 \quad (3.1.4)$$

olur. Konuma göre simetrik, $E < V_0$, ve taban durum için $\psi_2(z)$ dalga fonksiyonu

$E < V_0$ için $\psi_2(z)$;

$$\psi_2(z) = A \cos k_i z \quad (3.1.5)$$

olur. Burada $k_i = \sqrt{\frac{2m^* E}{\hbar^2}}$.

$|z| > L/2$ yani I. Bölge ve III. Bölge de incelersek;

I. Bölge için;

$$H_{11} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V_0 \quad (3.1.6)$$

III. Bölge için;

$$H_{13} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V_0 \quad (3.1.7)$$

I. Bölge için Schrödinger denkleminiz;

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} - (V_0 - E) \psi(z) = 0 \quad (3.1.8)$$

Denklemin çözümü;

$$\psi(z) = B e^{k_0 z} + C e^{-k_0 z} \quad (3.1.9)$$

Burada $z \rightarrow -\infty$ için $\psi(z) \rightarrow \infty$ olur. $C = 0$ alınır, ve

$$\psi_1(z) = B e^{k_0 z} \quad (3.1.10)$$

olur.

III. Bölge için Schrödinger denklemi;

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \psi(z)}{dz^2} - (V_0 - E) \psi(z) = 0 \quad (3.1.11)$$

Denklemin çözümü;

$$\psi(z) = D e^{k_0 z} + B e^{-k_0 z} \quad (3.1.12)$$

Burada $z \rightarrow +\infty$ için $\psi(z) \rightarrow \infty$ dır. $D = 0$ alınır ve

$$\psi_3(z) = B e^{-k_0 z} \quad (3.1.13)$$

olur, burada $k_0 = \sqrt{\frac{2m^*(V_0 - E)}{\hbar^2}}$ olarak alırsınız.

Aşağıdaki sınır ve süreklilik koşullarını uygularsak;

$$\psi_2\left(z = \frac{L}{2}\right) = \psi_3\left(z = \frac{L}{2}\right) \quad (3.1.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \psi_2\left(z = \frac{L}{2}\right) = \frac{\partial}{\partial z} \psi_3\left(z = \frac{L}{2}\right)$$

Şartlarını uygularsak aşağıdaki ifadeleri ederiz.

$$k_i \tan \frac{k_i L}{2} = k_0$$

$$\psi_1(z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases} \quad (3.1.15)$$

A normalizasyon sabiti için;

$$\int_{-\infty}^{-L/2} \psi(z)_1^* \psi(z)_1 dz + \int_{-L/2}^{+L/2} \psi(z)_2^* \psi(z)_2 dz + \int_{+L/2}^{+\infty} \psi(z)_3^* \psi(z)_3 dz = 1 \quad (3.1.16)$$

olur.

Taban durum subband enerjiside L ve V_0 bağlı olarak;

$$E = \left(\frac{\langle \psi_1 | H_{11} | \psi_1 \rangle + \langle \psi_2 | H_{12} | \psi_2 \rangle + \langle \psi_3 | H_{13} | \psi_3 \rangle}{\langle \psi_1 | \psi_1 \rangle + \langle \psi_2 | \psi_2 \rangle + \langle \psi_3 | \psi_3 \rangle} \right). \quad (3.1.17)$$

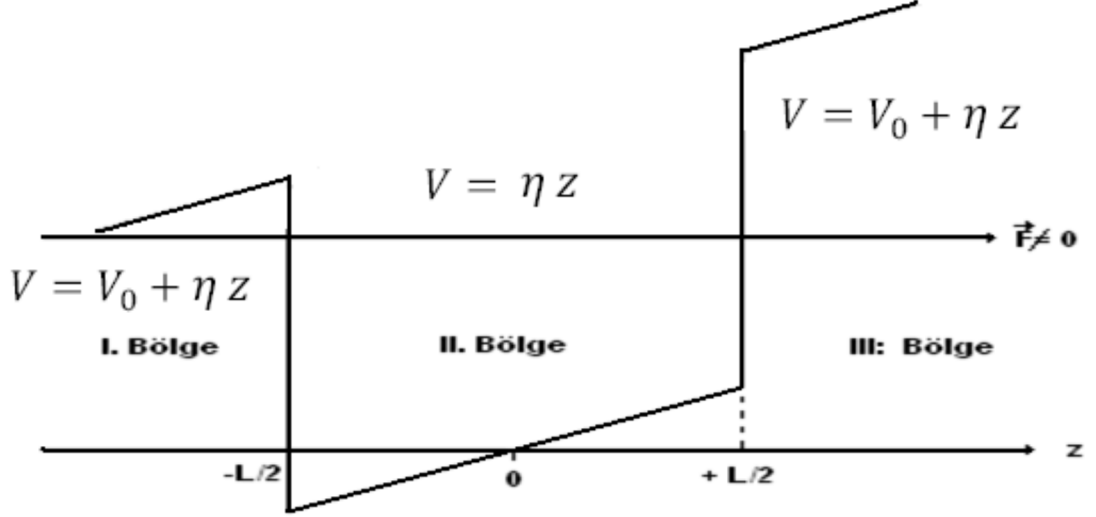
3.2 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alanın Etkisi

Sonlu potansiyel kuantum kuyusu içinde bulunan m^* etkin kütleli bir parçacığın dalga fonksiyonu ve enerji ifadesini daha önce bulmuştuk. Dalga fonksiyonları şu şekilde idi;

Taban durumlar için;

$$\psi_1(z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases} \quad (3.2.1)$$

Bu potansiyel kuantum kuyusuna z yönünde düzgün bir elektrik alan şiddeti uygulandığında kuyunun şekli [1,2,12,14,21];



Şekil 3.2.1: Sonlu kuantum kuyusunda elektrik alanın etkisi[22]

Elektrik alan etkisini göz önüne alırsak silindirik koordinatlarda Hamiltonyenler aşağıdaki hali alır;

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V(z), \quad (3.2.2)$$

$$H_2 = H + H_{elek}, \quad (3.2.3)$$

$$H_2 = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + eFz, \quad (3.2.4)$$

R^* , a^* birim sisteminde denklemleri;

I. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemleri;

$$H_{21} = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z + V_0, \quad (3.2.5)$$

$$-\frac{d^2}{dz^2} \psi_1^{el}(z) + \eta z \psi_1^{el}(z) + V_0 \psi_1^{el}(z) = E \psi_1^{el}(z), \quad (3.2.6)$$

II. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemleri;

$$H_{22} = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z \quad (3.2.7)$$

$$-\frac{d^2}{dz^2} \psi_2^{el} + \eta z \psi_2^{el} = E \psi_2^{el} \quad (3.2.8)$$

III. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemleri;

$$H_{23} = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z + V_0 \quad (3.2.9)$$

$$-\frac{d^2}{dz^2} \psi_3^{el} + \eta z \psi_3^{el} + V_0 \psi_3^{el} = E \psi_3^{el} \quad (3.2.10)$$

Varyasyonel yöntemle aşağıdaki dalga fonksiyonları;

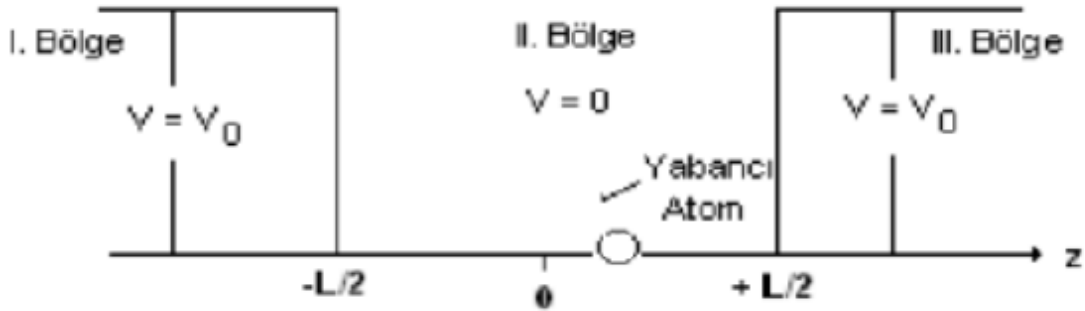
$$\psi_{el,2}(z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\beta z} e^{+k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\beta z} & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\beta z} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases} \quad (3.2.11)$$

seçilir, burada β varyasyonel parametredir. Subband taban durum enerjisi de;

$$E_{el\text{sonlu}} = \min_{\beta} \left(\frac{\langle \psi_1^{el} | H_{21} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | H_{22} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | H_{23} | \psi_3^{el} \rangle}{\langle \psi_1^{el} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | \psi_3^{el} \rangle} \right) \quad (3.2.12)$$

olur.

3.3 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda Donor Yabancı Atom



Şekil 3.3.1: Sonlu kuantum kuyusunda yabancı atom[22]

Yabancı atomlu kuantum kuyusu için, Sindirdik koordinatlarda ve R^* , a^* birim sisteminde Hamiltonyen [1,3,6,];

$$H_3 = -\nabla^2(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + V_0$$

I. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{31} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + V_0, \quad (3.3.1)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_1(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_1(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \psi_1(\rho, z) + V_0 \psi_1(\rho, z) = E \psi_1(\rho, z) \quad (3.3.2)$$

II. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{32} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}}, \quad (3.3.3)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_2(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_2(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \psi_2(\rho, z) = E \psi_2(\rho, z) \quad (3.3.4)$$

III. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{33} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + V_0, \quad (3.3.5)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_3(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_3(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} \psi_3(\rho, z) + V_0 \psi_3(\rho, z) = E \psi_3(\rho, z) \quad (3.3.6)$$

Varyasyonel yöntemeye uygun olarak aşağıdaki taban durum dalga fonksiyonları;

$$\psi_{y,3}(\rho, z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} e^{+k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases} \quad (3.3.7)$$

olarak seçilir ve enerjinin beklenen değeri, $E_{yabsonlu}$;

$$E_{yabsonlu} = \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(z)_{31} | H_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | H_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | H_{33} | \psi(z)_{33} \rangle}{\langle \psi(z)_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | \psi(z)_{33} \rangle} \right) \quad (3.3.8)$$

olur. Bu durum için bağlanma enerjisi,

$$E_b = \left(\frac{\langle \psi(z)_{11} | H_{11} | \psi(z)_{11} \rangle + \langle \psi(z)_{12} | H_{12} | \psi(z)_{12} \rangle + \langle \psi(z)_{13} | H_{13} | \psi(z)_{13} \rangle}{\langle \psi(z)_{11} | \psi(z)_{11} \rangle + \langle \psi(z)_{12} | \psi(z)_{12} \rangle + \langle \psi(z)_{13} | \psi(z)_{13} \rangle} \right) - \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(z)_{31} | H_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | H_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | H_{33} | \psi(z)_{33} \rangle}{\langle \psi(z)_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | \psi(z)_{33} \rangle} \right) \quad (3.3.9)$$

olur. Yabancı atom yokluğunda enerji yani taban durum subband enerjisini hesabında, Bölüm 3.1 verildiği gibi,

$$H_{11} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V_0$$

$$H_{12} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2}$$

$$H_{13} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V_0$$

ve

$$\psi_1(z) = \begin{cases} A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{k_o z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) & II. Bölge \\ A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-k_o z} & III. Bölge \end{cases}$$

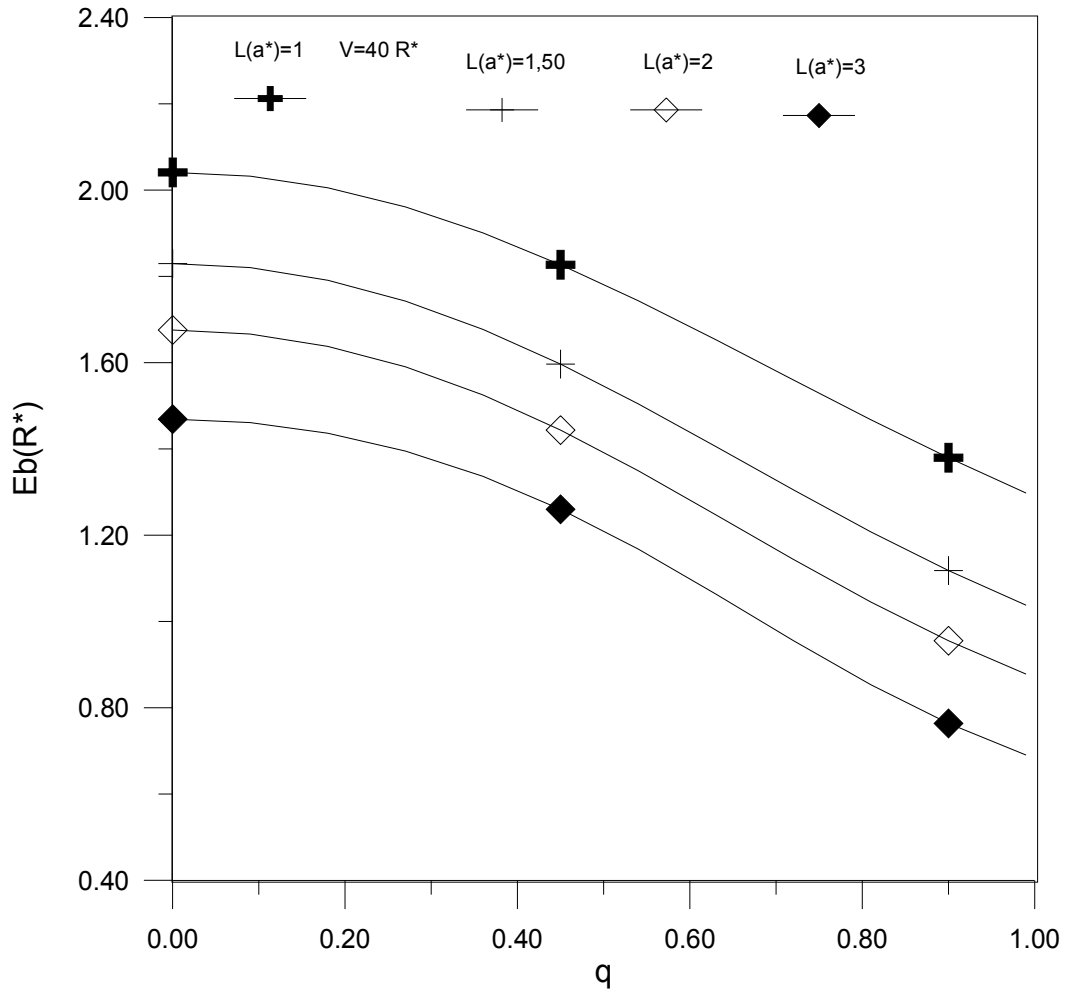
dır.

Yapılan nümerik hesaplarda $V_0 = 225 \text{ meV/R}^*$ olarak seçildi.

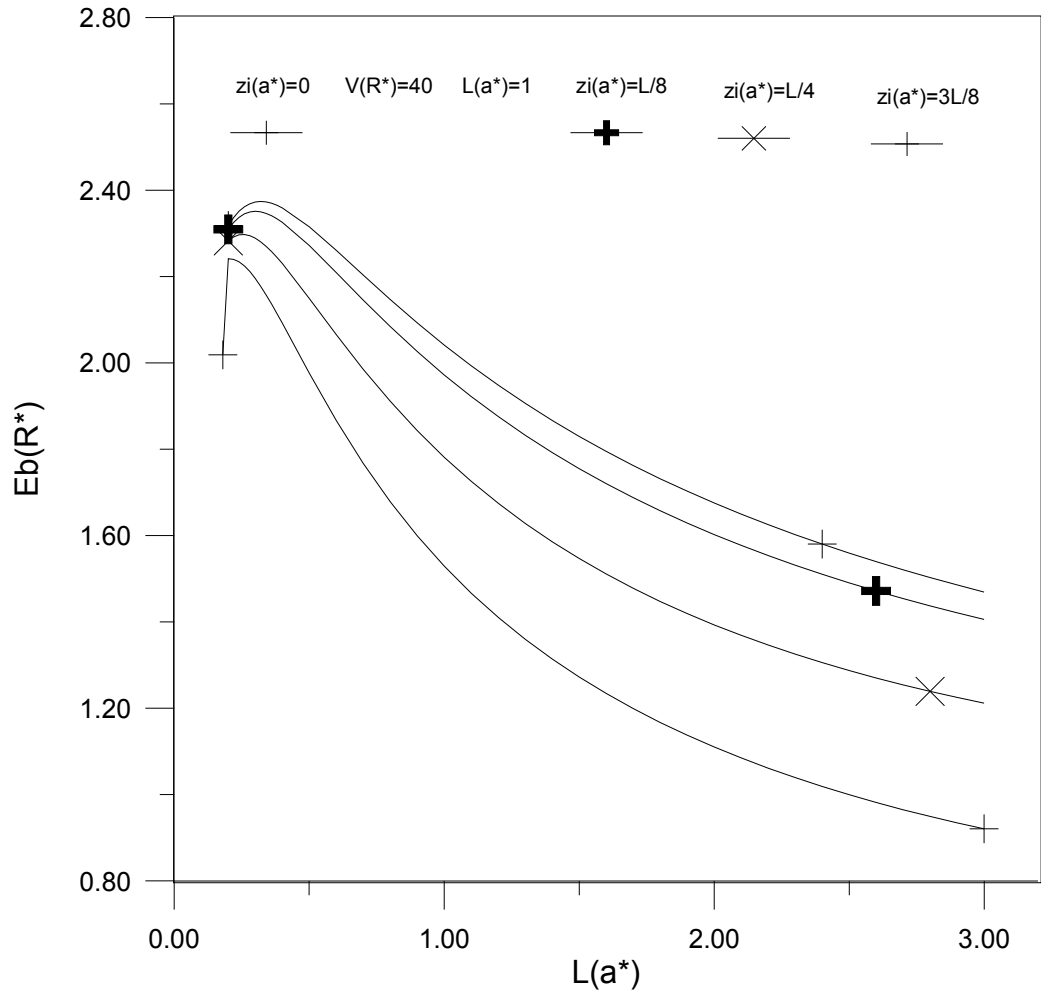
GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda donör bağlanma enerjisi, Denklem (3.3.9) 'den hesaplandı. Grafik 3.3.1 de donör bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumuna göre değişimi verilmiştir. Grafik 3.3.1 de görüldüğü donör bağlanma enerjisi, yabancı atomun kuyu merkezinden uzaklaştıkça azaldığını görmekteyiz. Grafik 3.3.2 de donör bağlanma enerjisinin kuyu genişliğine göre değişimi verilmiştir

ve kuantum kuyu genişliği artıkça donör bağlanma enerjisinin azaldığını görmekteyiz. Ayrıca $L(a^*) = 0,5$ den daha kucuk genişlikteki kuyularda belli bir yere kadar donör bağlanma enerjisinin artığını ve belli bir yerde maximum olduğunu ve belli bir kuyu genişliğinden sonra azalmaya başladığını görmekteyiz.

Bu sonuçlar literatürle uyumludur. [1,3,6]



Grafik 3.3.1: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda farklı kuyu genişlikleri ($L(a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atomun konumuna göre değişimi



Grafik 3.3.2: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda dört farklı yabancı atom konum için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi

3.4 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda Yabancı Atom Ve Elektrik Alan

GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As kuantum kuyusunda yabancı atom varlığında ve kuyuya +z yönünde düzgün elektrik alan (\vec{F}) uygulandığında ($V(z)$) kuyu potansiyelinde sistemi R*,a* biriminde [1,2,3,12,14,16,17];

$$V(z) = \begin{cases} \eta z, & -L/2 \leq z \leq L/2 \\ V_0 + \eta z, & |z| > L/2 \end{cases} . \quad (3.4.1)$$

I. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{41} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + V_0 + \eta z, \quad (3.4.2)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_1(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_1(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} \psi_1(\rho, z) + V_0 \psi_1(\rho, z) + \eta z \psi_1(\rho, z) = E \psi_1(\rho, z). \quad (3.4.3)$$

II. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{42} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + \eta z, \quad (3.4.4)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_2(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_2(\rho, z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} \psi_2(\rho, z) + \eta z \psi_2(\rho, z) = E \psi_2(\rho, z) \quad (3.4.5)$$

III. Bölge için Hamiltonyen ve Schrödinger denklemi;

$$H_{43} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + V_0 + \eta z, \quad (3.4.6)$$

$$-\frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi_3(\rho, z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \psi_3(z) - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} \psi_3(\rho, z) + V_0 \psi_3(\rho, z) + \eta z \psi_3(\rho, z) = E \psi_3(\rho, z) \quad (3.4.7)$$

Varyasyonel yöntemde deneme dalga fonksiyonlarını;

$$\psi_{y,e}(\rho, z) = \begin{cases} A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} e^{-\beta z} e^{+k_o z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} e^{-\beta z} & II. Bölge \\ A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} e^{-\beta z} e^{-k_o z} & III. Bölge \end{cases} \quad (3.4.8)$$

olarak seçilirse enerjinin beklenen değeri

$$E_{yabsontu} = \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi_1(\rho, z) | H_{41} | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | H_{42} | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | H_{43} | \psi_3(\rho, z) \rangle}{\langle \psi_1(\rho, z) | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | \psi_3(\rho, z) \rangle} \right) \quad (3.4.9)$$

olur. Bu durumda bağlanma enerjisi.

$$E_b = \min_{\beta} \left(\frac{\langle \psi_1^{el} | H_{21} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | H_{22} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | H_{23} | \psi_3^{el} \rangle}{\langle \psi_1^{el} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | \psi_3^{el} \rangle} \right) - \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi_1(\rho, z) | H_{41} | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | H_{42} | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | H_{43} | \psi_3(\rho, z) \rangle}{\langle \psi_1(\rho, z) | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | \psi_3(\rho, z) \rangle} \right) \quad (3.4.10)$$

olur. Daha Bölüm 3.2 verildiği gibi taban durum subband enerjisi hesabındaki Hamiltonyenler ve dalga fonksiyonları

$$\psi_{el,2}(z) = \begin{cases} A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-\beta z} e^{+k_o z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\beta z} & II. Bölge \\ A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-\beta z} e^{-k_o z} & III. Bölge \end{cases}$$

$$H_{21} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z + V_0$$

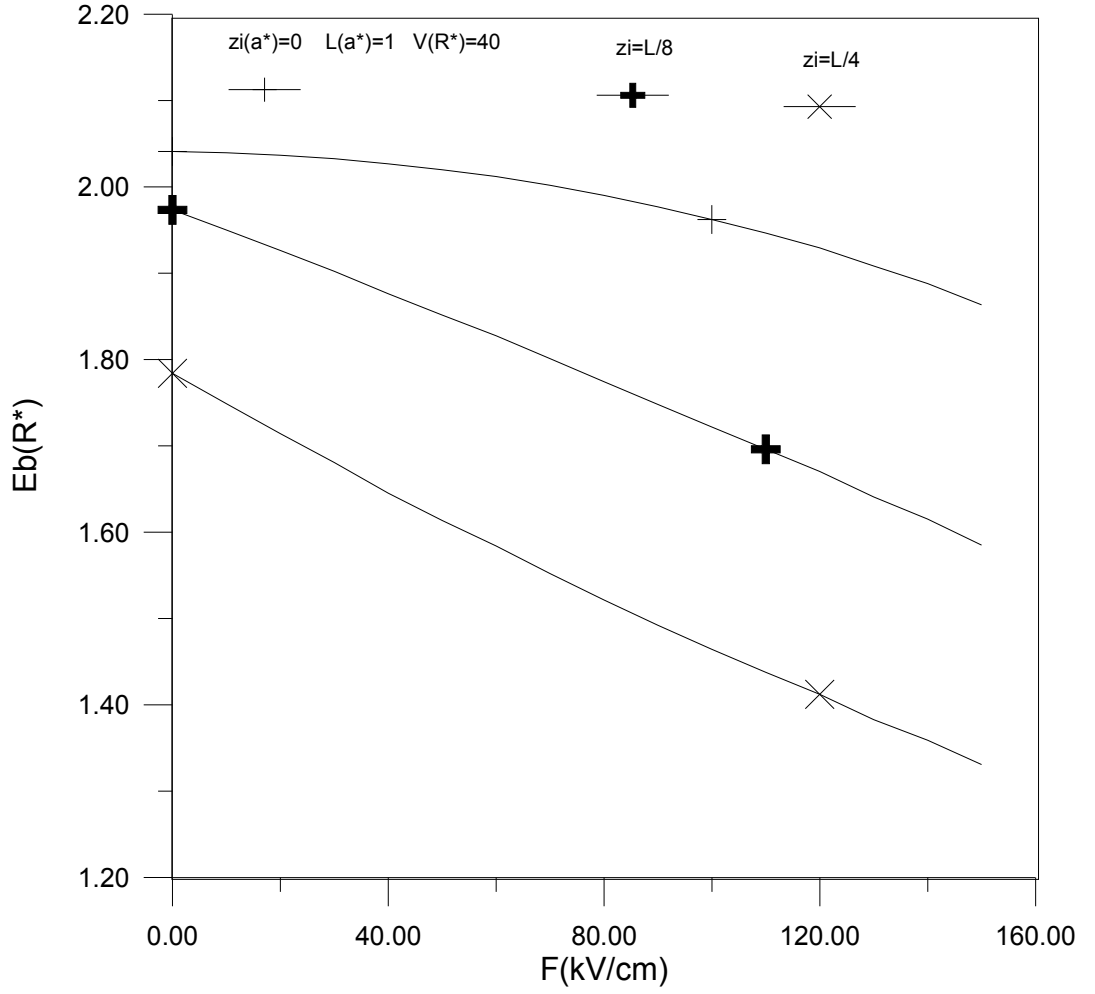
$$H_{22} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z$$

$$H_{23} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z + V_0$$

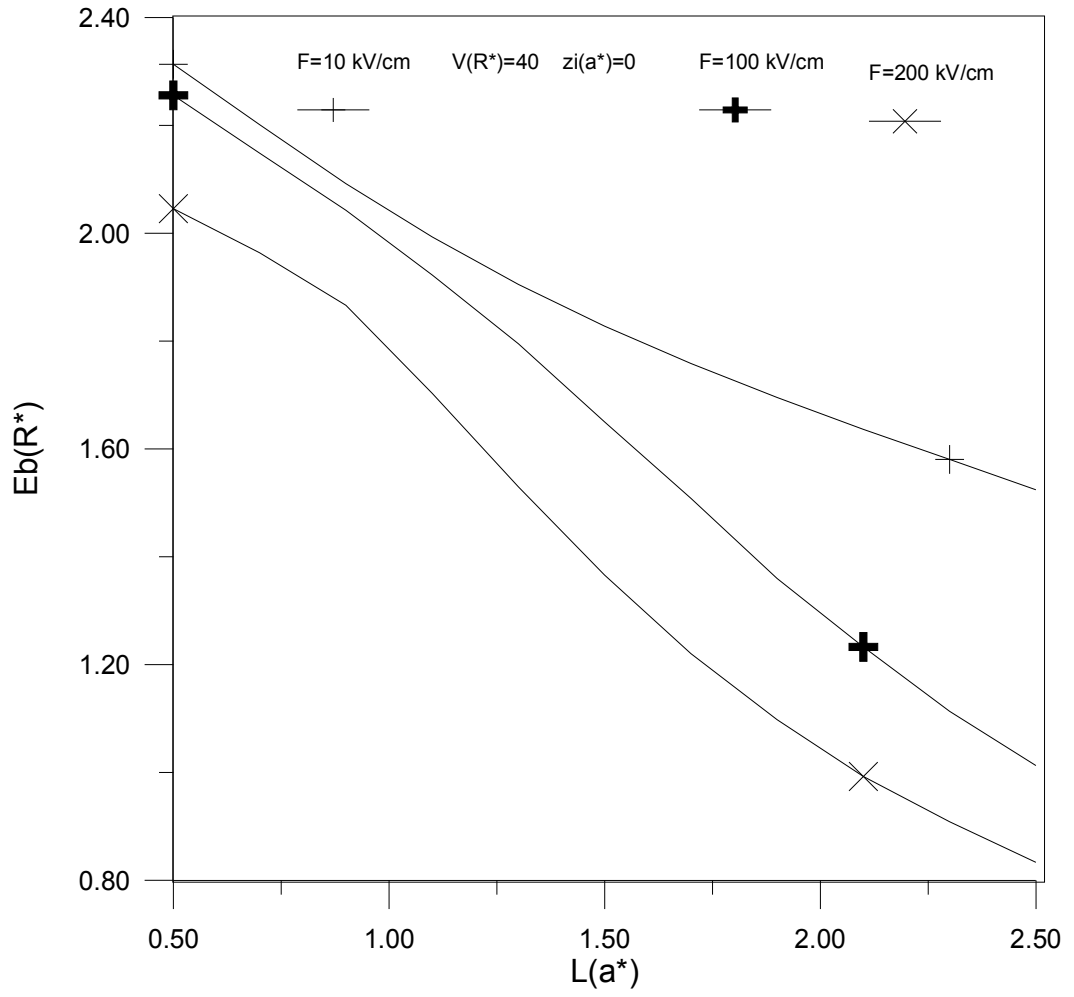
dır.

GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi Denklem (3.4.10) 'den hesaplandı. Grafik 3.4.1 'de donör bağlanma enerjisinin elektrik alan şiddetine F(kV/cm) göre değişimi verilmiştir. Grafik 3.4.1 'de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisi elektrik alan şiddeti artıkça F(kV/cm) azalıyor. Donör bağlanma enerjisinin, kuyu genişliğine ve elektrik alan şiddetine F(kV/cm) göre değişimleri Grafik 3.4.2, Grafik 3.4.3, verilmiştir. Grafik 3.4.2, Grafik 3.4.3, de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisinin, kuantum kuyu genişliği artıkça azaldığını, elektrik alan şiddeti F(kV/cm) artıkça da azaldığını görmekteyiz. Grafik 3.4.4 'de donör bağlanma enerjisinin elektrik alan şiddetine ve kuantum kuyusu genişliğine göre verilmiştir. Grafik 3.4.4 'de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisi, kuantum kuyusu genişliği ve elektrik alan şiddeti artıkça azalıyor. Ayrıca elektrik alanı kuantum kuyusu genişliği artıkça daha belirgin bir şekilde gözlemlemekteyiz

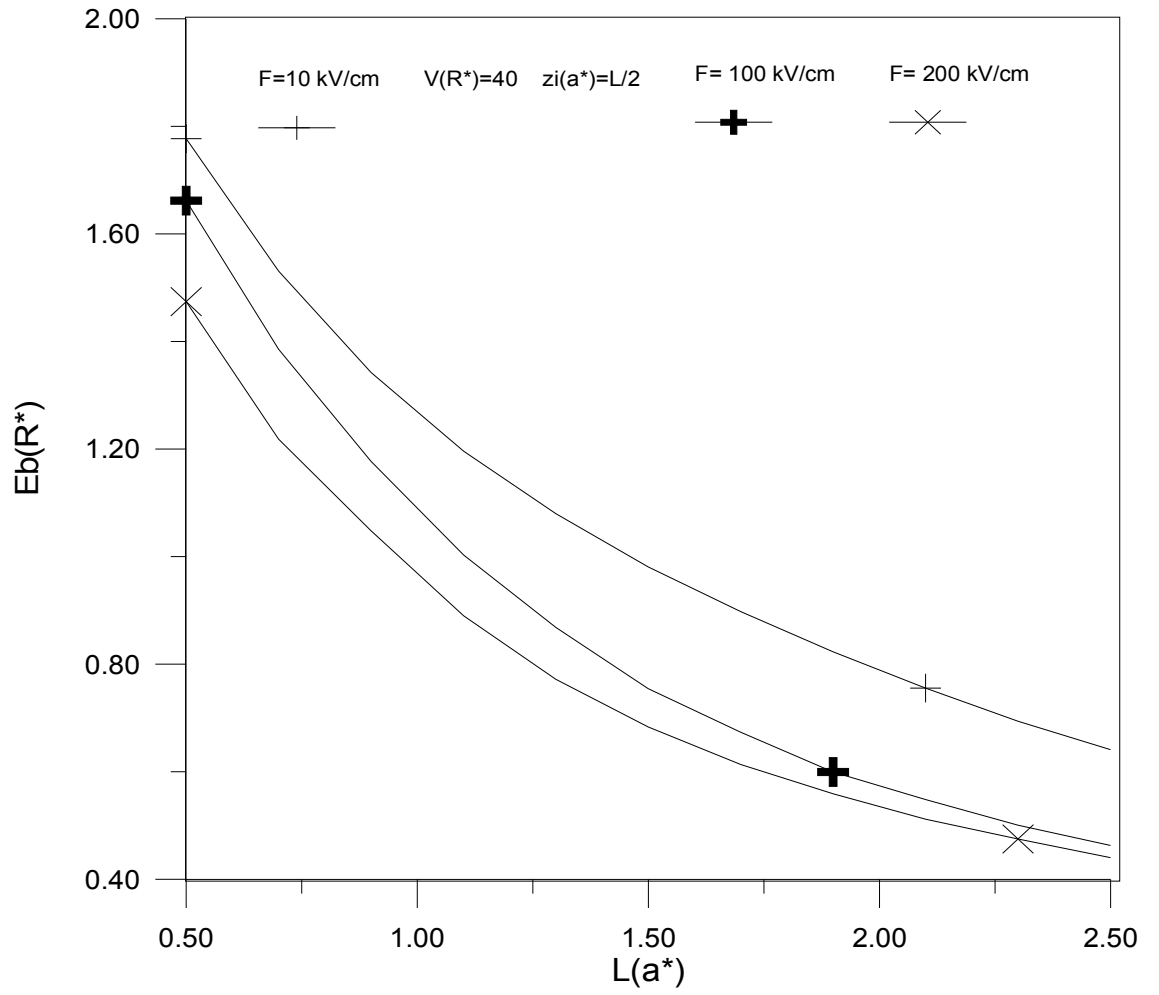
Bu sonuçlar literatürle uyumludur. [1,2,3, 12,14,16,17]



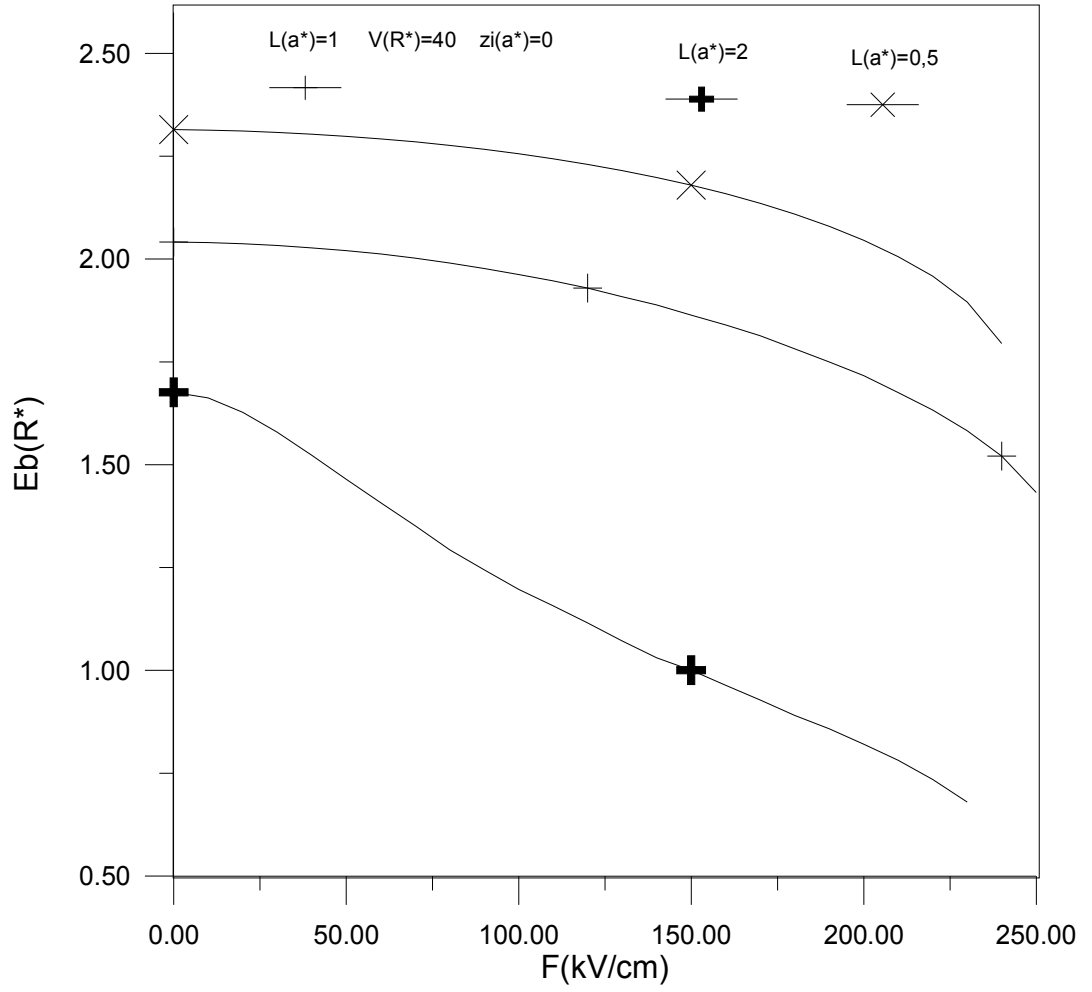
Grafik 3.4.1: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı konum için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine göre değişimi



Grafik 3.4.2: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı elektrik alan şiddeti için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi



Grafik 3.4.3: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı elektrik alan için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) kuyu genişliğine göre değişimi, $z_i=L/2$



Grafik 3.4.4: Simetrik Sonlu Kuantum Kuyusunda üç farklı kuyu genişliği için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) elektrik alan şiddetine göre değişimi, $z_i=0$

BÖLÜM 4

4. SONLU VE SONSUZ KUANTUM KUYULARINDA DURUM YOĞUNLUĞU

Bu bölümde GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusu ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi ve donör durum yoğunluğu yabancı atom pozisyonunun fonksiyonu olarak verildi. Durum yoğunluğu kuyu kalınlıkları ve uygulanan düzgün elektrik alan için verilmiştir.

4.1 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Donör Durum Yoğunluğu

Sonsuz Kuantum kuyusunda elektrik alan yokluğunda ve donör yabancı atom bulunduğu durumda durum yoğunluğu;

$$g_L(E_b) = \frac{2}{L} \sum_{zi} \left| \frac{dzi}{dE_b} \right| , E_b = E_b(L, zi) , zi \geq 0 \quad (4.1.1)$$

olarak tanımlanır. [1,2,7,8,9,10,12,17]

Daha önce Bölüm 2.3 verildiği gibi; donör bağlanma enerjisinin hesabında Hamiltonyenler ve dalga fonksiyonları;

$$E_b = \left(\frac{\langle \psi(z) | H | \psi(z) \rangle}{\langle \psi(z) | \psi(z) \rangle} \right) - \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | H_3 | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle}{\langle \psi(\rho, z)_{yab} | \psi(\rho, z)_{yab} \rangle} \right)$$

$$H = -\frac{d^2}{dz^2}$$

$$\psi(z) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos \frac{\pi}{L} z$$

$$H_3 = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - z_i)^2}}$$

$$\psi(\rho, z)_{yab} = N \cos\left(\frac{\pi}{L} z\right) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - z_i)^2}}$$

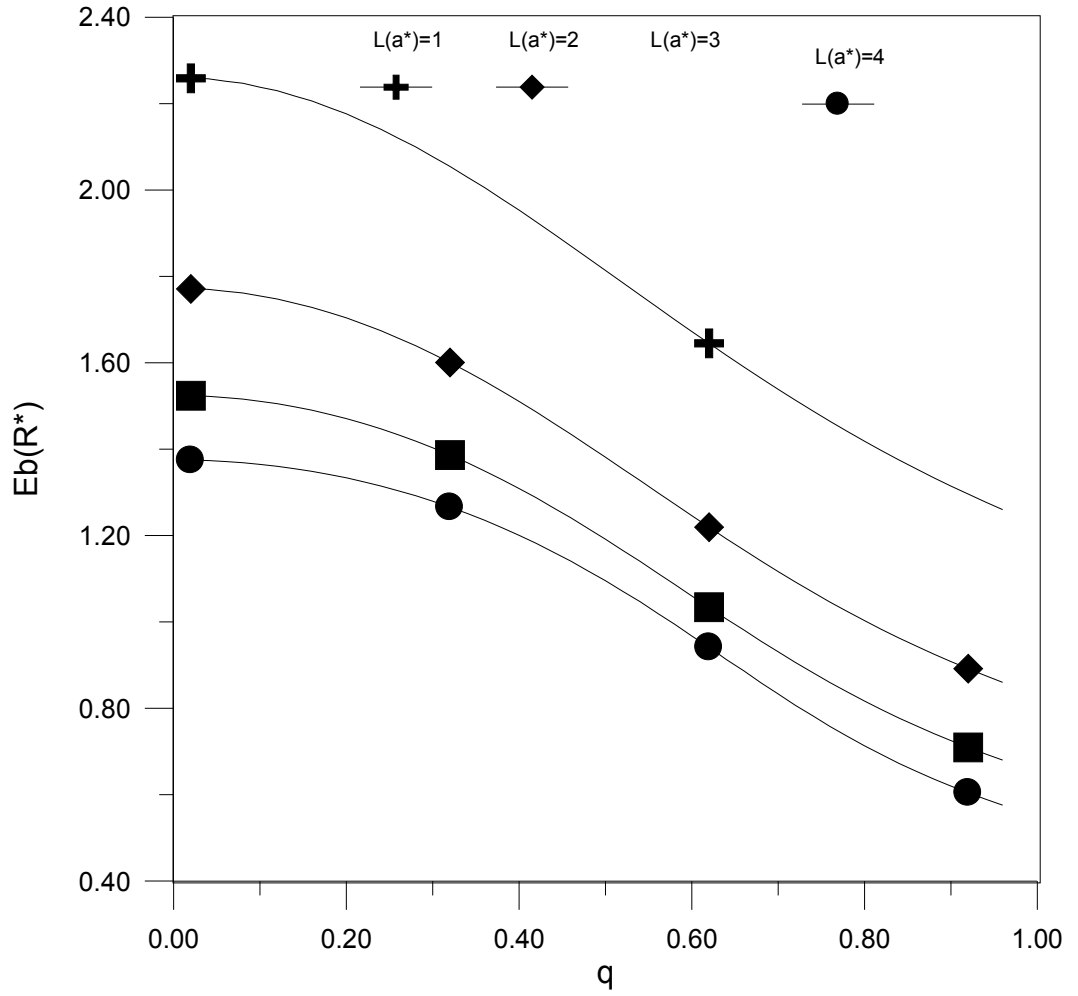
Bu çalışmada yapılan nümerik hesaplarda kolaylık açısından yabancı atomun konumu birimsiz olarak seçilmiştir. Burdaki durum yoğunluğu hesabında

$$q = z_i / (L/2) \quad ; \quad q \in [0, 1]$$

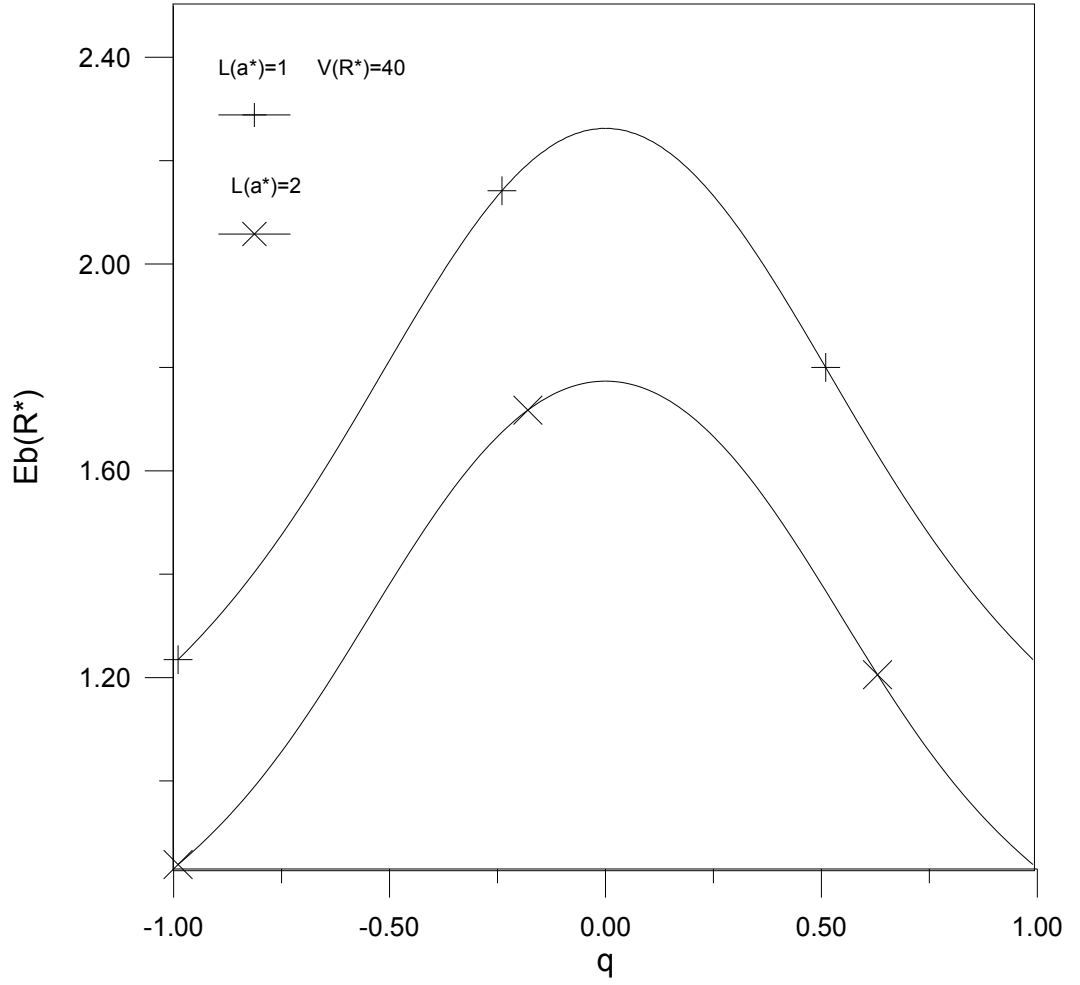
dır. burada $q \geq 0$ dır .Bağlanma enerjisi, E_b ve durum yoğunluğu g_l nümerik olarak hesaplandı.

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi; Denklem (2.3.8) 'den hesaplandı. Donör bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumuna göre değişimi Grafik 4.1.1 ve Grafik 4.1.2 verildi. Grafik 4.1.1 ve Grafik 4.1.2 de görüldüğü gibi donör bağlanma enerjisinin, yabancı atom kuyu merkezine yaklaştıkça arttığını görmekteyiz. Grafik 4.1.3 Grafik 4.1.4 de durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve kuantum kuyu genişliği artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz.

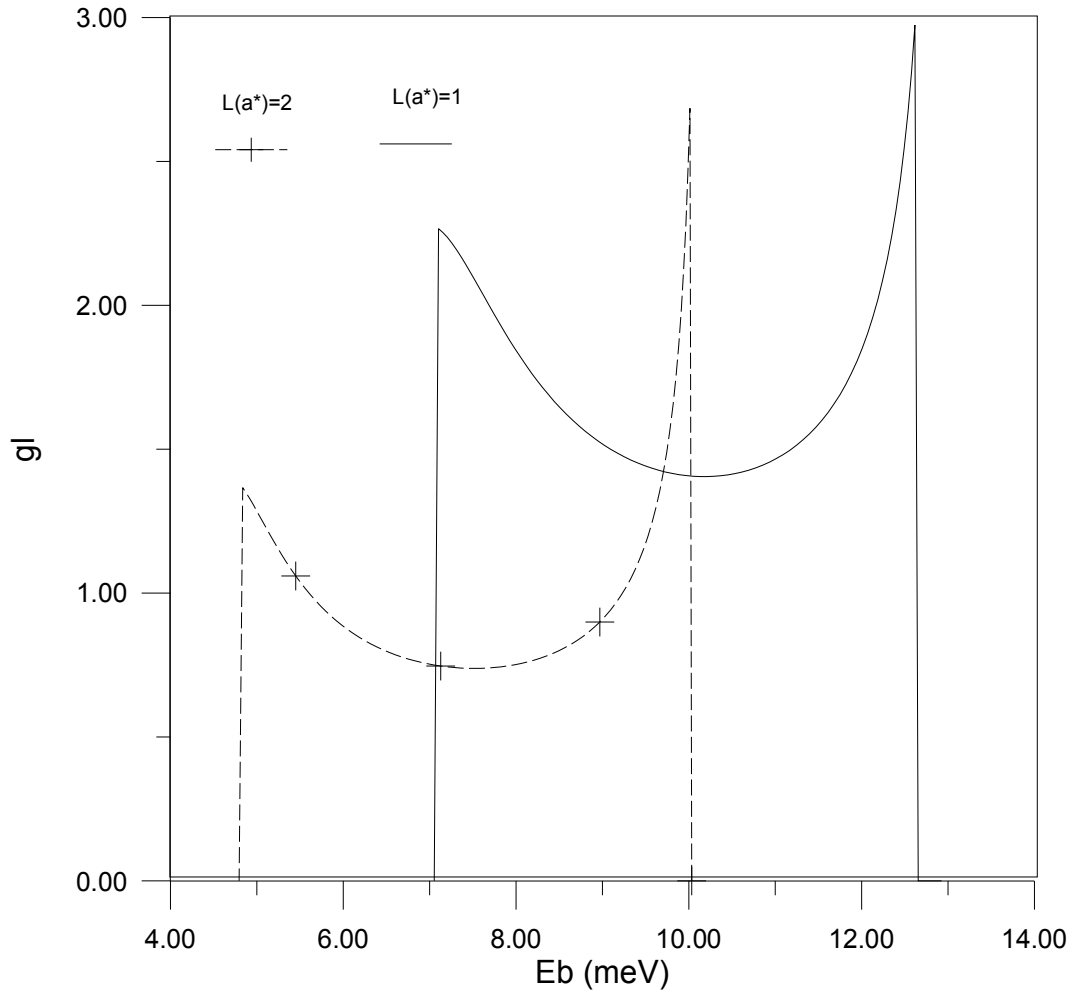
Bu sonuçlar literatürle uyumludur. [1,2,7,8.9,10,12,17]



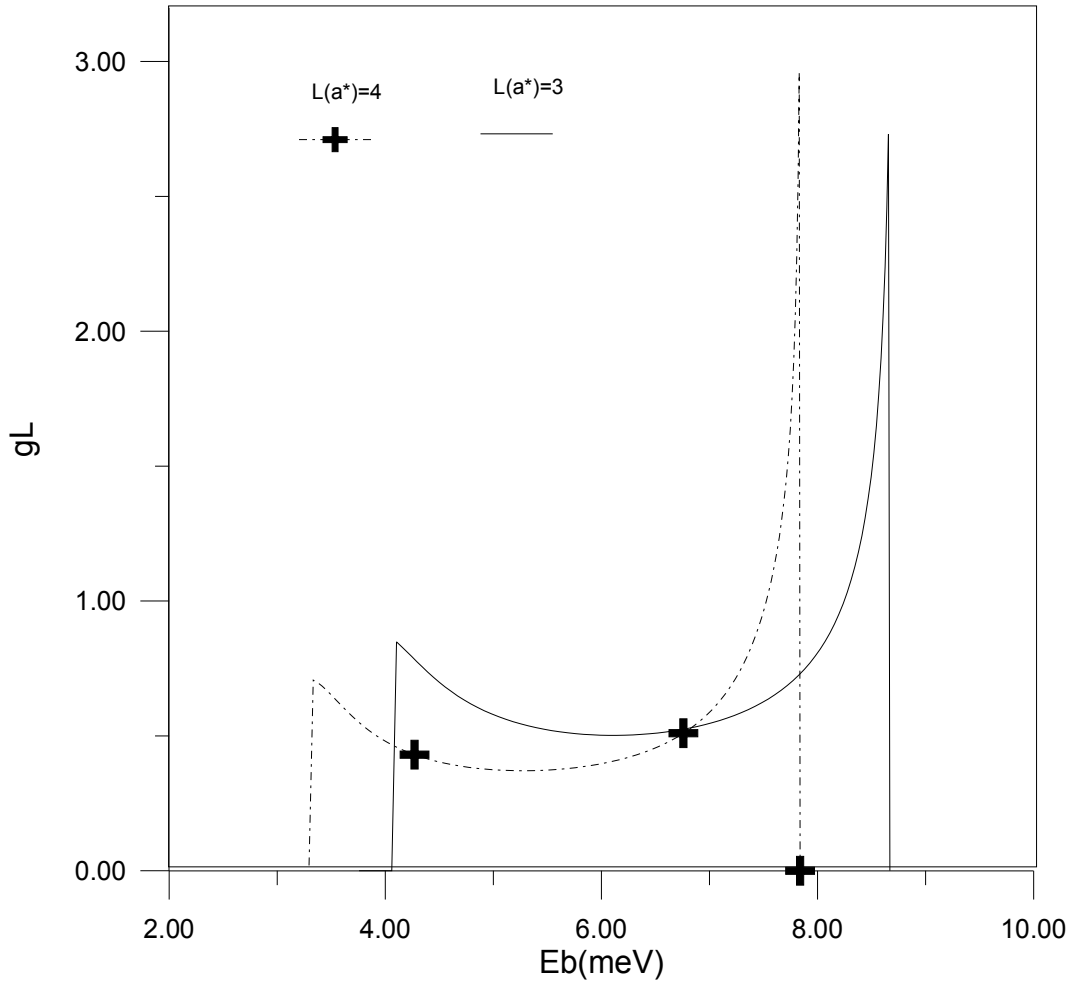
Grafik 4.1.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun farklı kuantum genişliklerinde ($L(a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi



Grafik 4.1.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun farklı kuantum genişliklerinde ($L(a^*)$) donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi



Grafik 4.1.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için ($L(a^*)$) durum yoğunluğunun yabancı atom donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $L=1a^*, 2a^*$



Grafik 4.1.4: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum genişlikleri için ($L(a^*)$) durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $L=3a^*, 4a^*$

4.2 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda Donor Durum Yoğunluğu

Sonlu kuantum kuantum kuyusunda donor yabancı atom bulunduğunda durum yoğunluğu, sonsuz kuantum kuyusundaki gibi incelersek [1,2,3,6,7,8.9,10,12,17];

$$g_L(E_b) = \frac{2}{L} \sum_{zi} \left| \frac{d zi}{d E_b} \right| , E_b = E_b(L, zi) , zi \geq 0 \quad (4.2.1)$$

olur. burada $q \geq 0$ dır .Bağlanma enerjisi, E_b ve durum yoğunluğu g_l nümerik olarak hesaplandı. Daha önce Bölüm 3.3 de verildiği gibi donor bağlanma enerjisi hesabında Hamiltonyenler ve dalga fonksiyonları ;

$$E_b = \left(\frac{\langle \psi(z)_{11} | H_{11} | \psi(z)_{11} \rangle + \langle \psi(z)_{12} | H_{12} | \psi(z)_{12} \rangle + \langle \psi(z)_{13} | H_{13} | \psi(z)_{13} \rangle}{\langle \psi(z)_{11} | \psi(z)_{11} \rangle + \langle \psi(z)_{12} | \psi(z)_{12} \rangle + \langle \psi(z)_{13} | \psi(z)_{13} \rangle} \right) - \min_{\lambda} \left(\frac{\langle \psi(z)_{31} | H_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | H_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | H_{33} | \psi(z)_{33} \rangle}{\langle \psi(z)_{31} | \psi(z)_{31} \rangle + \langle \psi(z)_{32} | \psi(z)_{32} \rangle + \langle \psi(z)_{33} | \psi(z)_{33} \rangle} \right)$$

$$H_{11} = -\frac{d^2}{dz^2} + V_0$$

$$H_{12} = -\frac{d^2}{dz^2}$$

$$H_{13} = -\frac{d^2}{dz^2} + V_0$$

$$H_{31} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + V_0$$

$$H_{32} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}}$$

$$H_{33} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + V_0$$

ve

$$\psi_1(z) = \begin{cases} A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{k_o z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) & II. Bölge \\ A \cos(k_o L/2) e^{k_o L/2} e^{-k_o z} & III. Bölge \end{cases}$$

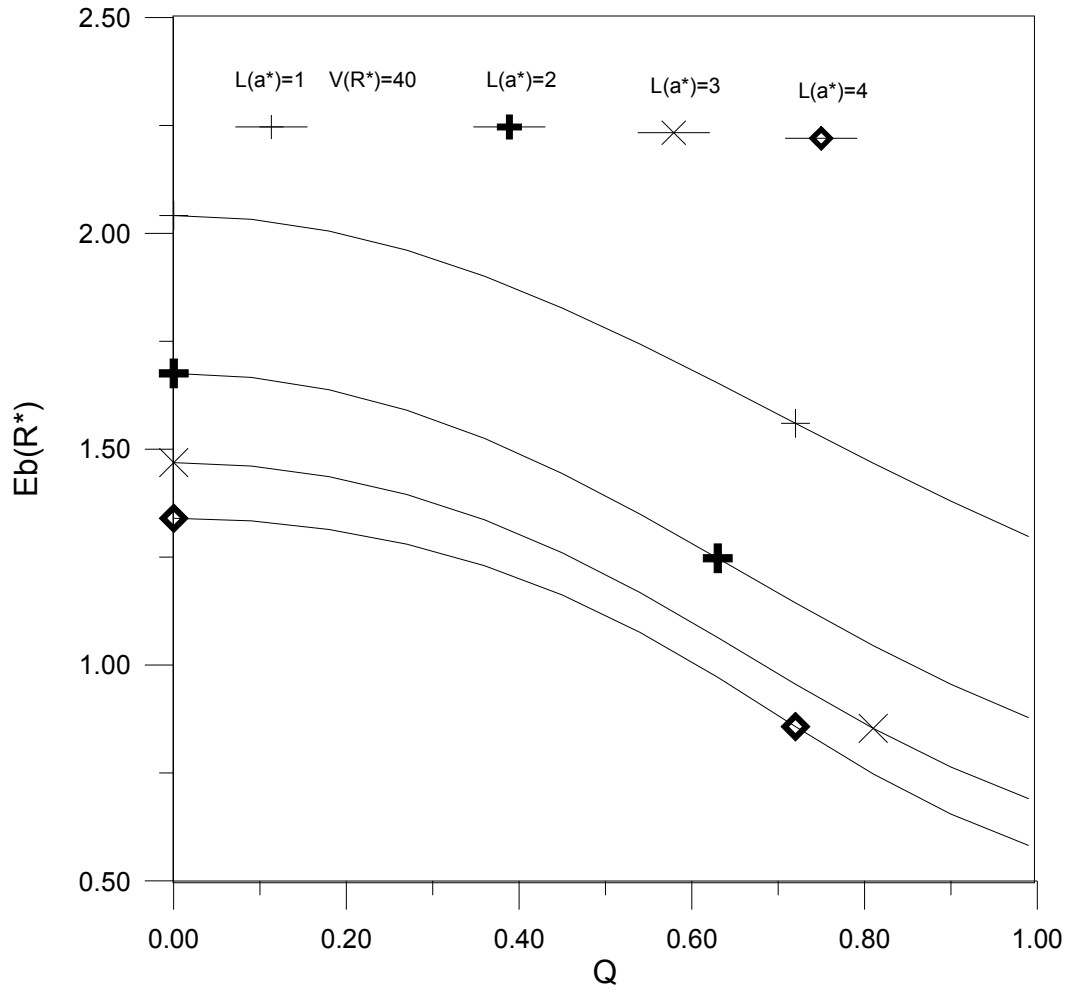
$$\psi_{y,3}(\rho, z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} e^{+k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-z_i)^2}} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases}$$

dır.

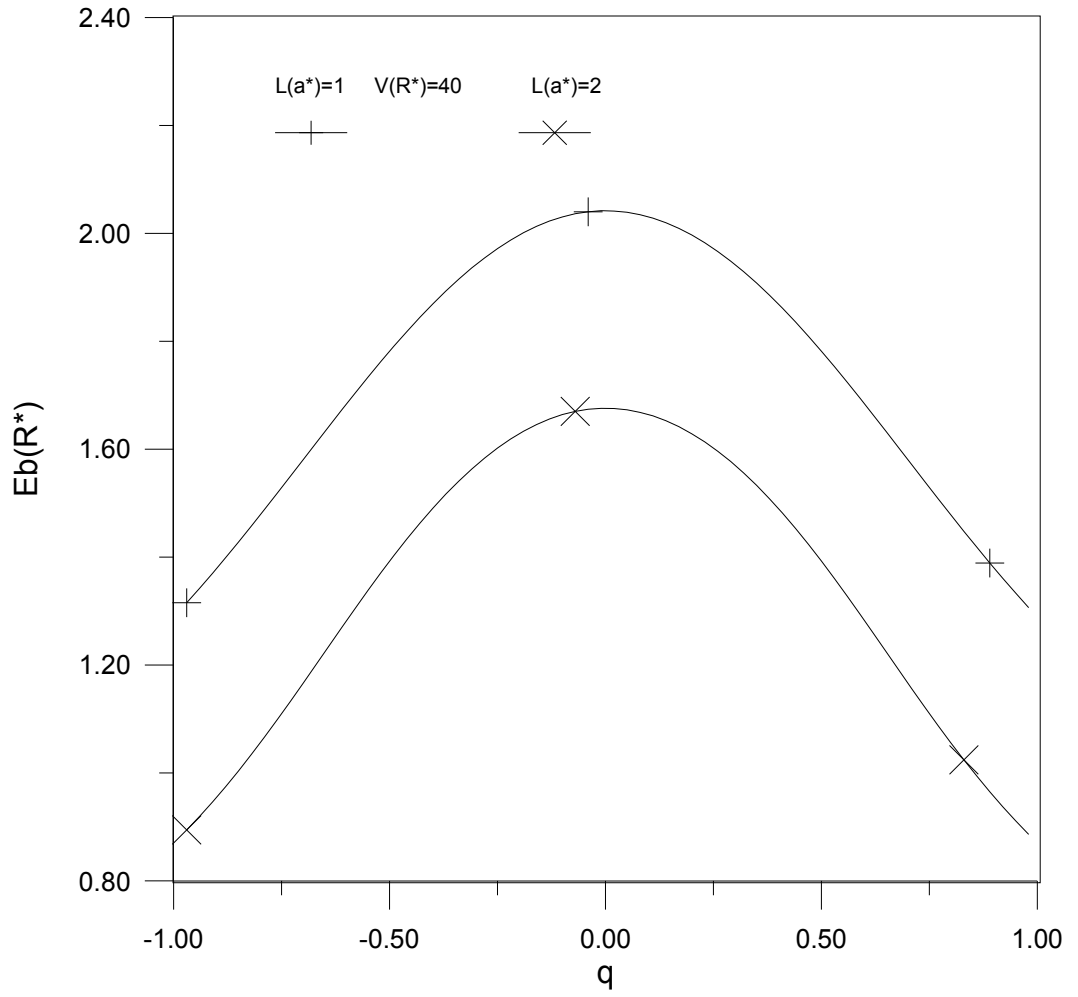
Yapılan nümerik hesaplarda $V_0 = 225 \text{ meV/R}^*$ olarak seçildi.

GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi; Denklem (3.3.9) 'den hesaplandı. Donör yabancı atom enerjisinin yabancı atomun konumuna göre değişimi Grafik 4.2.1.ve Grafik 4.2.2 de görüldüğü donör bağlanma enerjisinin, yabancı atomun kuyu merkezinden uzaklaştıkça azaldığını görmekteyiz. Grafik 4.2.3 ve Grafik 4.2.4 de durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir.

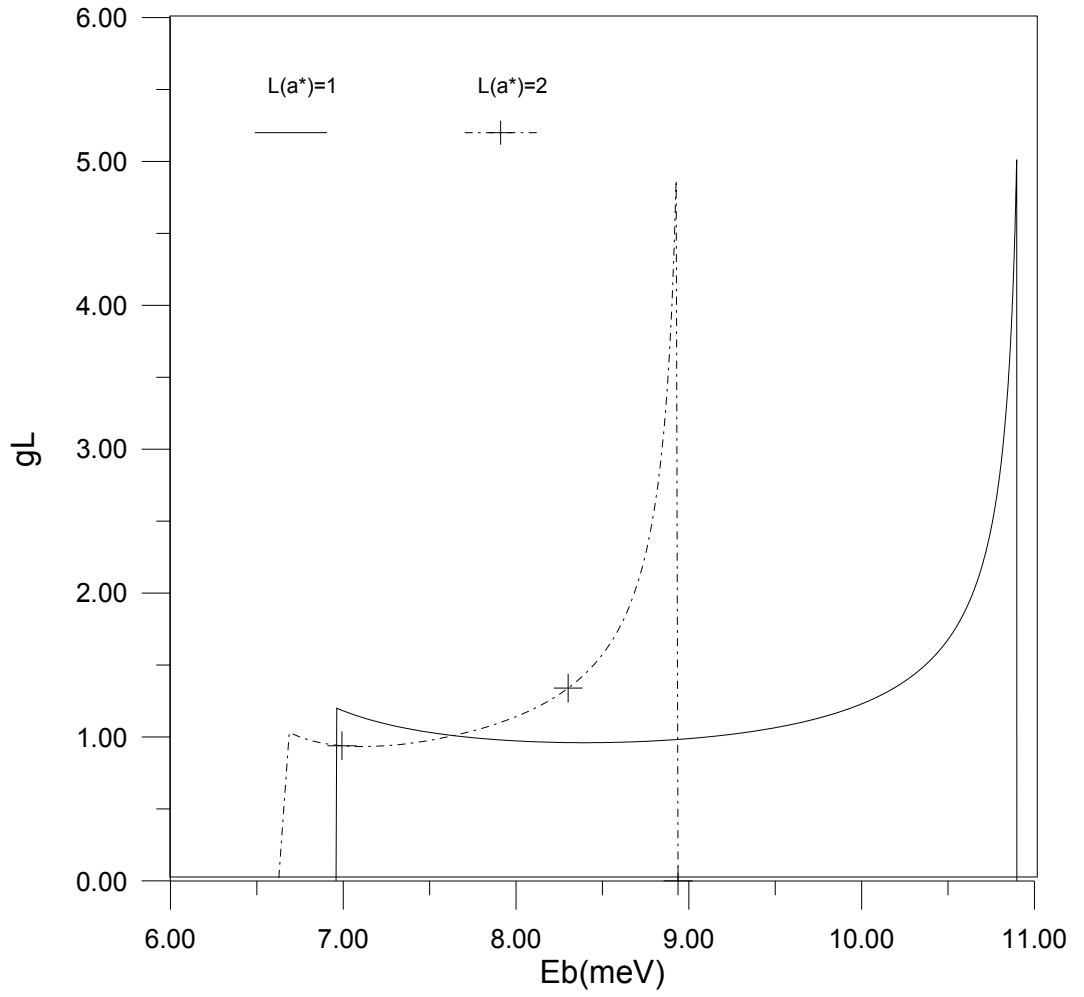
Bu sonuçlar literatürle uyumludur. [1,2,3,6,7,8.9,10,,12,17]



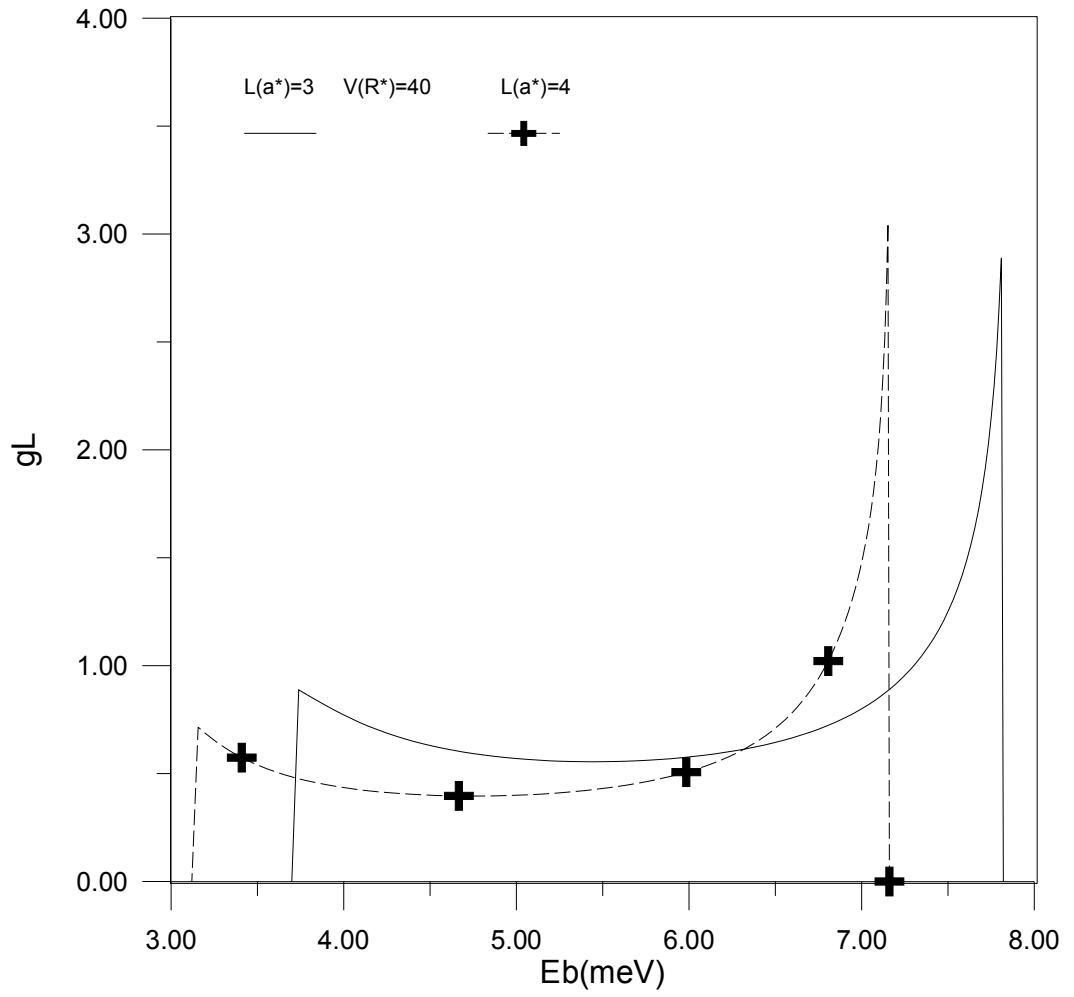
Grafik 4.2.1: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda hapsedilen bir elektronun farklı kuantum kuyu genişliklerinde (L (a^*)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40 R^*$, $L=1,2,3,4 a^*$



Grafik 4.2.2: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişliklerinde ($L(a^*)$) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40 R^*$, $L=1,2 a^*$



Grafik 4.2.3: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için (L (a^*)) durum yoğunluğunun yabancı atom donör bağlanma enerjisine göre değişimi $V=40$ $R^*, L=1,2 a^*$



Grafik 4.2.4: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı kuantum kuyu genişlikleri için (L (a^*)) durum yoğunluğunun yabancı atom donör bağlanma enerjisine göre değişimi, $V=40$ $R^*, L=3,4 a^*$

4.3 GaAs/AlAs Sonsuz Kuantum Kuyusunda Düzgün Elektrik Alan Etkisinde Donor Durum Yoğunluğu

Sonsuz kuantum kuyusunda donor yabancı atom ve düzgün elektrik alan etkisinde durum yoğunluğunu incelersek; [1,2,7,8.9,10,11,12,17]

$$g_L(E_b) = \frac{1}{L} \sum_{zi} \left| \frac{dzi}{dE_b} \right|, E_b = E_b(L, zi), -L/2 < zi < L/2 \quad (4.3.1)$$

olur. Burada daha önce Bölüm 2.4 verildiği gibi donor bağlanma enerjisi hesabında Hamiltonyenler ve dalga fonksiyonları;

$$E_b = \min_{\beta} \left(\frac{\langle \psi(z)_{elek} | H_2 | \psi(z)_{elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{elek} | \psi(z)_{elek} \rangle} \right) - \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi(z)_{yab,elek} | H_4 | \psi(z)_{yab,elek} \rangle}{\langle \psi(z)_{yab,elek} | \psi(z)_{yab,elek} \rangle} \right)$$

$$\psi(z)_{elek} = A \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) e^{-\beta z}$$

$$H_2 = -\frac{d^2}{dz^2} + \eta z$$

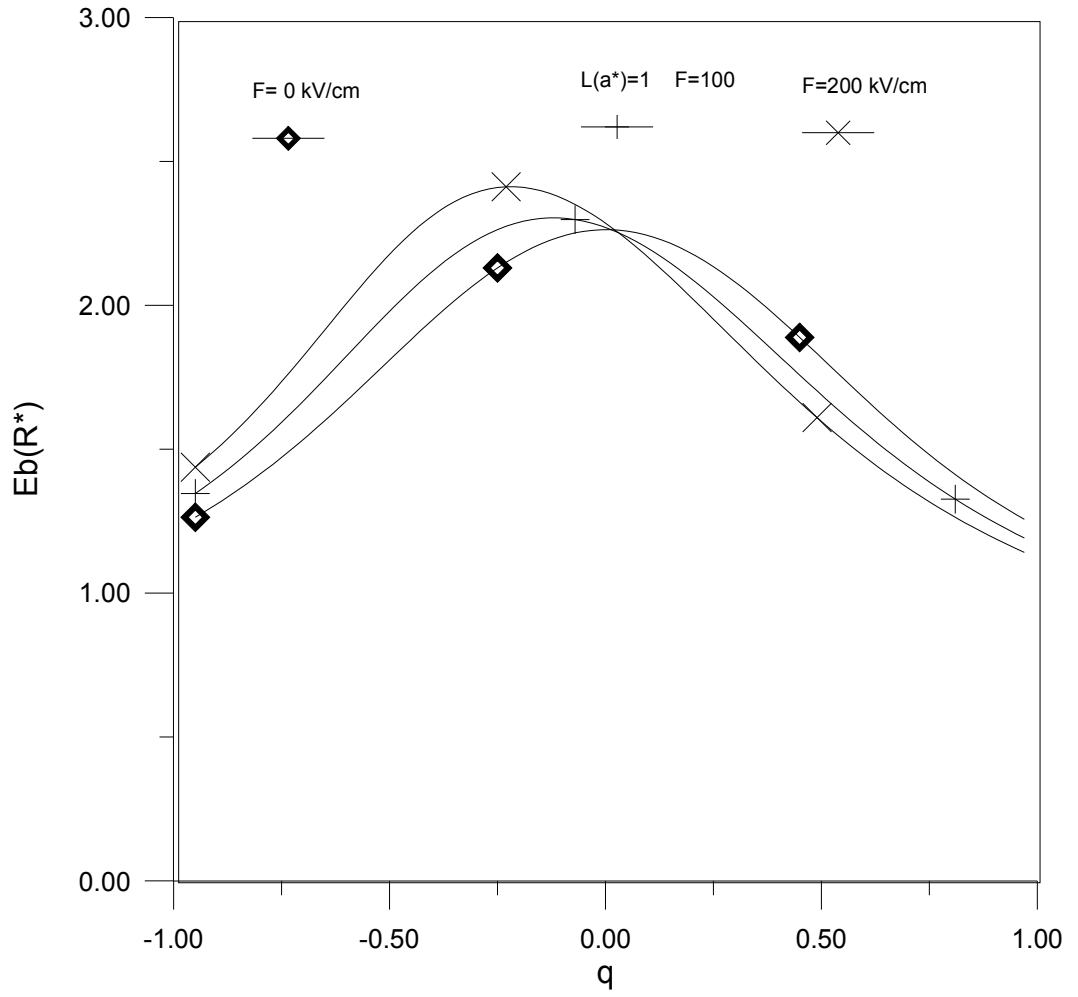
$$H_4 = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} + \eta z$$

$$\psi(z)_{yab,elek} = N \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z - zi)^2}} e^{-\beta z}$$

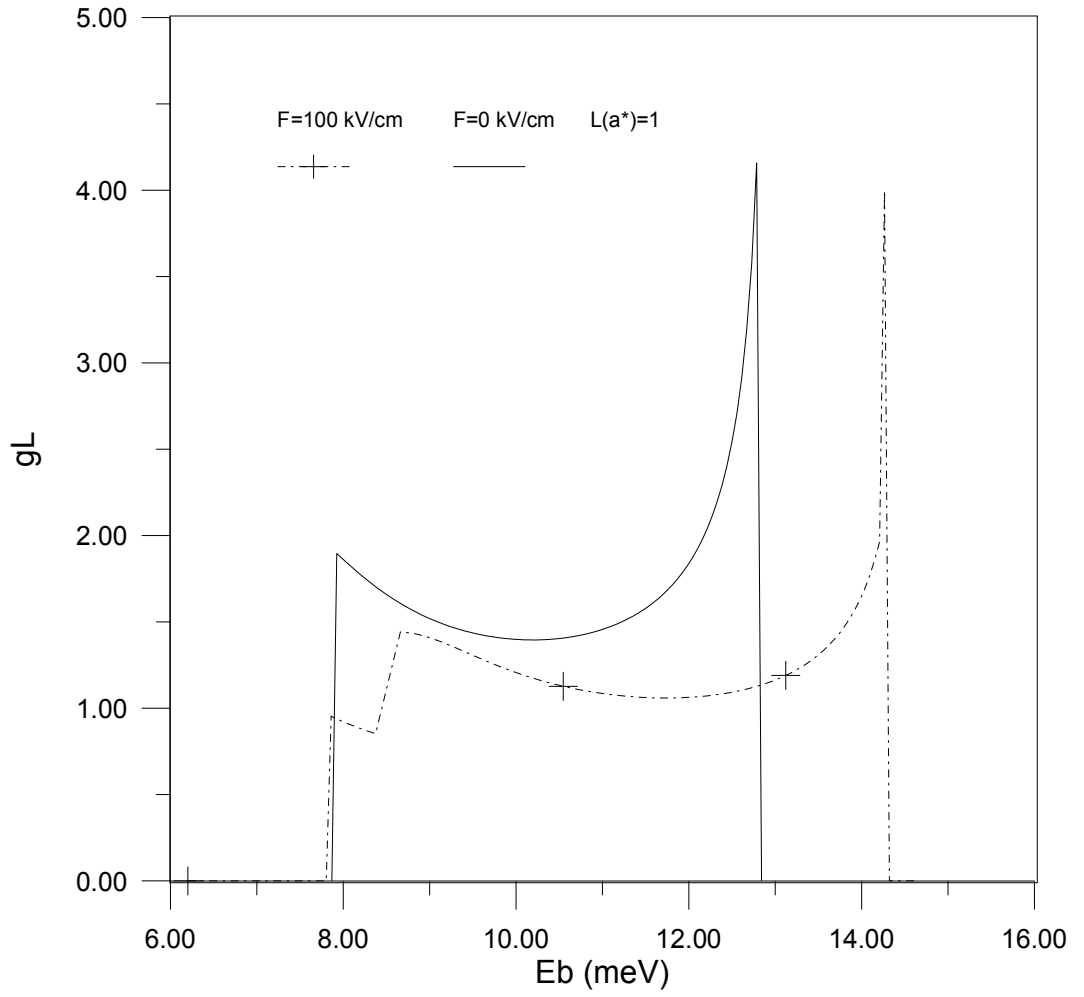
dir.

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda donor bağlanma enerjisi; Denklem (2.4.7) 'den hesaplandı. Donor yabancı atom enerjisinin yabancı atomun konumuna ve elektrik alan şiddetine F(kV/cm) göre değişimleri Grafik 4.3.1, verildi. Grafik 4.3.1, 'de görüldüğü gibi donor bağlanma enerjisinin, yabancı atom kuyu merkezinden uzaklaştıkça azaldığını görmekteyiz. Grafik 4.3.2 ve Grafik 4.3.3 de durum yoğunluğunun donor bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve elektrik alan şiddeti F(kV/cm) artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz. Ayrıca elektrik alan şiddeti artıkça (F(kV/cm)) durum yoğunluğunu daha geniş donor bağlanma enerjisi aralığında gözlemlemekteyiz.

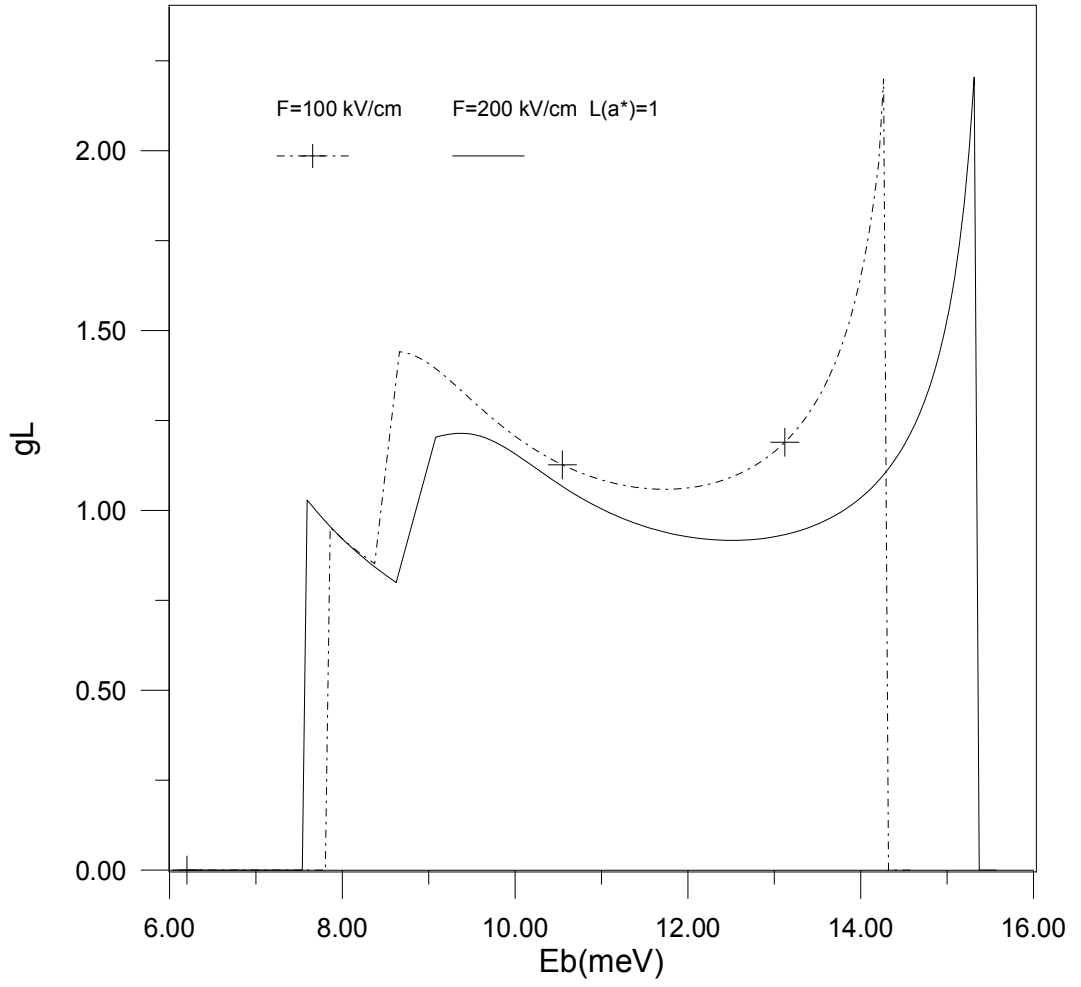
Bu sonuçlar literatürle uyumludur. [1,2,7,8.9,10,11,12,17]



Grafik 4.3.1: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi



Grafik 4.3.2: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=0$ kV/cm, $F=100$ kV/cm



Grafik 4.3.3: Simetrik sonsuz potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=100$ kV/cm, $F=200$ kV/cm

4.4 GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu Kuantum Kuyusunda Elektrik Alan Etkisinde Donor Durum Yoğunluğu

Sonlu kuantum kuantum kuyusunda donor yabancı atom ve düzgün elektrik alan etkisinde durum yoğunluğunu, sonsuz kuantum kuyusundaki gibi incelersek [1,2,7,8.9,10,11,12,17] ;

$$g_L(E_b) = \frac{1}{L} \sum_{zi} \left| \frac{d zi}{d E_b} \right| , E_b = E_b(L, zi) , -L/2 < zi < L/2 \quad (4.4.1)$$

olur. Burada daha önce Bölüm 3.4 verildiği gibi donor bağlanma enerjisi hesabında Hamiltonyenler ve dalga fonksiyonları;

$$E_b = \min_{\beta} \left(\frac{\langle \psi_1^{el} | H_{21} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | H_{22} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | H_{23} | \psi_3^{el} \rangle}{\langle \psi_1^{el} | \psi_1^{el} \rangle + \langle \psi_2^{el} | \psi_2^{el} \rangle + \langle \psi_3^{el} | \psi_3^{el} \rangle} \right)$$

$$- \min_{\lambda, \beta} \left(\frac{\langle \psi_1(\rho, z) | H_{41} | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | H_{42} | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | H_{43} | \psi_3(\rho, z) \rangle}{\langle \psi_1(\rho, z) | \psi_1(\rho, z) \rangle + \langle \psi_2(\rho, z) | \psi_2(\rho, z) \rangle + \langle \psi_3(\rho, z) | \psi_3(\rho, z) \rangle} \right)$$

$$\psi_{el,2}(z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\beta z} e^{+k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\beta z} & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\beta z} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases}$$

$$H_{21} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z + V_0$$

$$H_{22} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z$$

$$H_{23} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \eta z + V_0$$

$$\psi_{y,e}(\rho, z) = \begin{cases} A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} e^{-\beta z} e^{+k_0 z} & I. Bölge \\ A \cos(k_i z) e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} e^{-\beta z} & II. Bölge \\ A \cos(k_0 L/2) e^{k_0 L/2} e^{-\lambda \sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} e^{-\beta z} e^{-k_0 z} & III. Bölge \end{cases}$$

$$H_{41} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + V_0 + \eta z$$

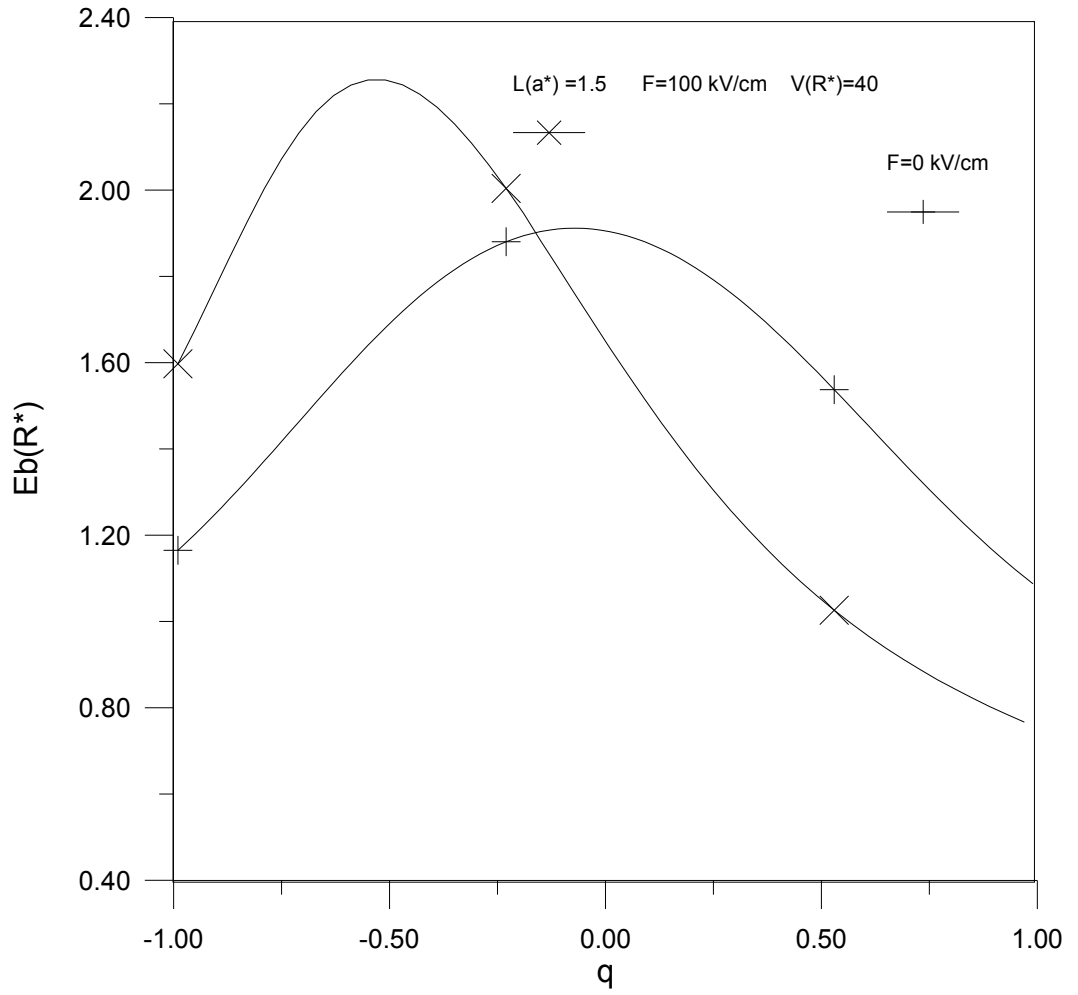
$$H_{42} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + \eta z$$

$$H_{43} = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{2}{\sqrt{\rho^2 + (z-zi)^2}} + V_0 + \eta z$$

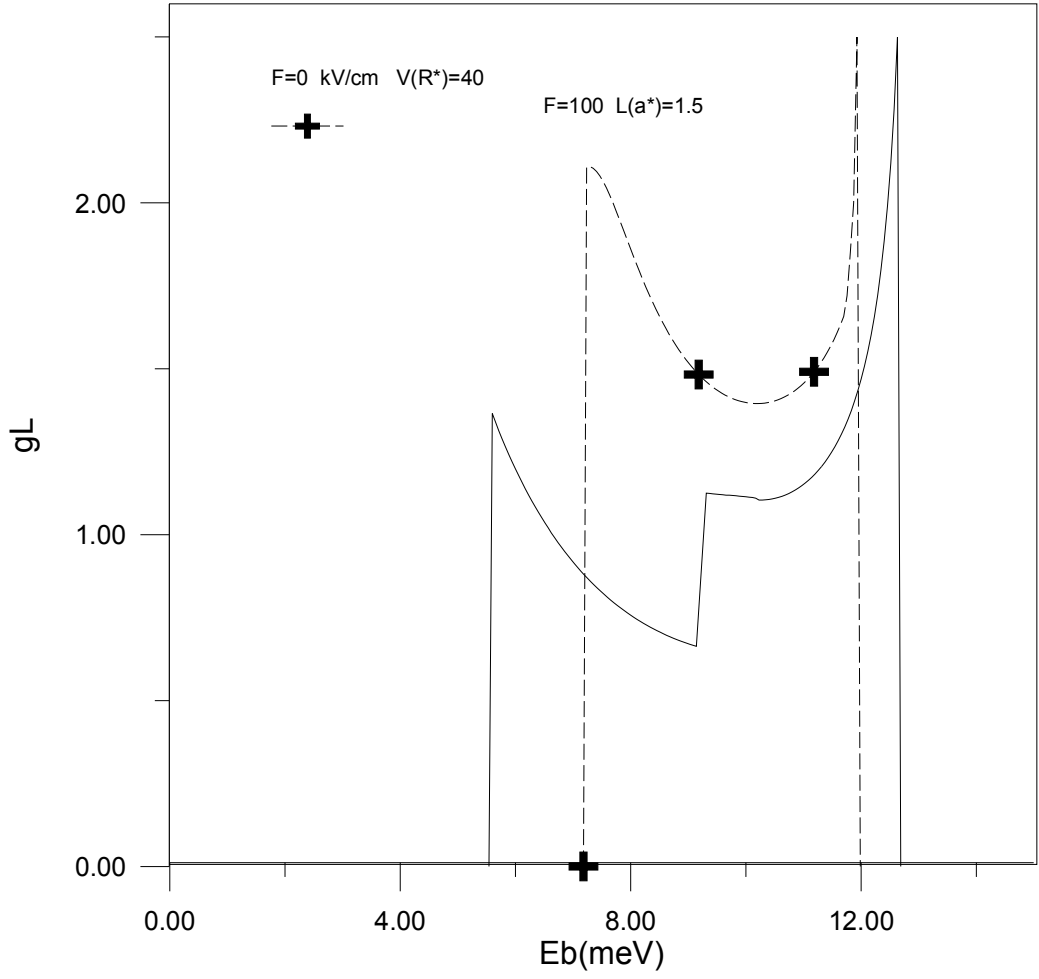
'dır.

GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda donör bağlanma enerjisi; Denklem (2.4.7) 'den hesaplandı. Donör bağlanma enerjisinin yabancı atomun konumuna ve elektrik alan şiddetine F(kV/cm) göre değişimleri Grafik 4.4.1, verildi Grafik 4.4.2 de durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve elektrik alan şiddeti F(kV/cm) artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz. Ayrıca elektrik alan şiddeti artıkça (F(kV/cm)) durum yoğunluğunu daha geniş donör bağlanma enerjisi aarlığında gözlemlemekteyiz.

Bu sonuçlar literatürle uyumludur[1,2,7,8.9,10,12,17]



Grafik 4.4.1: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için donör bağlanma enerjisinin ($E_b(R^*)$) yabancı atom konumuna göre değişimi, $V=40$ $R^*, L=1,5 a^*$



Grafik 4.4.2: Simetrik sonlu potansiyel engelli kuantum kuyusunda farklı elektrik alan şiddetleri (F (kV/cm)) için durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine ($E_b(R^*)$) göre değişimi, $F=0$ kV/cm, $F=100$ kV/cm, $V=40$ R*, $L=1,5$ a*

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada GaAs/AlAs sonsuz ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As sonlu kuantum kuyuları incelenmiştir. GaAs/AlAs sonsuz ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As sonlu kuantum kuyuları düzgün elektrik alanda, donör yabancı atom ve elektrik alanda incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada belirtilen durumlarda durum yoğunluğu incelenmiştir.

Grafik 2.1.1 'de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum subband enerjisinin kuyu genişliği ($L(a^*)$) artıkça azaldığını gözlemliyoruz. Grafik 2.2.1 'de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum subband enerjisinin, elektrik alan şiddeti ($F(\text{kV/cm})$) artıkça azaldığını gözlemliyoruz. Grafik 2.2.2 'de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun taban durum subband enerjisinin, elektrik alan şiddeti ($F(\text{kV/cm})$) artıkça azaldığını ve kuantum kuyu genişliği ($L(a^*)$) artıkça azaldığını gözlemliyoruz. Grafik 2.3.2 'de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun donör bağlanma enerjisinin, kuantum kuyusu genişliği ($L(a^*)$) artıkça azaldığını ve donör yabancı atomun kuantum kuyusu merkezinden uzaklaştıkça yabancı atomun donör bağlanma enerjisinin azaldığını gözlemlemekteyiz. Grafik 2.4.2 'de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun donör bağlanma enerjisinin, elektrik alan şiddeti alan şiddeti ($F(\text{kV/cm})$) artıkça azaldığını ve kuantum kuyu genişliği ($L(a^*)$) artıkça azaldığını gözlemliyoruz.

Grafik 3.3.1 'de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun donör bağlanma enerjisinin, donör yabancı atomun kuantum kuyusu merkezinden uzaklaştıkça yabancı atomun donör bağlanma enerjisinin azaldığını gözlemlemekteyiz. Grafik 3.4.3 'de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusuna hapsedilen bir elektronun donör bağlanma enerjisinin, elektrik alan şiddeti ($F(\text{kV/cm})$)

artıkça azaldığını ve donör yabancı atomun kuantum kuyusu merkezinden uzaklaştıkça donör bağlanma enerjisinin azaldığını gözlemlemekteyiz.

Grafik 4.1.3 ,Grafik 4.1.4' de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve kuantum kuyu genişliği artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz. Grafik 4.2.3 ve Grafik 4.2.4 de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve kuantum kuyu genişliği artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz. Grafik 4.3.2 ve Grafik 4.3.3 de GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve elektrik alan şiddeti F(kV/cm) artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz. Grafik 4.4.2 de GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda durum yoğunluğunun donör bağlanma enerjisine göre değişimi verilmiştir ve elektrik alan şiddeti F(kV/cm) artıkça durum yoğunluğunun azaldığını görmekteyiz.

Sonuç olarak; GaAs/AlAs Sonsuz kuantum ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyularında donör bağlanma enerjisi, kuantum kuyusu genişliği artıkça, elektrik alan şiddeti artıkça, yabancı atom kuyu merkezinden uzaklaştıkça azaldığını gözlemliyoruz.

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyularında, durum yoğunluğu, kuantum kuyusu genişliği artıkça, elektrik alan şiddeti artıkça, azaldığını gözlemliyoruz.

GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna kıyasla, elektrik alan şiddetindeki değişimi, yabancı atom konumundaki değişimi ve kuantum kuyusu genişliğindeki değişimi Ga/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusunda daha belirgin şekilde gözlemlemekteyiz.

Düzgün elektrik alanın GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusunda yapmış olduğu değişimi $L(a^*)=1$ ve daha geniş kuyularda görmekteyiz. GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyusundaysa, GaAs/AlAs Sonsuz kuantum kuyusuna nispeten daha dar kuyularda görmekteyiz.

Düzgün Elektrik alan varlığında GaAs/AlAs Sonsuz kuantum ve GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As Sonlu kuantum kuyularında kuantum kuyu merkezine göre simetri bozulmaktadır. Düzgün Elektrik alan yokluğunda, donör yabancı atom varlığında kuantum kuyu merkezine göre simetri mevcuttur.

Sonuçlar literatürlerle uyumludur.

KAYNAKLAR

- [1.] BASTARD G.,” *Hydrogenic impurity states in a quantum well: A simple model*”, Phy.Rev.B, Vol 24, Num.8, s.4714-4722, 1981
- [2.] AKBAŞ H. ,EKMEKÇİ S., AKTAS Ş., TOMAK M.,” *Hydrogenic impurities in quantum wells under electric field*” , Turkish Jou.Phy., V.17, p.974-980, 1993.
- [3.] HAN C.S., HSIEH Y.C., “*The binding energy of hydrogenic impurities in quantum well structures under electric fields*”, Phy. Rev.B , 179 (1992) 355-368 1992
- [4.] AKBAŞ H., EKMEKÇİ S.,AKTAS Ş.,TOMAK M., “*Electric field effect on shallow impurity states in multiple quantum-well structure*”, Turkish Jou.Phy.,V19, 381.,1995.
- [5.] AKBAŞ H., AKTAS Ş.,TOMAK M., “*Shallow impurities in asymmetric quantum wells under an electric fields*”, Turkish Jou.Phy., V.21, p.1073- 1080, 1997
- [6.] AKBAŞ H. ,OKAN Ş.E. ,AKTAŞ Ş.,ULAŞ M., TOMAK M. ,” *Screening effecton the binding energies of donors, acceptors and excitions in finite-barrier quantum wells*” Supperlattices and Microstructures, 23, 113-119, 1998.
- [7.] OLIVEIRA L. E. , FALICOV. L. M. ,”*Energy spectra of donors and acceptors in quantum-well structures:Effect of spatially dependent screening*” Phy.Rev.B, Vol 34, Num.12, s.8676-8683, 1983
- [8.] WEBER G.”*Density of states and optical-absorption spectra of shallow impuritiesin quantum wells under the influence of a longitudinal electric field*” Phy.Rev.B, Vol 41, Num.14, s.10043-10048, 1990

- [9.] LOPEZ-GONDAR J. ,CASTRO J.D., OLIVEIRA L. E.” *Electric-Field Effects On Shallow Impurity States In GaAs-(Ga, Al)As Quantum Wells* ” Phy.Rev.B, Vol 42, Num.11, S.7069-7077, 1990
- [10.] AKTAS Ş., OKAN Ş.E. , ERDOĞAN İ., AKBAŞ H., TOMAK M., “*Donor binding energies in GaAs quantum wells considering the nonparabolicity effects and the wave function elongation*” ,Supperlattices and Microstructures, 28, 165-169, 2000.
- [11.] AKTAS Ş., OKAN Ş.E., AKBAŞ H., “*Electric field effect on the binding energy of a hydrogenic impurity in coaxial GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well-wires*” Supperlattices and Microstructures, 30(3),129-134,2001
- [12.] BASTARD G., MENDEZ E.E., CHANG L.L., ESAKI L., “*Variational calculations on quantum well in an electric field*”, Phy.Rev.B, Vol 28, Num.6, s.3241, 1983.
- [13.] BETANCUR F.J., MIKHAULOV I.D., “*Simple trial function shallow donor states in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum-well-structures*”, Phy.Rev.B , Vol 51, Num.8,s.4982, 1994.
- [14.] BRUM J.A., PRIESTER C., ALLON G., “*Electric field dependence of binding energy of shallow donors in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum wells*”, Phy.Rev.B, Vol 32, Num.4, s.2378, 1985.
- [15.] CAI M., LIU W., “*Binding energy of impurities in asymmetric quantum wells with longitudinal electric field*”, Physica B 172 429-434, 1991.
- [16.] CHAUDHURI S., “*Hydrogenic-impurity ground state in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs multiple-quantum well structures*”, Phy.Rev.B, Vol 28, Num.8, s.4480, 1983
- [17.] EL-SAID M., TOMAK M., “*Polarizabilities of shallow donors in quantum wells*”, Phys.Rev.B., Vol.42, Num.5., p.3129, 1990
- [18.] Mendez. E. E, Bastard G , Chang L. L., Esaki L. Morkoc H., Fischer R.“*Effect of an electric field on the luminescence of GaAs quantum wells*” ,Phys. Rev.B 26, 7101 .1982.
- [19.] ILAIWI K.F., TOMAK M., “*Electron polarization in quantum wells with uniform electric field*”, Phys.stat.sol.(b)166, 409,1991.
- [20.] BEKİR KARAOĞLU ., “*Kuantum Mekaniğine Giriş*”, 2, s62, Bilgitek yayıncılık, İstanbul, 1994

- [21.] MILLER R.C., KLEINMAN D.A., GASSARD A.C., “*Energy gap discontinuities masses for GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum wells*”, Phys.Rev.B., Vol.29, Num.12., pp.7085, 1984.
- [22.] YAMAN O. “*Kuantum kuyu ve tellerinde hapsedilen elektronun özellikleri elektrik alan ve yabancı atom etkileri*” Yüksek lisans tezi, Edirne, 2010
- [23.] BOZ F.K” *Düşük Boyutlu Yapılarda Yabancı Atom Problemi ve Eksitonlar*” Doktora Tezi, Edirne, 2005,
- [24.] KİTTELC.,(Ç:BEKİR KARAOĞLU), “*Katıhal Fizikine Giriş*”, Bilgitekyayıncılık, 6. Basım, 224, İstanbul 1996.
- [25.] OKAN Ş.E., AKTAŞ Ş., AKBAŞ H., TOMAK M., “*The exciton transition energies in symmetric double GaAs/GaAlAs quantum wells*”, Phys.stat.sol.(b), 212, 263-270,1999.
- [26.] OKAN Ş.E., AKBAŞ H., AKTAŞ Ş., TOMAK M., “*Binding energies of helium like impurities in parabolic quantum wells*” Supperlattices and Microstructures, 28, 171-176, 2000.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İstanbul Güngören ilçesinde doğdum. İlk ve orta öğrenimimi 700. Yıl Osmangazi İlköğretim Okulunda tamamladım, lise öğrenimimi Orhan Cemal Fersoy Lisesinde tamamladım.2007 yılında Trakya Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde eğitimime başladım, eğitimimi 2011 yılında tamamladım.2011 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında yüksek lisansa başladım.