**T.C**

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KUANTUM NOKTALARININ UYARILMIŞ DURUM ÇÖZÜMLERİNDE GEÇİŞ ENERJİLERİNİN HESAPLANMASI

**UĞUR SOYKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK ANA BİLİMDALI**

**Danışman: Doç. Dr. Ali İhsan MEŞE**

**EDİRNE – 2024**

**Uğur SOYKAN'**nın hazırladığı "**KUANTUM NOKTALARININ UYARILMIŞ DURUM ÇÖZÜMLERİNDE GEÇİŞ ENERJİLERİNİN HESAPLANMASI"** başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Fizik** Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Prof. Dr. İlhan ERDOĞAN

Doç. Dr. Ali Ihsan MEŞE

Doç. Dr. Deniz EKŞİ

Tez Savunma Tarihi: 18/10/2024

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Ali İhsan MEŞE İmza

Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı.

……

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Filiz UMAROĞULLARI

**T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**DOĞRULUK BEYANI**

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir çizelgede kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

18/ 10 /2024

Uğur SOYKAN

Yüksek Lisans Tezi

Kuantum Noktalarının Uyarılmış Durum Çözümlerinde Geçiş Enerjilerinin Hesaplanması

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

# ÖZET

Son zamanlarda teknolojideki hızlı gelişmeler sayesinde nanometre(nm) ölçekli iki boyutlu (kuantum kuyuları), tek boyutlu (kuantum telleri) ve sıfır boyutlu (kuantum noktaları) kuantum mekaniksel sistemler olarak tanımlanan düşük boyutlu yapıların üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Düşük boyutlu yapıların, transistör, sensör, lazer, ve fotodedektör yapımında kullanılması gibi geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Bu yapıların geliştirilmesi, anlaşılması ve kontrol edilmesi, nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanlarında teknolojik yenilikler için kritik öneme sahip olacaktır. Bununla birlikte, düşük boyutlu yapıların optik ve elektronik özelliklerinin belirlenmesinde kuantum geçiş enerjileri önemli bir rol oynar. Kuantum geçiş enerjileri, bir kuantum sisteminde, bir parçacığın bir enerji seviyesinden başka bir enerji seviyesine geçişi sırasında gereksinim duyduğu veya saldığı enerjiyi ifade eder. Bu geçişler, kuantum mekaniğinin temel ilkeleri tarafından tanımlanır ve enerji seviyeleri arasındaki fark, geçiş enerjisini belirler.

Bu nedenle çalışmanın temel amacı, etkin kütle yaklaşıklığı altında, küresel kuantum noktasında, taban durum (1s) ve uyarılmış durum(1p) için sistemin hamiltonyeni, subband ve yabancı atom dalga fonksiyonlarını tanımlamak ve bağlanma enerjilerini varyasyon yöntemi kullanılarak bulmaktır. Taban ve uyarılmış durum bağlanma enerjileri farkı olarak tanımlanan geçiş enerjileri kuantum noktanın yarıçapına bağlı değişimi farklı alüminyum konsatrasyonu ve sıcaklık değerleri için hesaplanmıştır. Subband ve impurity geçiş enerjilerinin alüminyum konsantrasyonu ve sıcaklık ile

ilişkisini ortaya koyması planlanan bu çalışma, benzer sistemler üzerine yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara kaynak oluşturacaktır.

Yıl :2024

Sayfa Sayısı :62

Anahtar Kelimeler: Geçiş enerjisi, küresel kuantum nokta, yabancı atom, varyasyon yöntemi

Master Thesis

Calculation of Transition Energies in Excited State Solutions of Quantum Dots

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Physics

# ABSTRACT

Recently, thanks to rapid developments in technology, it has become possible to produce low-dimensional structures defined as nanometer (nm) scale two-dimensional (quantum wells), one-dimensional (quantum wires) and zero-dimensional (quantum dots) quantum mechanical systems. Low-dimensional structures have a wide range of applications, such as their use in the construction of transistors, sensors, lasers and photodetectors. Developing, understanding and controlling these structures will be critical for technological innovations in the fields of nanotechnology and materials science. However, quantum transition energies play an important role in determining the optical and electronic properties of low-dimensional structures. Quantum transition energies express the energy required or released by a particle during its transition from one energy level to another in a quantum system. These transitions are described by the fundamental principles of quantum mechanics, and the difference between the energy levels determines the transition energy.

Therefore, the main purpose of the study is to define the hamiltonian, subband and impurity atom wave functions of the system for the ground state (1s) and excited state (1p) in the spherical quantum dot under the effective mass approximation and to find the binding energies using the variation method. Transition energies, defined as the difference between ground and excited state binding energies, depending on the radius of the quantum dot, were calculated for different aluminum concentrations and temperature values. This study, which is planned to reveal the relationship between subband and

impurity transition energies with aluminum concentration and temperature, will be a source for experimental and theoretical studies on similar systems.

Year : 2024

Number of Pages : 62

Keywords : Transition energy, spherical quantum dot, impurity atom, variation method

# TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarımda her zaman yanımda olan, bana yol gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, tez danışmanım sayın Doç. Dr. Ali İhsan MEŞE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim sırasında bana fizikle ilgili sayısız kavram ve faydalı tartışmaları öğretme çabası içinde bilgisini benimle paylaşan, bana zaman ayıran, yol gösteren ve emeğini üzerimden eksik etmeyen çok değerli hocalarım sayın Prof. Dr. İlhan ERDOĞAN'a ve sayın Prof. Dr. Aydın ULUBEY'e çok teşekkür ediyorum.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... iv
ABSTRACT ..... vi
TEŞEKKÜR ..... viii
İÇİNDEKİLER ..... ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... xi
ŞEKİL LİSTESİ ..... xiii
ÇİZELGE LİSTESİ ..... xv
BÖLÜM 1 ..... 1
GİRİŞ ..... 1
1.1 Yarı İletkenler ve Tarihsel Gelişimi ..... 1
1.2 Heteroyapılar ve Özellikleri ..... 2
1.2.1 Heteroyapı Üretim Teknikleri ..... 3
1.3 Düşük boyutlu Yapılar ..... 4
1.3.1. Kuantum Kuyusu ..... 4
1.3.2. Kuantum Telleri ..... 6
1.3.3. Kuantum Noktaları ..... 7
1.4 Heteroyapıların Teorik Hesabında Kullanılan Yöntemler ..... 8
1.5 Düşük Boyutlu Yapılarda Schrödinger Denkleminin Çözümü ve Varyasyon Yöntemi ..... 9
1.5.1 Etkin Kütle ..... 11
1.5.2 Yabancı Atom (İmpurity) ..... 11
1.5.3 Hetero yapılarda Bağlanma Enerjisi ..... 12
1.5.4 Geçiş Enerjisi ..... 19

BÖLÜM 2 ..... 23
TEORİ ..... 23
BÖLÜM 3 ..... 27
SONUÇLAR VE TARTIŞMA ..... 27
KAYNAKLAR ..... 43
ÖZGEÇMİŞ ..... 47

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1s: Taban Durum

1p: Uyarılmış Durum

$\hbar = h/2\pi$ ( h Planck sabiti)

$\nabla^2$= Laplace operatörü

$\psi(r) =$ dalga fonksiyonu

$H_{sub}^{T} =$ Taban durum Hamiltonyeni

R= Küresel Kuantum noktanın yarıçapı

$E^{trans}(nlm - n'l'm')$= Geçiş Enerjisi

$m^{*T} =$ etkin kütle

$V^{T}(r,x) =$ Sınırlandırma Potansiyeli

$E_g^{\Gamma}(T)$ = Γ noktasında GaAs yapısı için sıcaklığa bağlı enerji bandı aralığı

$\Delta E_g^{\Gamma T}(x)$= GaAs ve $Ga_{1-x}Al_xAs$ arasındaki toplam band aralığı enerji farkı

$R_{1s}^{subT}(r) =$ Radyal Dalga Fonksiyonu

$N_{1si}^{subT}$ ve $N_{1s0}^{subT}$ = Normalizasyon sabitleri

$E_{1s}^{subT}$= Sıcaklığa bağlı taban durum(1s) subband enerjisi

$E_{1p}^{subT}$= Sıcaklığa bağlı uyarılmış durum(1p) subband enerjisi

$E_{sub1p1s}^{tranT} =$ Sıcaklığa bağlı altbantlar arası geçiş enerjisi

$\epsilon^{T}$= GaAs malzemenin dielektrik sabiti

$H_{imp}^{T} =$ Yabancı atom varlığında Hamiltonyen

$\psi_{1s}^{imT}(r, r_i)$ = Taban durum yabancı atom dalga fonksiyonu

$\psi_{1p}^{imT}(r, r_i)$ = Uyarılmış durum yabancı atom dalga fonksiyonu

$r_i$ = Yabancı atom konumu

$E_{1s}^{imT}$ = Yabancı atom taban durum enerjisi

$E_{1p}^{imT}$ = Yabancı atom uyarılmış durum enerjisi

$E_{im1p1s}^{tranT}$ = Yabancı atom geçiş enerjisi

$E_{b1s}^{T}$ = Taban durum bağlanma enerjisi

$E_{b1p}^{T}$ = Uyarılmış durum bağlanma enerjisi

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 1.1.** Bir yarı iletkende bir donörün şematik gösterimi ..... 12
**Şekil 1.2.** Kuantum kuyusu genişliğinin donör dalga fonksiyonu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi. ..... 13
**Şekil 1.3.** Donör konumunun dalga fonksiyonu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi 13
**Şekil 1.4.** Varyasyon parametrenin bir fonksiyonu olarak elektronun toplam enerjisinin bulunması ..... 14
**Şekil 1.5.** Bağlanma enerjisinin kuyu genişliğine göre farklı basınç değerleri için değişimi ..... 15
**Şekil 1.6.** Kuantum kuyusunda bağlanma enerjisinin yabancı atom konumuna göre farklı manyetik alan değerleri için değişimi ..... 16
**Şekil 1.7.** Kuantum telinde bağlanma enerjisinin tel yarıçapına göre değişimi ..... 17
**Şekil 1.8.** Farklı yapılardaki kuantum tellerinin bağlanma enerjisinin tel uzunluğuna göre değişimi ..... 18
**Şekil 1.9.** Kuantum noktasında bağlanma enerjinin elektrik alan şiddetine bağlı değişimi ..... 19
**Şekil 3.1.** Küresel kuantum noktasında bulunan bir elektronun 1s ve 1p subband enerjilerinin farklı alüminyum konsantrasyonları için yarıçapa bağlı değişimi ..... 30
**Şekil 3.2.** Subband geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi ..... 31
**Şekil 3.3.** Subband geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları ve sıcaklık için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi. ..... 32
**Şekil 3.4.** Taban durum bağlanma enerjisinin kuantum nokta yarıçapına göre sıcaklığın T=0 ve T=300K değerleri için değişimi ..... 33
**Şekil 3.5.** Küresel kuantum noktasında bulunan bir yabancı atomun 1s ve 1p impurity enerjilerinin farklı alüminyum konsantrasyonları için yarıçapa bağlı değişimi ..... 36

**Şekil 3.6.** Yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi ..... 37
**Şekil 3.7.** T=0, 300K değerleri için yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi. .. 38
**Şekil 3.8.** Yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı yabancı atom konumu için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi ..... 40
**Şekil 3.9.** Uyarılmış durum bağlanma enerjisinin kuantum nokta yarıçapına göre sıcaklığın T=0 ve T=300K değerleri için değişimi ..... 41

# ÇİZELGE LİSTESİ

**Çizelge 1**. İzinli enerji geçiş kombinasyonları.....21

**Çizelge 2.** Taban durum(1s) subband enerji sonuçların literatürle karşılaştırması.....28

**Çizelge 3.** Uyarılmış durum (1p) subband enerji sonuçların literatürle karşılaştırması .29

**Çizelge 4**. Taban durum(1s) yabancı atom(impurty) enerji sonuçlarının literatürle karşılaştırması. .....34

**Çizelge 5.** Uyarılmış durum(1p) yabancı atom(impurty) enerji sonuçların literatürle karşılaştırması. .....35

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

## 1.1 Yarı İletkenler ve Tarihsel Gelişimi

Yarı iletkenler, elektrik iletkenliği bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında yer alan malzemelerdir. Bu malzemeler, belirli koşullar altında elektrik akımını iletebilirken, diğer koşullarda yalıtkan gibi davranırlar. En yaygın yarı iletken malzeme, silisyumdur. Yarı iletkenlerin elektrik iletkenliği, sıcaklık, ışık ve safsızlık (dopant) gibi dış etkenlerle kontrol edilebilir.

- **İletkenlik:** Yarı iletkenler, belirli bir enerji aralığında serbest elektronlar ve deliklerle elektrik akımını iletebilir.
- **Enerji Bandı:** Yarı iletkenlerde valans bandı ve iletkenlik bandı arasında bir yasak enerji bandı bulunur. Bu bandın genişliği, malzemenin türüne göre değişir.
- **Doping:** Yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri, içine eklenen doping maddeleriyle (n-tip veya p-tip) modifiye edilebilir.

Yarı iletkenlerin keşfi ve anlaşılması, 19. yüzyılın sonlarına ve 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. İlk önemli adım, Alman fizikçi Ferdinand Braun tarafından 1874 yılında, kristal dedektörler üzerinde yaptığı çalışmalarda atıldı. Braun, metal ve yarı iletken arasında bir temas noktasında doğrultucu etkiyi keşfetti (Braun, 1874).

1920'lerde, John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley, Bell Laboratuvarları'nda yaptıkları çalışmalarla yarı iletkenlerin modern anlamda kullanımını başlattılar. Bu üç bilim insanı, 1947 yılında ilk transistörü icat ederek elektronik devrimini başlattılar. Transistörler, vakum tüplerinin yerini alarak daha küçük, daha verimli ve daha dayanıklı elektronik cihazların yapılmasını mümkün kıldı (Bardeen ve Brattain, 1948).

1950'lerin sonlarında, Jack Kilby ve Robert Noyce, bağımsız olarak entegre devreleri (IC) geliştirdiler. Bu teknolojinin ortaya çıkışı, elektronik cihazların boyutunu küçülttü ve performansını artırdı. Entegre devrelerin kullanımı, mikroelektroniğin temellerini attı ve bilgisayar teknolojisinin gelişiminde önemli bir rol oynadı (Roup and Kilby,1956).

Günümüzde yarı iletken teknolojisi, nanoteknoloji ile birleşerek daha da ileri seviyelere taşınmıştır. 2000'li yıllarda, nanometre ölçekli transistörler geliştirilmiş ve bu sayede işlemcilerin hızları ve kapasiteleri katlanarak artmıştır. Nanoteknoloji sayesinde, yarı iletkenler daha küçük boyutlarda ve daha yüksek performansta üretilebilmektedir (Nouailhat, A., 2007).

## 1.2 Heteroyapılar ve Özellikleri

Heteroyapı, iki veya daha fazla farklı yarı iletken malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Bu yapılar, farklı band aralığı, elektronik özellikler veya kristal yapıları olan malzemelerin birleşiminden oluşur. Heteroyapılar, özellikle yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazlarda kullanılır.

- **Band Aralığı Mühendisliği:** Farklı yarı iletken malzemelerin birleştirilmesiyle, cihazların band aralığı ve elektronik özellikleri optimize edilebilir.
- **Elektriksel ve Optik Özellikler:** Heteroyapılar, düşük gürültü, yüksek hız ve verimlilik gibi üstün elektriksel ve optik özellikler sunar.
- **Kuantum Kuyusu ve Süper Izgara Yapıları:** Heteroyapılar, kuantum kuyusu ve süper ızgara yapıları gibi ileri düzey nanoyapılar oluşturmak için kullanılır.

Heteroyapıların geliştirilmesi, 1950'li yıllarda yarı iletken teknolojisinin ilerlemesiyle başlamıştır. İlk heteroyapılar, Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) gibi basit yarı iletkenler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu dönemde, heteroyapıların temel prensipleri ve özellikleri araştırılmıştır (Smith, 1959).

1970'lerde, AlGaAs/GaAs heteroyapıları, yüksek elektron hareketliliği transistörleri (HEMT) ve kuantum kuyusu lazerleri gibi ileri teknoloji cihazlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde, Herbert Kroemer ve Zhores Alferov gibi bilim insanları, heteroyapı teknolojisinin temellerini atmış ve bu alandaki çalışmalarından dolayı 2000 yılında Nobel Fizik Ödülü kazanmışlardır (Nobel Prize, 2000).

1980'lerden itibaren, InGaAs/InP, AlGaN/GaN gibi daha kompleks heteroyapılar geliştirilmiştir. Bu yeni nesil heteroyapılar, telekomünikasyon, güç elektroniği ve yüksek frekanslı cihazlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle GaN tabanlı heteroyapılar, yüksek güç ve yüksek frekans performansı nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Mishra et al., 2008).

### 1.2.1 Heteroyapı Üretim Teknikleri

Heteroyapılar, farklı yarı iletken malzemelerin kontrollü bir şekilde bir araya getirilmesiyle üretilir. Bu süreç, yüksek hassasiyet ve ileri teknoloji gerektirir. En yaygın kullanılan heteroyapı üretim teknikleri arasında moleküler ışın epitaksisi (MBE), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) bulunur.

- **Moleküler Işın Epitaksisi (MBE)**

Moleküler ışın epitaksisi, yüksek vakum ortamında gerçekleştirilen bir ince film büyütme tekniğidir. Bu yöntemde, saf yarı iletken elementleri buharlaştırılarak, atomik düzeyde hassasiyetle hedef yüzeye biriktirilir.

Yüksek Saflık: MBE, çok yüksek saflıkta malzeme biriktirilmesine olanak tanır.

Atomik Hassasiyet: Bu teknik, atomik düzeyde hassasiyet sağlar ve çok ince katmanlar oluşturabilir.

Düşük Sıcaklık: Genellikle düşük sıcaklıklarda çalışır, bu da termal hasarı minimize eder.

Kuantum Kuyuları: MBE, kuantum kuyusu ve süper ızgara yapılarının üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Yüksek Elektron Hareketliliği Transistörleri (HEMT): MBE, HEMT üretiminde tercih edilen bir yöntemdir.

- **Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)**

Kimyasal buhar biriktirme, gaz fazındaki öncül maddelerin kimyasal reaksiyona girerek katı bir malzeme birikmesine neden olduğu bir tekniktir. Bu teknik, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir ve yüksek kaliteli ince filmler üretebilir.

Yüksek Kaplama Hızı: CVD, hızlı kaplama yapabilme özelliğine sahiptir.

Geniş Malzeme Yelpazesi: Çok çeşitli malzemelerin biriktirilmesine imkan tanır.

Kontrollü Büyüme: Film kalınlığı ve bileşimi hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

Mikroelektronik: Yarı iletken cihazların ve entegre devrelerin üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Optoelektronik: LED ve lazer diyotların üretiminde tercih edilir.

- **Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD)**

Metal-organik kimyasal buhar biriktirme, metal-organik bileşiklerin gaz fazında taşınarak, hedef yüzeyde kimyasal reaksiyonla biriktirildiği bir CVD türüdür. MOCVD, özellikle III-V yarı iletkenlerin büyütülmesinde yaygın olarak kullanılır.

Yüksek Kalite: Yüksek kristal kalitesine sahip ince filmler üretir.

Karmaşık Yapılar: Karmaşık heteroyapılar ve çok katmanlı yapılar oluşturabilir.

Endüstriyel Ölçek: Yüksek üretim kapasitesi ve ölçeklenebilirlik sağlar.

Telekomünikasyon: Yüksek hızlı optoelektronik cihazların üretiminde kullanılır.

Yüksek Frekanslı Cihazlar: GaN tabanlı yüksek frekanslı cihazların üretiminde tercih edilir.

## 1.3 Düşük boyutlu Yapılar

Kuantum kuyuları, telleri ve noktaları gibi düşük boyutlu yapılar, parçacıkların hareketinin bir, iki veya iki uzaysal boyutla sınırlı olduğu sistemlerdir. Boyuttaki bu sınırlandırma yapıların fiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Kuantum hapsedilmesi ve ayrı enerji seviyelerinin ortaya çıkması gibi kuantum etkileri, malzemelerin elektronik, optik ve manyetik davranışlarını etkileyerek baskın bir rol oynar. Düşük boyutlu yapılar, nanoelektronik, fotonik ve kuantum hesaplama gibi alanların ilerlemesinde çok önemlidir ve sensörler, transistörler ve yeni nesil enerji depolama cihazlarında uygulamalarla son derece verimli ve özelleştirilebilir malzemeler tasarlamak için yeni imkanlar sunmaktadır.

### 1.3.1. Kuantum Kuyusu

Kuantum kuyusu, yarı iletken malzemelerde elektronların hareket özgürlüğünün bir boyutta sınırlanarak diğer iki boyutta serbest bırakıldığı nanoyapılardır. Bu yapılar,

bir yarı iletken katmanın daha geniş band aralığına sahip bir başka yarı iletken katmanın arasında sandviçlenmesiyle oluşturulur. Kuantum kuyuları, elektronik ve optoelektronik cihazlarda kritik öneme sahiptir.

Enerji Seviyeleri: Elektronların ve deliklerin enerji seviyeleri, kuantum mekaniği kurallarına göre ayrık hale gelir.

Optik Özellikler: Kuantum kuyuları, lazer diyotlar ve LED'ler gibi optoelektronik cihazların verimliliğini artırır.

Elektronik Özellikler: Kuantum kuyuları, yüksek hareketliliğe sahip transistörlerin performansını artırır.

Kuantum kuyusunun temel prensipleri, 1960'ların sonlarında ve 1970'lerin başlarında teorik olarak önerilmiştir. L. Esaki ve R. Tsu, 1970 yılında yayınladıkları makalede, kuantum kuyularının ve süper ızgara yapıların elektronik özelliklerini incelemişlerdir (Esaki & Tsu, 1970).

1970'lerin sonlarında, Arthur Gossard ve çalışma arkadaşları, moleküler ışın epitaksisi (MBE) kullanarak ilk kuantum kuyusu yapılarını üretmişlerdir. Bu deneysel çalışmalar, kuantum kuyularının pratikte gerçekleştirilebileceğini göstermiştir (Gossard et al., 1977).

Kuantum kuyuları üzerindeki çalışmalar, Herbert Kroemer ve Zhores Alferov'un bağımsız araştırmaları sayesinde büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bu iki bilim insanı, kuantum kuyularının optoelektronik cihazlardaki uygulamaları üzerine yaptıkları çalışmalardan dolayı 2000 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir (Nobel Prize, 2000).

Günümüzde kuantum kuyuları, telekomünikasyon, bilgi işlem ve enerji üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek verimli lazerler, kuantum nokta solar hücreler ve yüksek hızlı transistörler gibi ileri teknoloji cihazlarda kuantum kuyuları önemli rol oynamaktadır (Vahala, 2003).

Kuantum kuyuları, yarı iletken teknolojisinde devrim niteliğinde yenilikler sunmuştur. Elektronların ve deliklerin kuantum mekaniğine uygun olarak sınırlanması, cihazların performansını ve verimliliğini artırmaktadır. Kuantum kuyuları sayesinde,

daha hızlı, daha verimli ve daha küçük elektronik ve optoelektronik cihazlar geliştirilebilmektedir.

### 1.3.2. Kuantum Telleri

Kuantum telleri, boyutlarından biri nanometre ölçeğinde olan ve elektron hareketliliğinin iki boyutla sınırlı olduğu nanoyapılardır. Bu yapıların elektronik ve optik özellikleri, kuantum mekaniksel etkiler nedeniyle klasik yapılardan farklıdır. Kuantum telleri, yüksek verimli elektronik cihazlar, fotonik uygulamalar ve kuantum hesaplama gibi çeşitli alanlarda büyük önem taşır.

Kuantum Sınırlama Etkisi: Elektronlar, kuantum teli boyunca serbestçe hareket edebilirken, diğer iki boyutta hareketleri sınırlıdır. Bu sınırlama, enerji seviyelerinin diskret hale gelmesine neden olur.

Yüksek Elektron Hareketliliği: Kuantum telleri, elektron hareketliliğini artırabilir ve bu da yüksek hızlı elektronik uygulamalarda avantaj sağlar.

Optik Özellikler: Kuantum telleri, ışık emilimi ve yayılımında benzersiz özelliklere sahiptir ve bu da fotonik cihazlarda kullanılmalarını mümkün kılar.

Kuantum telleri kavramı, 1980'lerin sonlarında ve 1990'ların başlarında ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar, katı hal fiziği ve yarı iletken teknolojisinin ilerlemesiyle başlamıştır. Bu dönemde, heteroyapılar ve moleküler ışın epitaksisi (MBE) gibi teknikler kullanılarak kuantum telleri oluşturulmuştur (Fasol, 1990).

1990'ların sonlarında ve 2000'lerin başında, kuantum tellerinin üretiminde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) teknikleri, yüksek kalitede ve kontrollü kuantum tellerinin üretilmesini sağlamıştır (Lieber, 2003). Bu dönemde, kuantum telleri tabanlı transistörler ve lazerler gibi cihazlar geliştirilmiştir.

Günümüzde kuantum telleri, nanoteknoloji ve kuantum hesaplama alanlarında büyük önem taşımaktadır. Kuantum hesaplama için kuantum bitlerinin (qubit) oluşturulmasında ve fotonik uygulamalarda kuantum ışık kaynakları olarak kullanılmaktadırlar (Hanson, 2007). Ayrıca, biyosensörler ve enerji hasat cihazları gibi yeni nesil uygulamalarda da kuantum telleri kullanılmaktadır.

Kuantum telleri, yüksek hızlı ve düşük güç tüketimli elektronik cihazlar üretmek için kullanılır. Ayrıca, benzersiz optik özellikleri sayesinde lazerler, LED'ler ve fotodetektörler gibi fotonik cihazlarda da yaygın olarak kullanılır.

Kuantum telleri, kuantum bitlerinin oluşturulmasında kullanılarak kuantum bilgisayarların geliştirilmesine katkıda bulunur. Bu teller, spin-kübit ve topolojik kübit gibi farklı kuantum bilgi işlem yaklaşımlarında kritik bir rol oynar (Loss ve DiVincenzo, 1998).

Kuantum telleri, biyolojik moleküllerin algılanmasında yüksek hassasiyet sunan biyosensörler ve güneş enerjisinin daha verimli bir şekilde toplanmasını sağlayan enerji hasat cihazları gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır.

### 1.3.3. Kuantum Noktaları

Kuantum noktaları, nanometre boyutlarında yarı iletken kristallerdir. Bu nanokristaller, üç boyutta kuantum sınırlamaları gösterir ve bu özellikleri sayesinde benzersiz elektronik ve optik özelliklere sahiptirler. Kuantum noktaları, genellikle 2 ila 10 nanometre çapında olur ve boyutlarına bağlı olarak ışığı farklı dalga boylarında emebilir ve yayabilirler. Bu boyutsal sınırlama, kuantum noktalarına özgü optik ve elektronik davranışlar kazandırır.

Boyutla Ayarlanabilir Özellikler: Kuantum noktalarının optik ve elektronik özellikleri, boyutları değiştirilerek ayarlanabilir. Küçük kuantum noktaları, daha kısa dalga boylarında (mavi) ışık yayarken, daha büyük kuantum noktaları daha uzun dalga boylarında (kırmızı) ışık yayar.

Yüksek Parlaklık ve Stabilite: Kuantum noktaları, yüksek parlaklık ve kimyasal stabilite sunar.

Geniş Uygulama Alanı: Tıbbi görüntüleme, LED'ler, güneş hücreleri ve biyosensörler gibi birçok alanda kullanılırlar.

Kuantum noktalarının keşfi, 1980'li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak, Louis Brus tarafından 1983 yılında kolloid kimya kullanılarak kuantum noktalarının sentezlendiği rapor edilmiştir (Brus, 1984). Brus, CdS nanokristallerinin kuantum boyut etkilerini gösteren ilk çalışmaları gerçekleştirmiştir.

1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında, Alexei Ekimov ve Alexander Efros gibi bilim insanları, kuantum noktalarının teorik temellerini daha da geliştirmişlerdir. Ekimov ve Efros, kuantum sınırlama etkilerini ve bu nanokristallerin optik özelliklerini açıklayan önemli çalışmalar yapmışlardır (Ekimov et al., 1985).

2000'li yılların başından itibaren, kuantum noktaları ticari ürünlerde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle, biyomedikal görüntüleme ve ekran teknolojilerinde önemli bir rol oynamışlardır. 2010'larda, kuantum nokta tabanlı LED'ler (QLED) ve güneş panelleri gibi ileri teknoloji uygulamaları hızla gelişmiştir.

Günümüzde kuantum noktaları, nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanında büyük bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Gelişen üretim teknikleri ve yeni malzemelerle, kuantum noktalarının verimliliği ve uygulama alanları sürekli genişlemektedir.

## 1.4 Heteroyapıların Teorik Hesabında Kullanılan Yöntemler

Heteroyapıların teorik hesabında kullanılan yöntemler, malzemenin elektronik, optik ve yapısal özelliklerini anlamak ve modellemek amacıyla geliştirilmiştir. Bu hesaplamalar, heteroyapının içerdiği farklı malzemelerin sınırlarında meydana gelen kuantum ve manyetik etkileri anlamada önemli rol oynar. Aşağıda bu hesaplamalarda kullanılan başlıca teorik yöntemler listelenmiştir:

- Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (Density Functional Theory - DFT):

Heteroyapıların elektronik yapısını ve enerji bant yapısını incelemek için yaygın olarak kullanılır. DFT, sistemdeki elektronların yoğunluğunu kullanarak çok elektronlu sistemleri çözer.

- Ab initio (İlk Prensip) Yöntemleri:

Elektronların davranışlarını tahmin etmek için herhangi bir deneysel parametreye ihtiyaç duymadan tamamen teorik modellemeler yapılır. DFT ve GW (Green’s function) teorisi gibi yöntemlerle kombinlenir.

- Moleküler Dinamik (MD) Simülasyonları:

Atomların ve moleküllerin zaman içinde nasıl hareket ettiğini ve malzemenin termal ve mekanik özelliklerini incelemek için kullanılır. Özellikle atom düzeyindeki yapısal değişimleri simüle etmek için etkilidir.

- Kuantum Monte Carlo (QMC):

Elektronların kuantum mekaniği ile modellenmesi için kullanılır. QMC, çok elektronlu sistemlerde korelasyon etkilerini anlamada önemli rol oynar ve DFT'ye göre daha yüksek hassasiyet sunabilir.

- Manyelastik Hesaplamalar (Magnetoelastic Calculations):

Manyetik özelliklerin mekanik gerilmelerle ilişkisini incelemek için kullanılır. Özellikle manyetik heteroyapılarda manyetik ve elastik özelliklerin birbirine etkilerini analiz etmekte önemlidir.

- Kuantum Taşıma (Quantum Transport) Yöntemleri:

Heteroyapılarda elektronların taşınımını ve iletkenlik özelliklerini incelemek için kullanılır. Non-Equilibrium Green’s Function (NEGF) yöntemi, bu tür hesaplamalarda yaygın olarak tercih edilen bir tekniktir.

- Empirik Potansiyel Yöntemleri:

Atomlar arasındaki etkileşimlerin belirli parametrelerle modellemeler yapılarak hesaplandığı yöntemlerdir. Lennard-Jones potansiyeli gibi yöntemlerle heteroyapılarda atomların yerel düzeni simüle edilir.

Bu yöntemler, heteroyapıların farklı malzeme türleri arasındaki elektronik, mekanik ve optik etkileşimleri anlamak ve cihaz performansını optimize etmek için kullanılır.

## 1.5 Düşük Boyutlu Yapılarda Schrödinger Denkleminin Çözümü ve Varyasyon Yöntemi

Schrödinger denklemi, kuantum mekaniğinde bir parçacığın dalga fonksiyonunu tanımlayan temel bir denklemdir. Düşük boyutlu yapılarda (örneğin, kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi) Schrödinger denkleminin çözümü, parçacığın enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonları hakkında bilgi verir.

Genel olarak Schrödinger denklemi şu şekildedir:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(\boldsymbol{r}) + V(\boldsymbol{r})\psi(\boldsymbol{r}) = E\psi(\boldsymbol{r}) \tag{1.1}$$

Burada, $\hbar = h/2\pi$ ( h Planck sabiti), m parçacığın kütlesi, $\nabla^2$ Laplace operatörü, $V(\boldsymbol{r})$ potansiyel enerji, $\psi(\boldsymbol{r})$ dalga fonksiyonu, E ise enerji özdeğeridir. (Griffiths, 2005)

Kuantum kuyuları, elektronların bir boyutta sınırlandığı yapılardır. Bir kuantum kuyusunda, Schrödinger denklemi şu şekilde yazılır:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(\boldsymbol{r})}{dz} + V(\boldsymbol{z})\psi(\boldsymbol{z}) = E\psi(\boldsymbol{z}) \tag{1.2}$$

Burada $V(\boldsymbol{z})$ potansiyel enerjisi, kuyu içinde sıfır ve kuyu dışında sonsuz olan (sonlu da seçilebilir) basit bir kuyu potansiyelini gösterir. Bu durumda denklemin analitik çözümü,

$$\psi_n(\boldsymbol{z}) = \sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right)\ ;\ E_n = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2mL^2} \tag{1.3}$$

şeklindedir. Burada L kuyu genişliği ve n pozitif bir tamsayıdır. Bu çözümler düşük boyutlu yapılarda enerji seviyelerinin kuantize olduğunu gösterir. Ayrıca sınırlamalar uygun şekilde seçilerek bu çözümler kuantum telleri ve kuantum noktaları içinde yapılabilir.

Varyasyon yöntemi, kuantum mekaniğinde yaklaşık çözümler bulmak için kullanılan güçlü bir matematiksel yöntemdir. Bu yöntem, analitik çözümün yapılamadığı problemlerde etkili bir tekniktir. Varyasyon tekniği, seçilen bir deneme dalga fonksiyonunun Hamiltonyen operatörüne göre beklenen değerinin, gerçek temel enerji seviyesinden daha büyük veya eşit olduğunu söyler. Öncelikle, çözülecek probleme uygun bir deneme dalga fonksiyonu seçilir. Bu seçim yapılırken sistemin simetri ve sınır koşulları dikkate alınarak bir seçim yapılmalıdır. Bu seçilen deneme dalga fonksiyonu kullanılarak, Hamiltonyen operatörüne göre bir beklenen değer hesaplanır. Elde edilen sonuç deneme dalga fonksiyonun parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler enerjiyi minimize edecek şekilde ayarlanır. Bu minimizasyon işlemi arana en düşük enerji seviyesine yakın bir değer hesaplanmasını sağlar.(Landau&Lifshitz, 1977)

Bir yarıiletkende yabancı atomun varlığı, yasak enerji aralığına bağlı durumların oluşmasına neden olur. Bu bağlı durumlar yarı iletkenin hem optik hem de taşıma özelliklerini etkiler. Yarı iletkenlerdeki yabancı atom durumlarının doğru anlaşılması bu

nedenle büyük önem taşımaktadır. Her ne kadar yabancı atom durumları toplu yarı iletkenler durumunda geniş çapta araştırılmış olsa da, aynı şeyin yarı iletken nanoyapılarda incelenmesi ancak yaklaşık kırk yıl önce başlatılmıştır. O zamandan bu yana çok sayıda teorik ve deneysel çalışma, Kuantum Kuyuları, Kuantum Kuyusu Telleri ve Kuantum noktaları ile sınırlandırılmış taşıyıcılara sahip düşük boyutlu yarı iletken heteroyapılardaki yabancı atom durumlarının incelenmesine ayrılmıştır. Çalışanların çoğu, varyasyonel teknikleri kullanarak yabancı atom durumlarının araştırılmasına odaklanmıştır. Varyasyon yöntemini kullanarak yabancı atomun bağlanma ve geçiş enerjilerini hesaplarken bazı yaklaşıklıklar yapılmıştır. Bunlardan bir tanesi etkin kütle yaklaşıklığıdır.

### 1.5.1 Etkin Kütle

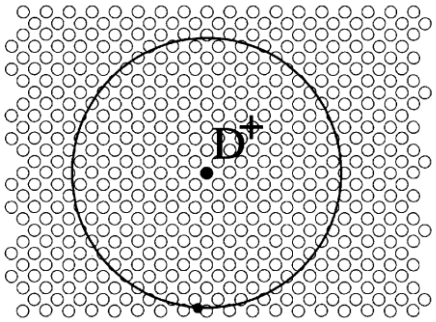
Kuantum kuyuları yalnızca farklı yarı iletkenler arasında heteroeklemler oluşturularak üretilir. Elektronik açıdan bakıldığında yarı iletkenler farklıdır çünkü farklı band yapılarına sahiptirler. Bir yarı iletkenin belki de en temel özelliği olan band aralığı (ve hizalaması) arasındaki fark, V olarak tanımlanmış bir band ofset parametresi ile belirtilmektedir.

Elbette dielektrik sabiti, örgü sabiti ve bir sonraki en önemli nicelik olarak kabul edilen etkin kütle gibi farklı birçok başka özellik de vardır. Kuantum kuyularındaki statik enerji seviyelerinin hesaplanmasının, heteroeklem boyunca etkin kütledeki değişimi hesaba katması gerektiği genel olarak kabul edilir.

### 1.5.2 Yabancı Atom (İmpurity)

Safsızlıkları(impurity) doğrudan örgü içine yerleştirme yeteneği, elektronik malzeme olarak yarı iletkenlerin geliştirilmesindeki en önemli teknolojik ilerlemeydi. Bu, elektronik özelliklerinin mühendisin ihtiyaçlarına göre uyarlanmasına olanak tanır. Komşu atomlarla kimyasal bağ oluşturmak için gerekenden daha fazla ek elektronla eklenen atomlar kolaylıkla iyonize olur, böylece kristale elektron bağışlanır. Bu tür atomlara donör denir. Alternatif olarak, kimyasal bağları oluşturmak için gerekenden bir elektron eksik olan safsızlık atomları örgüye dahil edilebilir. Bu atomlar yakındaki bağlardan elektron kabul edebilir, böylece değerlik bandında boş bir durum oluşur. Bu tür atomlara alıcılar denir.

Bu çalışmada temel hedef yarı iletken heteroyapılar içindeki safsızlık durumlarının özelliklerini incelemektir. Bu durumların, yarıiletken malzemelerin elektronik ve optik özellikleri üzerinde etkisi vardır.

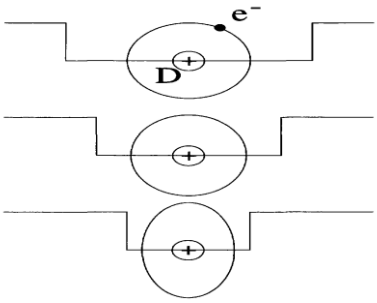



**Şekil 1.1.** Bir yarı iletkende bir donörün şematik gösterimi

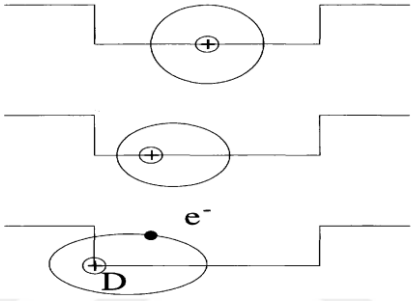
Şekil 1.1'de, donörün hidrojen atomunu oluşturan elektron-proton çiftine benzediği görülmektedir. Bu yapının fiziği başlangıçta Bohr teorisi tarafından yarı klasik bir modelle tanımlanmış ve daha sonra tam kuantum mekaniksel açıklamalarla güçlendirilmiştir (Weidner and Sells, 1980).

### 1.5.3 Hetero yapılarda Bağlanma Enerjisi

Bir donör bir kuantum kuyusu yapısına yerleştirildiğinde, iki ek serbestlik derecesi nedeniyle durum külçe(bulk) olandan çok daha karmaşıktır. Birincisi, Şekil 1.2 ve Şekil 1.5 de gösterildiği gibi bağlanma enerjisi kuantum kuyusu yapısından dolayı sınırlayıcı potansiyelinin yanında kuyu genişliğine de bağlıdır İkincisi, donör bağlanma enerjisi ve dalga fonksiyonu aynı zamanda heteroyapı içindeki donör pozisyonunun da bir fonksiyonudur. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, kuantum kuyusunun merkezindeki donör için bağlanma enerjisi kuyunun kenarındaki donörden farklıdır.




**Şekil 1.2.** Kuantum kuyusu genişliğinin donör dalga fonksiyonu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi.

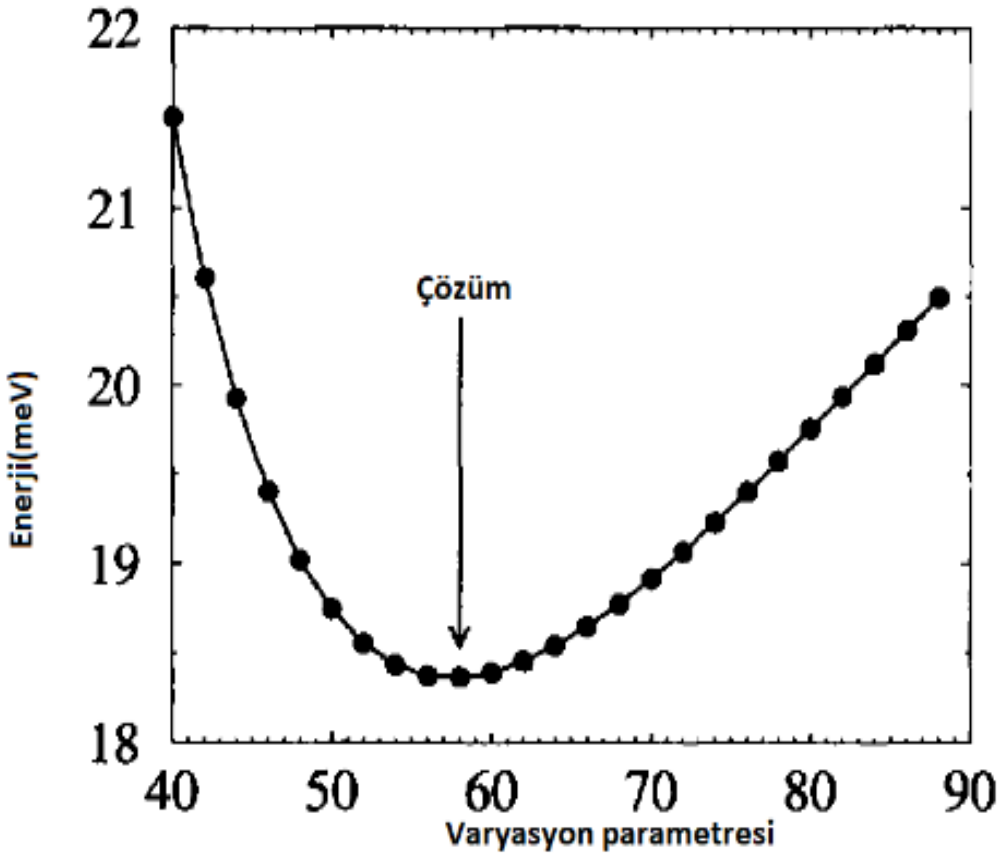



**Şekil 1.3.** Donör konumunun dalga fonksiyonu üzerindeki etkisinin şematik gösterimi

Yabancı atomun olduğu durumu tanımlayan Schrödinger denkleminin çözüm yöntemleri iki temel yaklaşım etrafında toplanmıştır. Bunlardan ilki, elektron dalga fonksiyonunun Gauss fonksiyonlarının doğrusal bir kombinasyonu olarak genişletilmesini içerir (Mailhiot v.d., 1982, Greene andBajaj, 1983). Bu teknik, basit kuantum kuyusu yapılarında donörlerin özelliklerinin hesaplanmasında başarılı olsa da, kademeli boşluk malzemeleri ve piezo elektrik alanlarının mevcut olduğu sistemler de dahil olmak üzere daha karmaşık yapılara genelleme yapılması için yeterli değildir.

Diğer yaklaşım kategorisi varyasyon ilkesine dayanmaktadır. Kuantum mekaniğinde varyasyon yöntemi, en düşük enerjili özduruma veya temel duruma ve bazı uyarılmış durumlara yaklaşımlar bulmanın bir yoludur (Borghi, 2018). Bu, moleküler yörüngeler gibi yaklaşık dalga fonksiyonlarının hesaplanmasına olanak tanır. Bu yöntemin temeli varyasyon ilkesidir. Bu yöntemde, fonksiyonel formu bir veya daha fazla bilinmeyen parametre içerebilen bir deneme dalga fonksiyonu seçilir. Bu parametreler

sistematik olarak değiştirilir ve her set için enerjinin beklenen değeri hesaplanır. Şekil 1.4 de gösterildiği gibi varyasyon ilkesi ile elde edilen en düşük enerjinin sistemin gerçek durumuna en yakın yaklaşım olduğunu belirtir. Varyasyonel yaklaşımların başarısı, deneme dalgası fonksiyonunun genel seçimine odaklanır. Bu nedenle tez çalışmasında varyasyon yöntemi kullanılmış ve varyasyon parametresi hakkında bilgi teori kısmında verilmiştir.

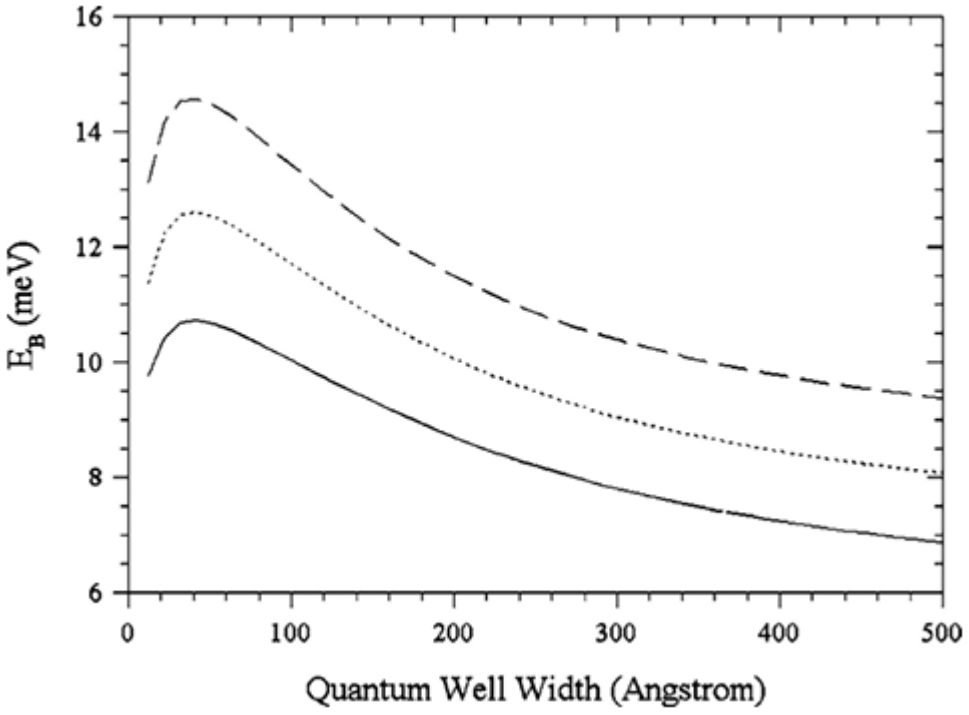



**Şekil 1.4.** Varyasyon parametrenin bir fonksiyonu olarak elektronun toplam enerjisinin bulunması

Literatürde kuantum kuyu, tel ve noktaları için yapılmış birçok çalışma vardır. Düşük boyutlu yapıların elektronik özellikleri, farklı bir çok dıç etki altında incelenmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda gösterilmiştir;

Zhao v.d. donörlerin kuantum kuyularındaki bağlanma enerjilerini, hidrostatik basınç altında sonlu bariyerlerin etkisini dikkate alarak varyasyonel bir yöntemle

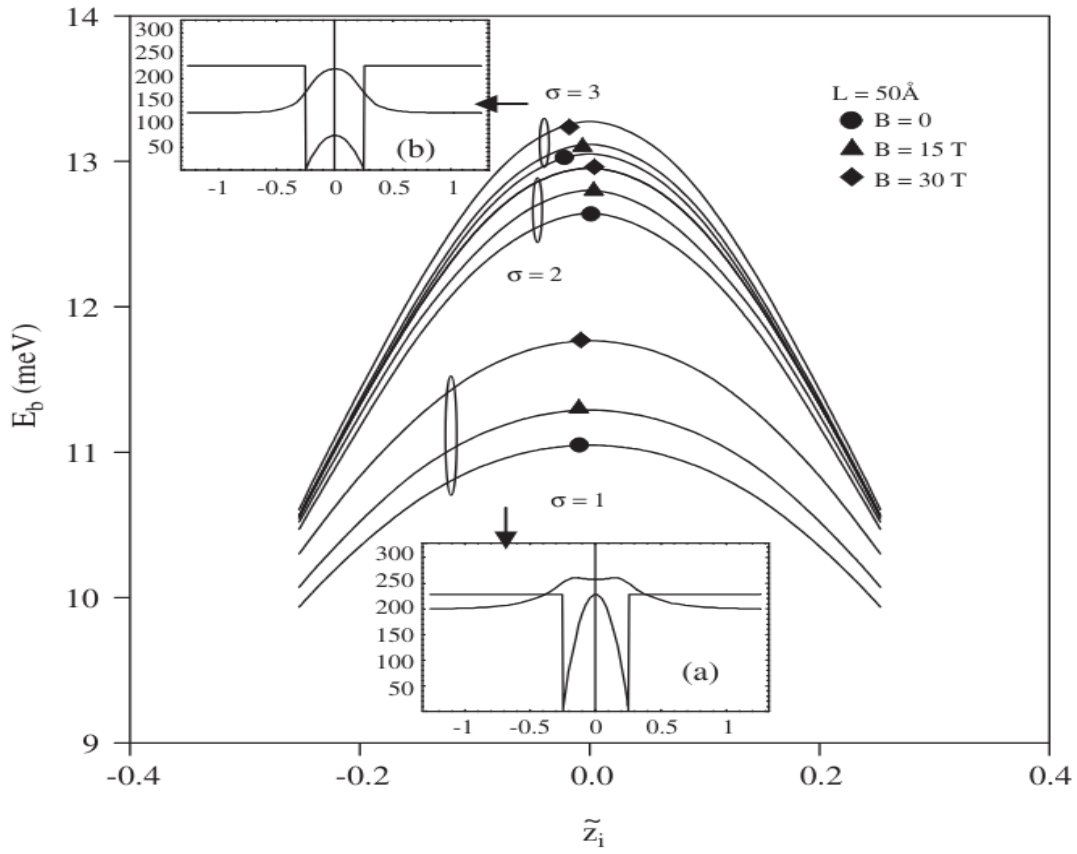
incelemiştir. Hesaplamada, elektronik etkin kütle, dielektrik sabiti ve basınçla değişen kuyu ve bariyerler arasındaki iletim bandı ofsetini dikkate almışlardır.




**Şekil 1.5.** Bağlanma enerjisinin kuyu genişliğine göre farklı basınç değerleri için değişimi

$GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyusu için kuyu genişliğinin fonksiyonu olarak donör bağlanma enerjileri, P = 0, 20, 40 kbar ve Al konsantrasyonu x = 0.15 için sırasıyla düz, noktalı ve kesikli çizgilerle Şekil 1.5 de gösterilmiştir. (Zhao, v.d., 2003)

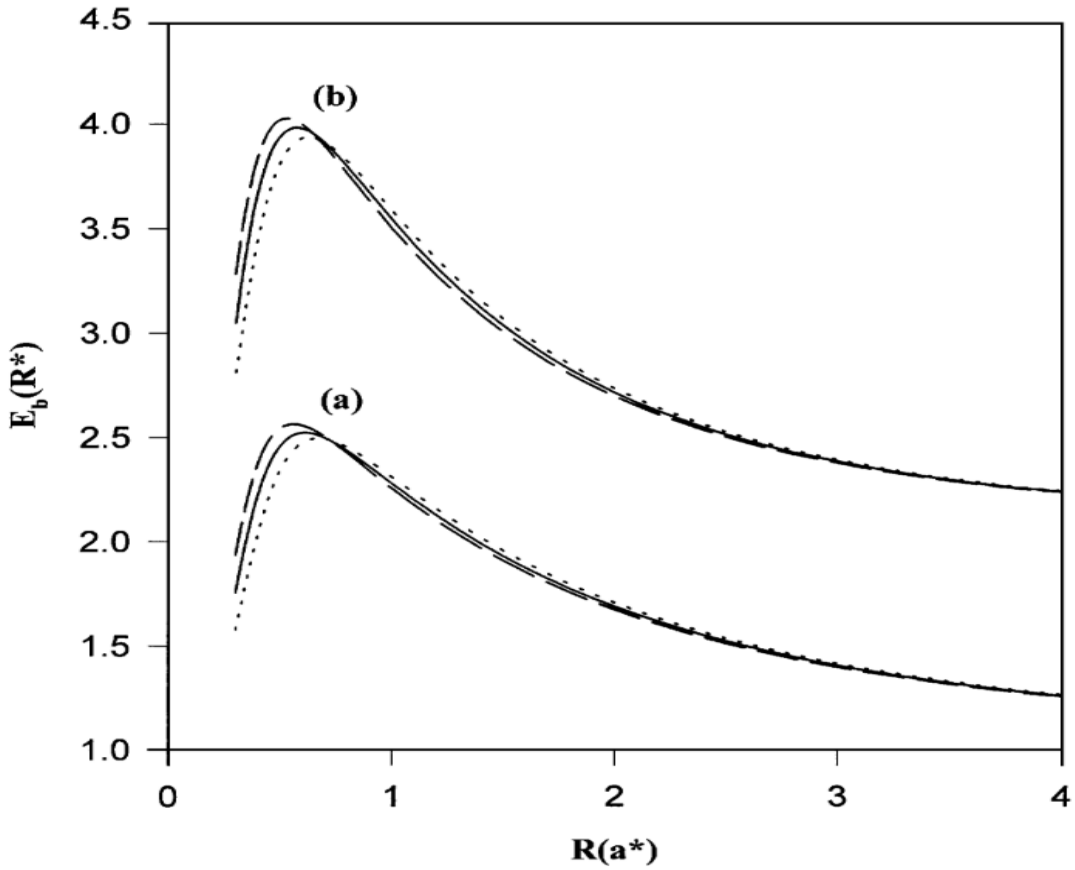
Kasapoglu v.d. farklı genişliklere ve farklı alüminyum konsantrasyonlarına sahip bir ters parabolik kuantum kuyusunda (IPQW), kuyuya dik olarak yönlendirilen manyetik alanın, hidrojenik safsızlıkların bağlanma enerjisi üzerindeki etkilerini araştırdı. Çalışmada bariyerlerdeki alüminyum konsantrasyonu her zaman x=0.3 alınmıştır. Hesaplamalar, varyasyonel bir yöntem kullanılarak etkin kütle yaklaşımı dahilinde gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 1.6.** Kuantum kuyusunda bağlanma enerjisinin yabancı atom konumuna göre farklı manyetik alan değerleri için değişimi

Şekil 1.6'da gösterilen çalışmada, bağlanma enerjisinin normalize yabancı atom konumuna, farklı manyetik alan ve alüminyum konsantrasyonları için değişimi verilmiştir. Kuyu genişliği Şekil 1.6'da $50A^0$ alınmıştır. İç grafikler ile taban durum elektron dalga fonksiyonunu farklı alüminyum konsantrasyonları için gösterilmiştir. ($\sigma = x_{mak}/x_c$)

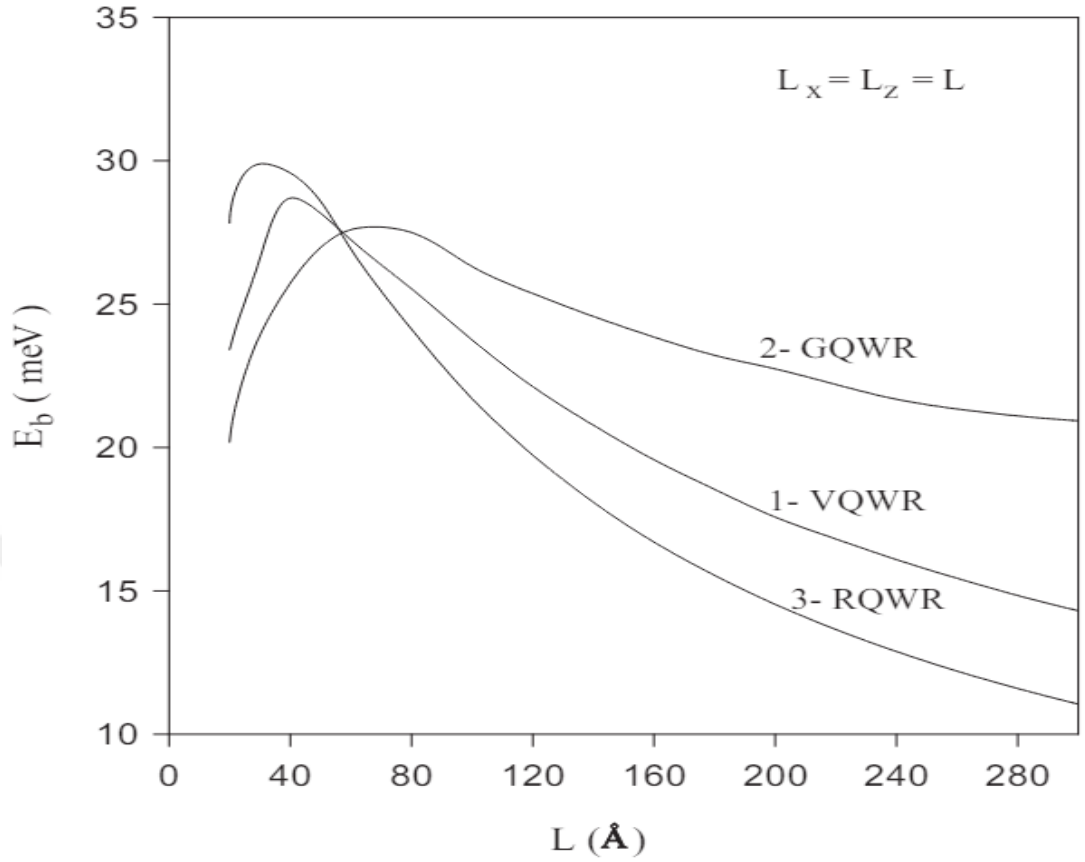
Bouhassoune v.d. ise silindirik kuantum kuyu telinde merkezdeki bir donör safsızlığın bağlanma enerjisi incelenmiştir. Hesaplama etkin kütle yaklaşımı dahilinde ve varyasyonel bir yaklaşım kullanılarak yapılmıştır. Elektronik sınırlama sonlu derin potansiyel kuyusu ile modellenmiştir.




**Şekil 1.7.** Kuantum telinde bağlanma enerjisinin tel yarıçapına göre değişimi

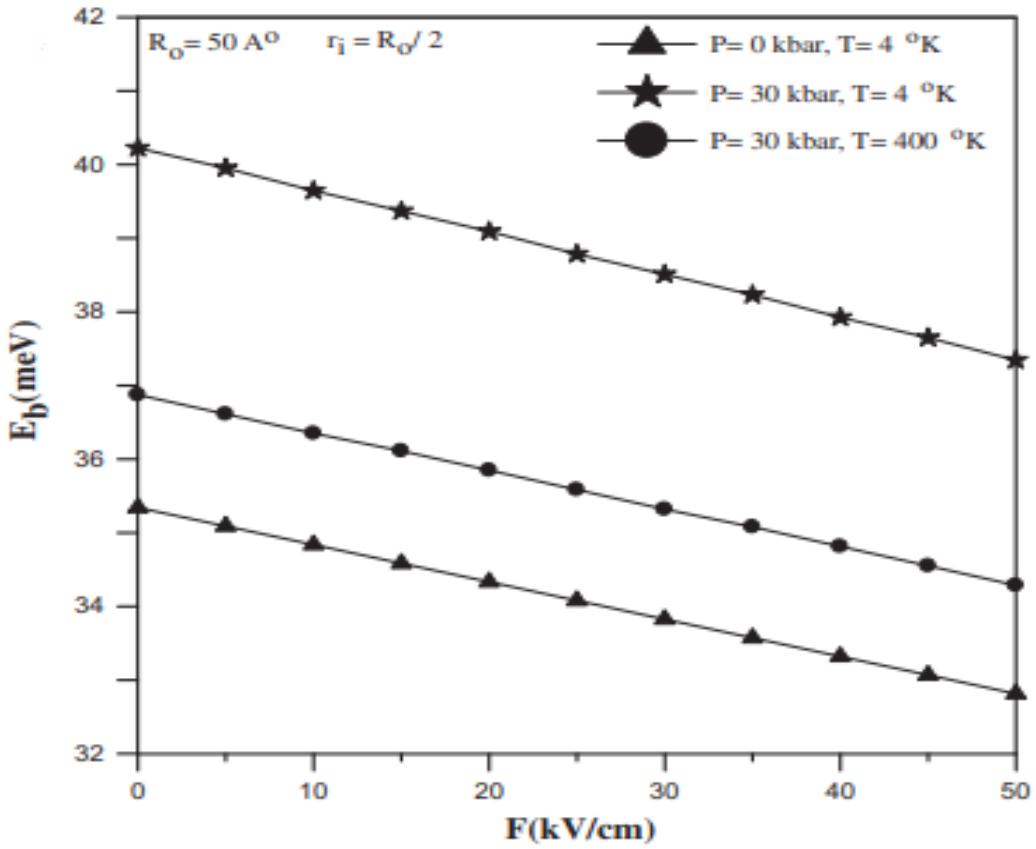
Şekil 1.7 de, Bouhassoune v.d. impurity bağlanma enerjisinin tel yarıçapına bağlı değişimini göstermişlerdir. Hesaplamada farklı kütle oranları kullanılmış ve (a)optik fonon modları varken, (b) optik fonon modları yokken bağlanma değerleri hesaplanmıştır. (Bouhassoune, v.d., 2001)

Şekil 1.8 de, Kasapoglu v.d. ise farklı şekillerdeki teller (V-şekilli kuantum teli (V-QWR) ve dikdörtgen tel) için bağlanma enerjisini herhangi bir koordinat dönüşümü kullanmadan varyasyonel bir prosedürle teorik olarak araştırmıştır. Bu çalışmada kullanılan V-QWR için etkin potansiyel, z yönünde bir kare kuyu potansiyelinden ve x yönünde tam dereceli bir kuyu potansiyelinden oluşmaktadır.




**Şekil 1.8.** Farklı yapılardaki kuantum tellerinin bağlanma enerjisinin tel uzunluğuna göre değişimi

İlaveten, Şekil 1.8'de, Kasapoglu v.d. bağlanma enerjisini teli genişliğine göre üç farklı geometri için hesaplamışlardır. VQWR için x yönünde V-şekilli bir kuyu potansiyeli (V(x)) kullanılırken, z yönü boyunca basit bir kare kuyu potansiyeli (V(z)) seçilmiştir. GQWR için ise her iki yönde de V-şekilli bir kuyu potansiyeli tercih edilmiştir. RQWR için ise dikdörtgen bir kuyu potansiyeli kullanılmıştır. (Kasapoglu, v.d., 2003)




**Şekil 1.9.** Kuantum noktasında bağlanma enerjinin elektrik alan şiddetine bağlı değişimi

Şekil 1.9'da, Erdogan v.d. küresel kuantum noktasında iki farklı basınç ve sıcaklık değeri için elektrik alan bir fonksiyonu olarak taban durum bağlanma enerjisini hesaplamışlardır. Hesaplamarda küresel kuantum nokta yarıçapı ve yabancı atom konumu sırasıyla $50A^0$ ve $r_i=R_0/2$ alınmıştır. (Erdogan,v.d.,2013)

## 1.5.4 Geçiş Enerjisi

Bohr modeli, atomdaki elektronların dağılımını tanımlamak için bir kuantum sayısı kullanan tek boyutlu bir modeldi. Önemli olan tek bilgi, n kuantum sayısıyla tanımlanan yörüngenin boyutuydu. Schrödinger'in modeli elektronun üç boyutlu uzayı işgal etmesine izin vermektedir. Bu nedenle elektronların bulunabileceği yörüngeleri tanımlamak için üç koordinat veya üç kuantum numarası gerekmektedir.

Schrödinger'in dalga denklemlerinden gelen üç koordinat, baş (n), açısal (l) ve manyetik (m) kuantum sayılarıdır. Bu kuantum sayıları, bir atom üzerindeki yörüngelerin uzaydaki boyutunu, şeklini ve yönelimini tanımlar.

Baş kuantum sayısı (n), yörüngenin boyutunu tanımlar. Örneğin, n = 2 olan yörüngeler, n = 1 olanlardan daha büyüktür. Zıt elektrik yüklerine sahip oldukları için elektronlar atomun çekirdeğine çekilir. Bu nedenle, bir elektronun çekirdeğe yakın olduğu bir yörüngeden (n = 1) çekirdekten daha uzakta olduğu bir yörüngeye (n = 2) uyarılması için enerjinin verilmesi gerekir. Bu nedenle baş kuantum sayısı dolaylı olarak bir yörüngenin enerjisini tanımlar.

Açısal kuantum sayısı (l), yörüngenin şeklini tanımlar. Yörüngeler en iyi şekilde küresel (l = 0), kutupsal (l = 1) veya yonca yaprağı (l = 2) olarak tanımlanan şekillere sahiptir.

Bir kürenin (l = 0) uzayda yönlendirilebilmesinin tek bir yolu vardır. Polar (l = 1) veya yonca yaprağı (l = 2) şekillerine sahip olan yörüngeler ise farklı yönlere işaret edebilir. Bu nedenle, belirli bir yörüngenin uzaydaki yönelimini tanımlamak için manyetik kuantum sayısı (m) olarak bilinen üçüncü bir kuantum sayısına ihtiyacımız var.

İzin verilen geçiş enerjileri şu şekilde verilir:

$$E^{trans}(nlm - n'l'm') = E_{b,nlm} - E_{b,n'l'm'} \tag{1.4}$$

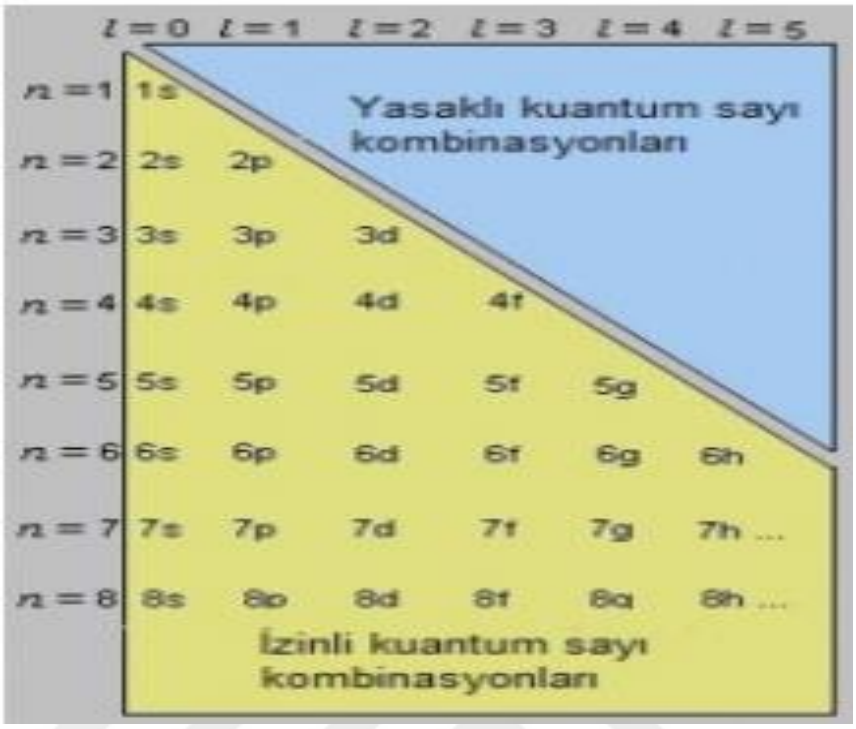
Burada $n, n', l, l',\ m\ ve\ m'$ sırasıyla baş kuantum sayısı, açısal kuantum sayısı ve magnetik kuantum sayılarını ifade etmektedir. Enerji seviyeleri arasında izin verilen geçişler için kullanılan seçim kuralları şunlardır:

$$\Delta l = l - l' = \mp 1 \tag{1.5}$$

$$\Delta m = m - m' = 0, \mp 1 \tag{1.6}$$

Bu kurallara göre enerji geçişlerinin olabileceği durumlar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

**Çizelge 1**. İzinli enerji geçiş kombinasyonları




Öte yandan kuantum noktaların enerji seviyelerinin konumuna göre belirlenen karakteristik dalga boyları birçok uygulamada oldukça önemlidir. Bununla birlikte, belirli bir yapı için, iki seviye arasındaki geçiş enerjisi, dış alanların yokluğunda neredeyse sabittir. Yabancı atomların varlığı yapının potansiyel enerji profilini ve dolayısıyla enerji seviyelerini ve optik özelliklerini değiştirir.

Genel olarak bantlar arası ve band içi geçişler olmak üzere iki optik geçiş enerjisi vardır. Birincisi iletim bandı ile valans bandı arasında gerçekleşirken ikincisi, yalnızca bir tip taşıyıcıyı içeren iletim bandının veya valans bandının içinde gerçekleşir.

Bantlar arası optik cihazların çalışma dalga boyu, band aralığı ile ilgilidir; burada alt bantlar arası cihazlar, iletim bandındaki veya değerlik bandındaki seviyeler arasındaki geçiş enerjisini içerdiğinden, tasarımla dalga boyu kontrolü olanaklarını yansıtır.

Bu tez çalışmasında, küresel GaAs/GaAlAs kuantum noktasında taban durum($n$=1, $l = 0, m = 0$) ile uyarılmış durum ($n'$=2, $l' = 1, m' = 0$) bağlanma enerjileri ve bantlar arası ve band içi geçiş enerjileri teorik olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca, enerji seviyeleri *n* ve *l* kuantum sayılarının ikisi ile ifade edilirse enerji seviyeleri 1s, 2s, 2p vb. gibi gösterilirken sadece *l* kuantum sayısı ile tanımlanırsa 1s, 1p vb gibi ifade edilebilir. Bu tez çalışmasında 1s,1p notasyonu kullanılmıştır.

# BÖLÜM 2

# TEORİ

Etkin kütle yaklaşıklığı altında, $GaAs/\ Ga_{1-x}Al_xAs$ yapısındaki küresel kuantum noktasında bulunan bir elektronun Hamiltonyeni şu şekilde tanımlanır (Erdogan 2013**,** Bulut 2014, Sivakami 2013, Sadeghi 2009);

$$H_{sub}^{T} = -\frac{\hbar^2}{2m^{*T}}\nabla_{r,\theta,\varphi}^2 + V^T(r,x)\,, \tag{2.1}$$

burada T, $m^{*T}$, ve $V^T(r,x)$ sırasıyla sıcaklık, etkin kütle ve elektron hareketinin küresel bir kuantum noktası içerisinde sınırlandırılabilmesi uygulanan potansiyeli göstermektedir. Sıcaklığa bağlı etkin kütle tanımı;

$$m^{*T} = \frac{m_o}{1+7.51\left[\dfrac{2}{E_g^{\Gamma}(T)}+\dfrac{1}{E_g^{\Gamma}(T)+0.341}\right]} \tag{2.2}$$

gibidir. Burada $m_0$ serbest elektron kütlesi ve $E_g^{\Gamma}(T)$ Γ noktasında GaAs yapısı için sıcaklığa bağlı enerji bandı aralığı değişimi olup aşağıdaki gösterilmiştir.

$$E_g^{\Gamma}(T) = 1.519 - \left[\frac{5.405x10^{-4}T^2}{T+204\,K}\right]. \tag{2.3}$$

Tuzaklama potansiyeli şu şekilde tanımlanır;

$$V^T(r,x) = \begin{cases} 0 & r \le R \\ V_0^T(x) = 0.658\,\Delta E_g^{\Gamma T}(x) & r \ge R \end{cases}, \tag{2.4}$$

burada $\Delta E_g^{\Gamma T}(x)$ GaAs ve $Ga_{1-x}Al_xAs$ arasındaki toplam band aralığı enerji farkı olup alüminyum konsantrasyonu ve sıcaklığın bir fonksiyon olarak şu şekilde verilir:

$$\Delta E_g^{\Gamma T}(x) = 1.155x + 0.37x^2 - 1.15 \times 10^{-4} x\, T \tag{2.5}$$

Denklem 2.1'deki Hamiltonyenin dalga fonksiyonu en genel hali ile şöyle tanımlanır;

$$\psi_{nlm}(r,\theta,\varphi) = N_{nlm} R_{nl}(k_{nl} r) Y_{lm}(\theta,\phi). \tag{2.6}$$

Denklem 2.1 ve 2.6 kullanılarak Schrödinger denklemi radyal denklemlere indirgenebilir. Radyal denklemin ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^{*T},}\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{d}{dr} - \frac{l(l+1)}{r^2}\right) R_{nl}^{isubT}(r) - \left(E_{nl}^{subT}\right) R_{nl}^{isubT}(r) = 0, \quad \mathrm{r} \le R \tag{2.7}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m^{*T}}\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r}\frac{d}{dr} - \frac{l(l+1)}{r^2}\right) R_{nl}^{osubT}(r) - \left(E_{nl}^{subT} - V_0^T(x)\right) R_{nl}^{osubT}(r) = 0, \ \mathrm{r} \ge R\,, \tag{14}$$

Radyal dalga fonksiyonu 1s taban durum ve 1p uyarılmış durum için denklemleri şöyledir;

$$R_{1s}^{subT}(r) = \begin{cases} N_{1si}^{subT}\, Sin(k_{1si}^T r)/r, & r \le R \\ N_{1s0}^{subT} e^{-(k_{1so}^T r)}/r\,, & r \ge R \end{cases}, \tag{2.8}$$

ve

$$R_{1p}^{subT}(r) = \begin{cases} N_{1pi}^{subT}\left(\dfrac{sin\left(k_{1pi}^T r\right)}{\left(k_{1pi} r\right)^2} - \dfrac{cos\left(k_{1pi}^T r\right)}{\left(k_{1pi} r\right)}\right) & , \ r \le R \\ N_{1p0}^{subT}\left(\dfrac{1}{(k_{1po}^T r)} + \dfrac{1}{(k_{1po}^T r)^2}\right) e^{-k_{1po} r} & , \ r \ge R \end{cases}, \tag{2.9}$$

Burada $N_{1si}^{subT}$ ve $N_{1s0}^{subT}$ normalizasyon sabitleri, $k_{1si}^T$ ve $k_{1so}^T$ dir. $k_{1si}^T$ ve $k_{1so}^T$ Denklem 2.9'daki dalga fonksiyonunu ve türevlerini r=R deki eşitliğinden elde edilen transcendental denklemin çözümünden bulunur. Burada $E_{1s}^{subT}$ sıcaklığa bağlı taban durum(1s) subband enerjisidir. Taban durum için Transcendental denklem şöyledir;

$$k_{1si}^T R + k_{1so}^T \mathrm{R}\tan(k_{1si}^T R) = 0, \tag{2.10}$$

Benzer işlemi uyarılmış durum dalga fonksiyonunu kullanıp yapılırsa $k_{1pi}^T$ ve $k_{1po}^T$ katsayıları şu şekilde bulunur;

$$k_{1pi}^T = \sqrt{2m^{*T} E_{1p}^{subT}/\hbar^2}$$

$$k_{1po}^T = \sqrt{2m^{*T}\left(V_0^T(x) - E_{1p}^{subT}\right)/\hbar^2}\,. \tag{2.11}$$

$k_{1pi}^{T}$ ve $k_{1po}^{T}$ Denklem 2.11'deki uyarılmış durum radyal dalga fonksiyonunu ve türevlerini r=R deki eşitliğinden elde edilen transcendental denklemin çözümünden bulunur. Uyarılmış durum için Transcendental denklem aşağıda tanımlanmıştır (Mese, 2021);

$$\left[\sqrt{E_{1p}^{subT}}R\left(E_{1p}^{subT}-V_0^T(x)\right)cos\left(\sqrt{E_{1p}^{subT}}R\right)+\left(E_{1p}^{subT}R\sqrt{\left(V_0^T(x)-E_{1p}^{subT}\right)}+\right.\right.$$

$$\left.\left.V_0^T(x)\right)sin\left(\sqrt{E_{1p}^{subT}}\,R\right)\right]/\left((E_{1p}^{subT}R\left(R\left(\sqrt{\left(V_0^T(x)-E_{1p}^{subT}\right)}\right)+1\right)\right)=0,$$

(2.12)

Burada $E_{1p}^{subT}$ sıcaklığa bağlı uyarılmış durum(1p) subband enerjisidir. Küresel kuantum noktasında, 1s'den 1p'ye altbantlar arası geçişe izin verilir. Sıcaklığa bağlı altbantlar arası geçiş enerjisi şu şekilde tanımlanır:

$$,E_{sub1p1s}^{tranT}=E_{1p}^{subT}-E_{1s}^{subT} \tag{2.13}$$

$r_i$ bir yabancı atomun konumunu göstermek üzere, sınırlandırılan bir elektronun enerji seviyelerinin belirlenmesi ve bu elektronun pozitif bir yabancı atoma bağlanma enerjisinin hesaplanabilmesi için Hamiltoniyen işlemcisinin küresel koordinatlara bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılır;

$$H_{imp}^{T}=H_{sub}^{T}-\frac{e^2}{\epsilon^T\sqrt{r^2+r_i^2-2rr_i\cos\theta}}, \tag{2.14}$$

Burada $\epsilon^T$ GaAs malzemenin dielektrik sabiti olup (Erdogan 2013**,** Mese 2021**)**

$$\varepsilon^T=\begin{cases}12.74\ exp\left[9.4x10^{-5}\,(T-75.6\ K)\right] & for\ \ T\le 200\,K\\ 13.18\,exp\left[20.4x10^{-5}\,(T-300\ K)\right] & for\ \ T\ge 200\,K\ \ .\end{cases} \tag{2.15}$$

gibi tanımlanır. Sırasıyla, yabancı atom varlığında Hamiltonyen ($H_{impT}$) taban ve uyarılmış durumlarının deneme dalga fonksiyonları aşağıdaki gibidir (Al 2020, Kirak 2013, Yilmaz 2007, Sivakami 2008, Peter 2009, Sadeghi 2020**)**.

$$\psi_{1s}^{imT}(r,r_i)=R_{1s}^{subT}(r)\exp\left(-\lambda_{1s}^{T}\sqrt{\ r^2+r_i^2-2rr_i\cos\theta\ }\right) \tag{2.16}$$

$$\psi_{1p}^{imT}(r, r_i) = R_{1s}^{subT}(r)\ \mathrm{r}\cos(\theta)\exp\left(-\lambda_{1p}^{T}\sqrt{r^2 + r_i^2 - 2rr_i\cos\theta}\right), \quad (2.17)$$

Burada $\lambda_{1s}^{T}$ ve $\lambda_{1p}^{T}$varyasyon parametresidir.

1s ve 1p yabancı atom enerjileri sırasıyla şu şekilde tanımlanır (Bulut, 2014):

$$E_{1s}^{imT} = min_{\lambda_{1s}^{T}} \langle\psi_{1s}^{imT}|H_{impT}|\psi_{1s}^{imT}\rangle / \langle\psi_{1s}^{imT}|\psi_{1s}^{imT}\rangle \quad (2.18)$$

$$E_{1p}^{imT} = min_{\lambda_{1p}^{T}} \langle\psi_{1p}^{imT}|H_{impT}|\psi_{1p}^{imT}\rangle / \langle\psi_{1p}^{imT}|\psi_{1p}^{imT}\rangle, \quad (2.19)$$

1s taban durumu ile 1p uyarılmış durum arasında sıcaklığa bağlı geçiş enerjisi şöyle tanımlanır;

$$E_{im1p1s}^{tranT} = E_{b1s}^{T} - E_{b1p}^{T}. \quad (2.20)$$

Geçiş enerjisindeki $E_{b1s}^{T}$ ve $E_{b1p}^{T}$sırasıyla 1s taban ve 1p uyarılmış durumların bağlanma enerjileri olup;

$$E_{b1s}^{T} = E_{1s}^{subT} - E_{1s}^{imT}\ . \quad (2.21)$$

ve

$$E_{b1p}^{T} = E_{1s}^{subT} - E_{1p}^{imT}\ . \quad (2.22)$$

şeklinde tanımlanır. 2.20. Denklemde bağlanma enerjilerinin ifadeleri yerine yazılırsa geçiş enerjisi şu şekilde olur (Mese 2021, Kostic 2020);

$$E_{im1s1p}^{tranT} = E_{1p}^{imT} - E_{1s}^{imT}. \quad (2.23)$$

# BÖLÜM 3

# SONUÇLAR VE TARTIŞMA

$GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ küresel kuantum noktasında (SQD) bir elektronun yabancı atom yokluğunda ve varlığında iki enerji durumu (1s ve 1p durumları) teorik olarak hesaplanır. Hesaplamalar, etkin kütle yaklaşımı içinde ve varyasyon yöntemi kullanılarak yabancı atom varlığında gerçekleştirilmiştir. Enerjiler, çeşitli sınırlandırma yarıçapları ve Al içerikleri için hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan fiziksel parametreler: $\epsilon^T(T = 0) = 12.74$ ve $m^{*T}(T = 0) = 0.067m_0$ gibidir. Sonuçlar $a^* = 100.03\,A^o$ ve $R^* = 5.69meV$ büyüklükleri cinsinden verilmiştir. Hesaplamalarımızda küresel kuantum noktasının yarıçapı 0.6 ve $1.6a^*$ aralığında seçilmiştir. Hesaplamaları basitleştirmek için, hem $m^{*T}$ and $\epsilon^T$ nin elektron pozisyonu r'den bağımsız ve GaAs yığın(bulk) değerlerine eşit olduğunu varsayılmıştır.

Çizelge 2 de, sıcaklığın T=0 ve T=300 K değerlerinde, kuantum noktasının yarıçapına bağlı taban durum(subband) enerjilerinin değişimi Sivamaki v.d tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplamalar varyasyon yöntemi ile yapılmış ve alüminyum konsantrasyonu x=0.2 alınmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçların özellikle büyük yarıçaplı kuantum noktarında ($R>100A^0$) karşılaştırılan çalışma ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Kuantum nokta yarıçapı $R=35A^0$ haricinde her iki çalışmada da sıcaklığın taban durum(subband) enerjilerini artırdığı bulunmuştur.

**Çizelge 2.** Taban durum(1s) subband enerji sonuçların literatürle karşılaştırması

| R($A^0$) | $E_{sub1s}$(meV) T=0K Bulunan Sonuçlar | $E_{sub1s}$(meV) T=0K (Sivamaki, 2013) | $E_{sub1s}$(meV) T=300K Bulunan Sonuçlar | $E_{sub1s}$(meV) T=300K (Sivamaki, 2013) |
|---|---|---|---|---|
| 35 | 152.601 | 137.41 | 151.922 | 136.89 |
| 40 | 137.746 | 123.63 | 138.964 | 124.37 |
| 45 | 122.491 | 110.16 | 124.603 | 111.55 |
| 50 | 108.534 | 98.007 | 111.037 | 99.73 |
| 100 | 39.312 | 36.92 | 41.014 | 38.33 |
| 150 | 19.516 | 18.81 | 20.618 | 19.66 |
| 200 | 11.730 | 11.34 | 12.334 | 11.89 |
| 250 | 7.779 | 7.57 | 8.192 | 7.95 |
| 300 | 5.533 | 5.40 | 5.833 | 5.68 |

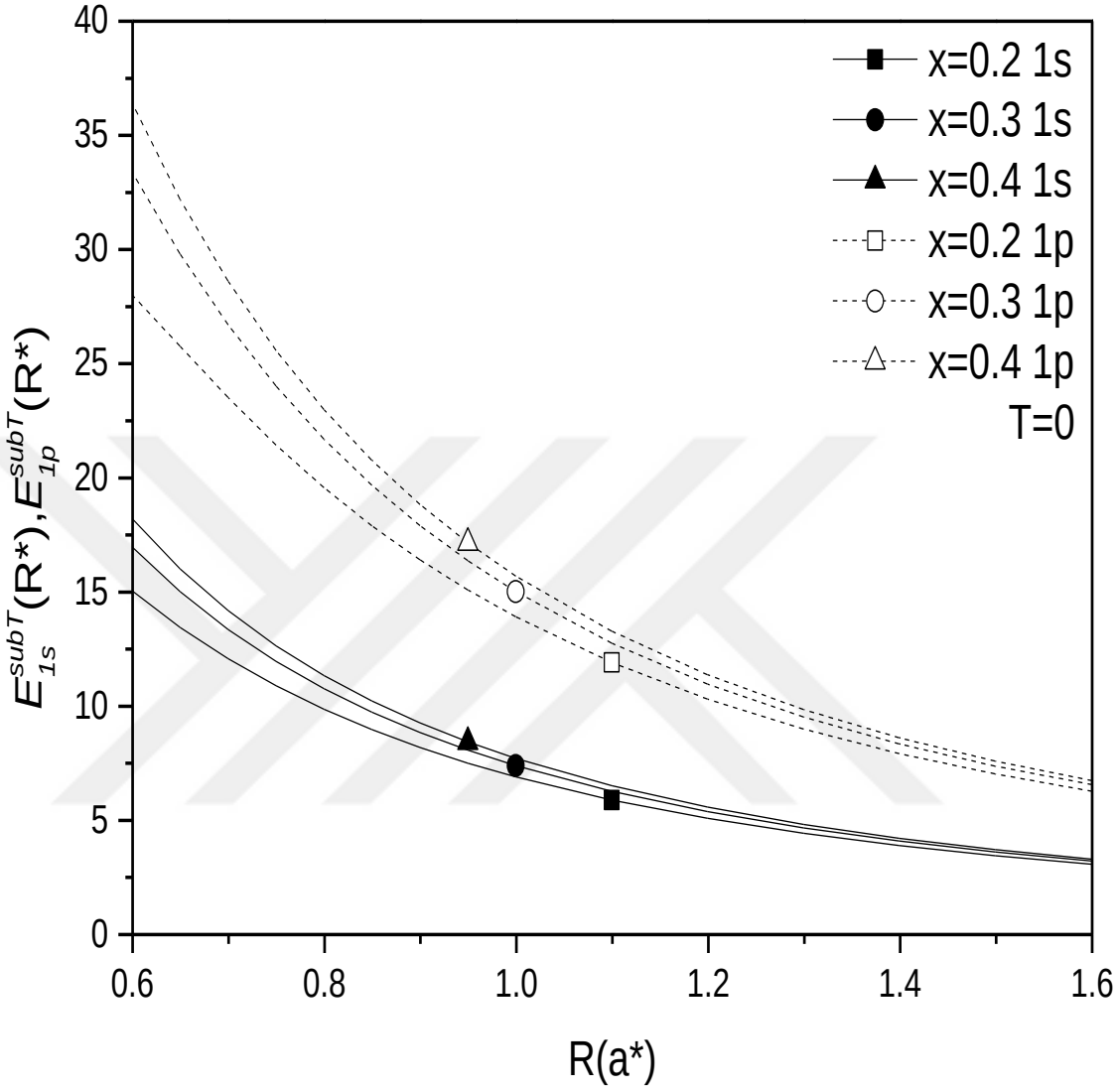
Çizelge 2 de ise sıcaklığın T=0 ve T=300K değerlerinde, Uyarılmış durum(1p) subband enerjileri literatürdeki çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırdığımız çalışma ile uyum içinde olmasını sağlamak için kuantum noktanın yarıçapı $60A^0$ dan başlayarak $300A^0$ a kadar incelenmiştir. Sıcaklığın uyarılmış durum subband enerjilerini artırdığı gözlenmiş büyük yarıçap değerlerinde ise sıcaklığın subband enerjileri üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. Çizelge 2 ve Çizelge 3'te sunulan taban ve uyarılmış durum subband enerjileri kullanılarak $E_{sub1p1s}^{tranT}$ elde edilmiştir. Ayrıca, Çizelge 2 ve Çizelge 3 de, karşılaştırdığımız çalışma ile elde ettiğimiz sonuçların doğruluğunu göstermek için taban ve uyarılmış durum subband enerjileri meV, kuantum noktasının yarıçapı $A^0$ cinsinden tanımlanmıştır.

**Çizelge 3.** Uyarılmış durum (1p) subband enerji sonuçların literatürle karşılaştırması

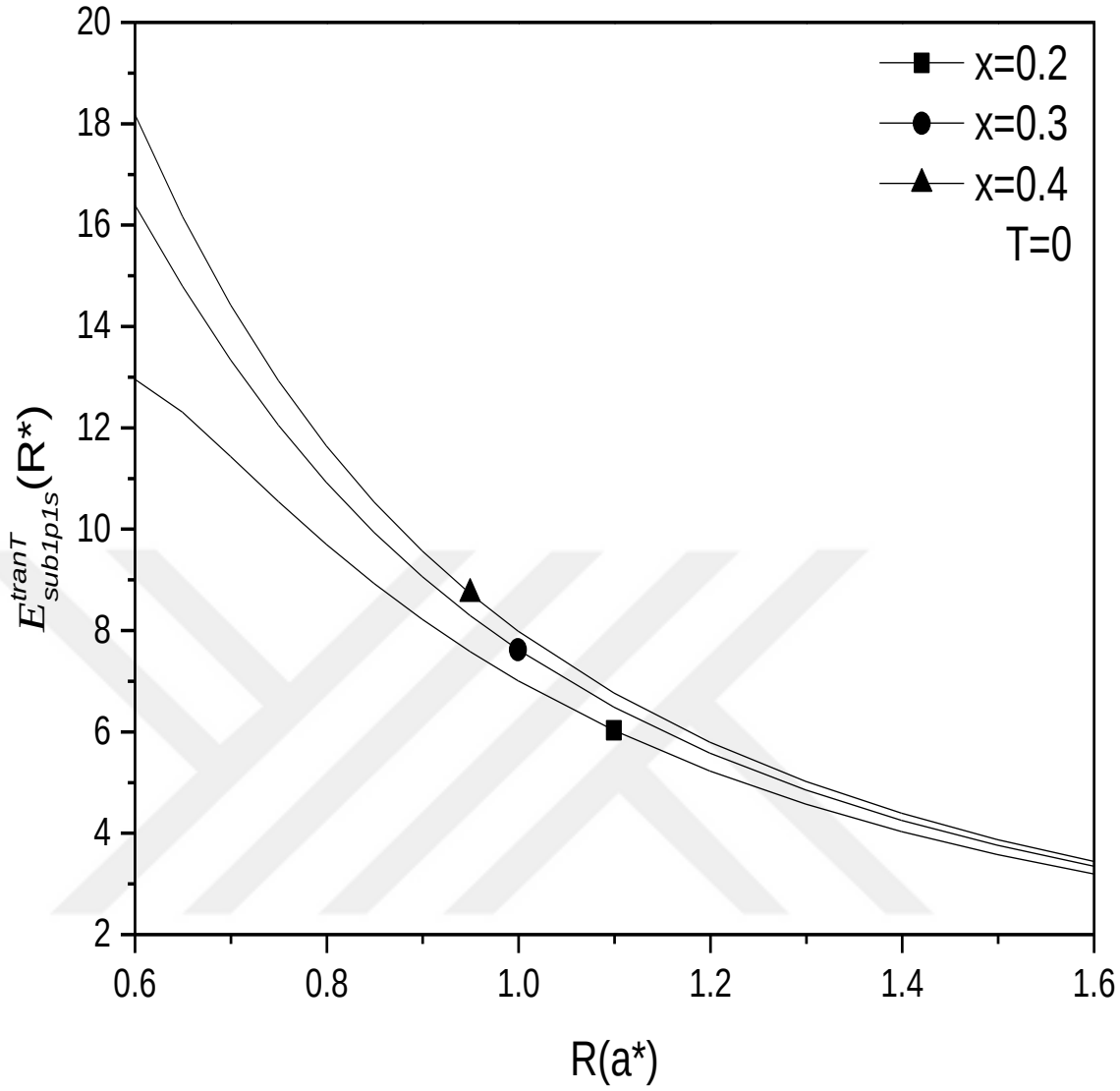
| R($A^0$) | $E_{sub1p}$(meV) T=0K Bulunan Sonuçlar | $E_{sub1p}$(meV) T=0K (Sivamaki, 2013) | $E_{sub1p}$(meV) T=300K Bulunan Sonuçlar | $E_{sub1p}$(meV) T=300K (Sivamaki, 2013) |
|---|---|---|---|---|
| 60 | 154.531 | 146.75 | 156.416 | 145.44 |
| 65 | 146.694 | 135.3 | 149.571 | 137.45 |
| 70 | 133.899 | 123.89 | 137.425 | 126.62 |
| 80 | 111.434 | 103.77 | 115.192 | 106.79 |
| 100 | 79.229 | 74.58 | 82.475 | 77.30 |
| 150 | 40.040 | 38.34 | 41.968 | 40.06 |
| 200 | 23.952 | 23.16 | 25.178 | 24.28 |
| 250 | 15.899 | 15.46 | 16.741 | 16.25 |
| 300 | 11.312 | 11.05 | 11.924 | 11.62 |

T=0K sıcaklıkta, küresel kuantum noktasında bulunan bir elektronun 1s ve 1p subband enerjileri farklı alüminyum konsantrasyonları x = 0.2, 0.3 ve 0.4 için yarıçapa bağlı değişimi Şekil 3.1 de gösterilmiştir. $E_{1p}^{subT}$ve $E_{1s}^{subT}$ enerjileri alüminyum konsantrasyonuna ve nokta yarıçapına bağlı olduğu görülmektedir. Bu şekil, küresel kuantum noktasının boyutunun artmasıyla $E_{1s}^{subT}$ eğrilerinin birbirine daha yakın hale geldiğini ve büyük küresel kuantum noktasının alüminyum konsantrasyonlarına ve yarıçaplarına zayıf bir şekilde bağlı olduğunu kanıtlıyor. $E_{1p}^{subT}$ enerjisinin davranışı da $E_{1s}^{subT}$ ile aynıdır. Artan alüminyum içeriği ile 1s ve 1p alt band enerjileri artar. Şekilden görülebilir ki, R'nin 1p için alt band enerjileri üzerindeki etkileri, 1s için olanlardan çok daha büyüktür. $E_{1s}^{subT}$ ve $E_{1p}^{subT}$ eğrilerinin eğimi, yarıçapa ve

alüminyum konsantrasyonuna bağlıdır. Yarıçapa ve alüminyum konsantrasyonu 1s ve 1p alt band enerjileri üzerinde zıt etkileri olduğu açıktır.

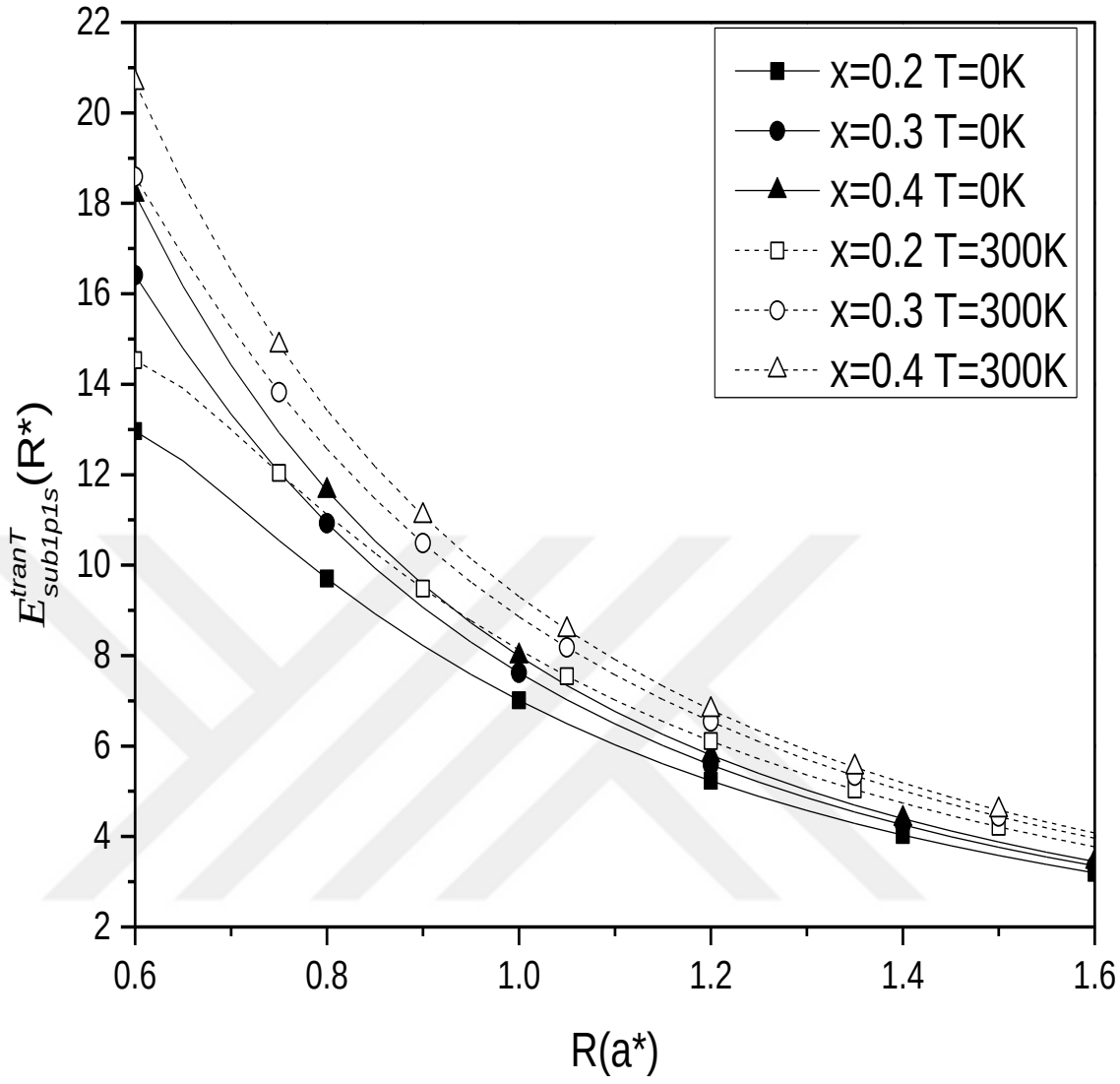



**Şekil 3.1.** Küresel kuantum noktasında bulunan bir elektronun 1s ve 1p subband enerjilerinin farklı alüminyum konsantrasyonları için yarıçapa bağlı değişimi




**Şekil 3.2.** Subband geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi

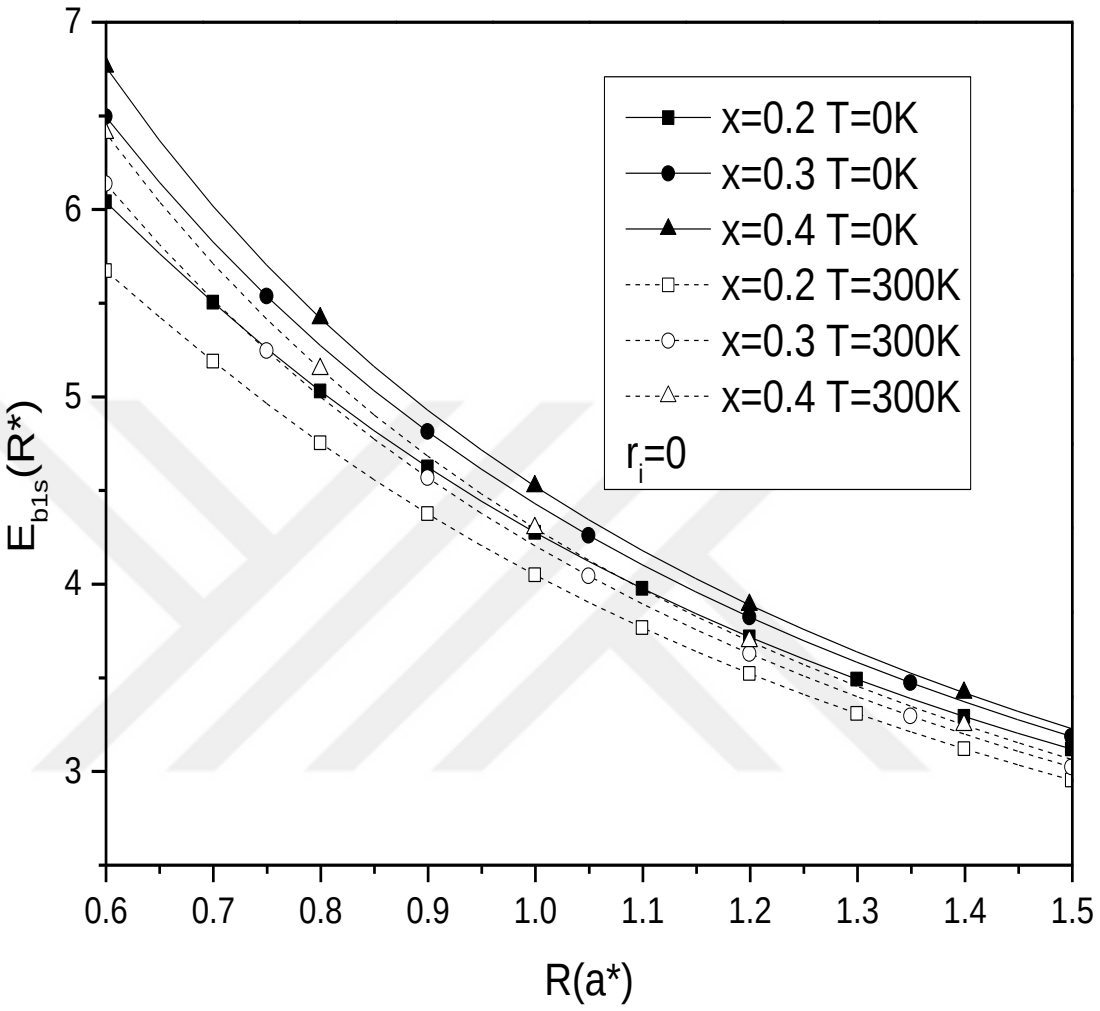
Şekil 3.2 de küresel kuantum noktasında subband geçiş enerjilerinin nokta yarıçapına bağlı değişimi T=0K sıcaklıkta farklı alüminyum konsantrasyonları x = 0.2, 0.3 ve 0.4 hesaplanmış ve enerjilerin benzer tavır sergilediği görülmüştür. $E_{sub1p1s}^{tranT}$ eğrileri, artan nokta boyutu R ile azalır. Ayrıca bu şekil, alüminyum konsantrasyonu içeriği (x) daha yüksek olan küresel kuantum noktalarında$E_{sub1p1s}^{tranT}$ eğrilerinin daha büyük olduğunu göstermektedir. $E_{1p}^{subT}$ve $E_{1s}^{subT}$ arasındaki farktan hesaplanan $E_{sub1p1s}^{tranT}$ nin davranışı, şekil 3.1 de gösterilen $E_{1p}^{subT}$ ve $E_{1s}^{subT}$ enerjilerine benzer tavır göstermektedir.




**Şekil 3.3.** Subband geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları ve sıcaklık için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi.

Subband geçiş enerjisinin( $E_{sub1p1s}^{tranT}$) kuantum nokta yarıçapına(R) bağlı değişimi farklı sıcaklık(T) ve alüminyum konsantrasyonuna(x) bağlı değişimi şekil 3.3 de incelenmiştir. Kuantum nokta yarıçapı arttığında $E_{sub1p1s}^{tranT}$azalmaktadır. Bunun yanında, sıcaklık ve alüminyum konsantrasyonu arttığında $E_{sub1p1s}^{tranT}$'nin arttığı görülmüştür. GaAs ve $Ga_{1-x}Al_xAs$ arasındaki arayüz etrafındaki elektron olasılık yoğunluğunun R ve x'in $E_{sub1p1s}^{tranT}$ üzerindeki etkisini belirlediğini belirtmekte fayda var. Bunun nedeni, elektron olasılık yoğunluğu nokta yarıçapı ve Al içeriği ile değişir. Başka bir deyişle, kuantum noktaların yüksek bariyerli ve büyük yarıçaplı durumunda, elektron dalga fonksiyonu

Ga1-xAlxAs bariyer bölgesine çok az nüfuz edecektir. Yani $E_{sub1p1s}^{tranT}$'lerin enerjilerinin değişiminden tünelleme sorumludur.




**Şekil 3.4.** Taban durum bağlanma enerjisinin kuantum nokta yarıçapına göre sıcaklığın T=0 ve T=300K değerleri için değişimi

Şekil 3.4 de, taban durum bağlanma enerjisinin ($E_{b1s}$) kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi farklı sıcaklık(T) ve alüminyum konsantrasyonu(x) için incelenmiştir. Bağlanma enerjisi hesaplarında yabancı atom kuantum noktanın merkezine yerleştirilmiştir. Kuantum nokta yarıçapının artması ile tuzaklama potansiyelinin elektron üzerindeki etkisi daha zayıf olacağından bağlanma enerjisi azalmaktadır. Sıcaklık arttığında bağlanma enerjisinin azaldığı, x'in artmasında ise arttığı görülmüştür. Sıcaklığın artması ile bağlanma enerjisindeki azalma $E_{sub1p1s}^{tranT}$ enerjinin artmasına neden olacağından elde edilen sonuçlar şekil 1.9 ile uyumludur. Bunun yanında alüminyum

konsantrasyonun artması, tuzaklama potansiyelini artıracağından bağlanma enerjisi artmaktadır. Bu nedenle, alüminyum konsantrasyonun artması ile subband geçişlerinin olabilmesi için daha büyük ( $E_{sub1p1s}^{tranT}$) enerjilerinin gerekli olduğu Şekil 3.3 den görülmektedir.

**Çizelge 4**. Taban durum(1s) yabancı atom(impurty) enerji sonuçlarının literatürle karşılaştırması.

| Kuantum nokta yarıçapı(R) ($a^*$) | $E_{imp1s}$ (R*) Bulunan Sonuçlar Varyasyonel Yöntem | $E_{imp1s}$ (R*) (Mikhail,2010) Güçlü Pertürbasyon | $E_{imp1s}$ (R*) (Mikhail,2010) Varyasyonel Yöntem | $E_{imp1s}$ (R*) (Çakır, 2008) Kuantum Genetik |
|---|---|---|---|---|
| 0.4 | 21.528 | 20.592 | 20.4484 | 17.9107 |
| 0.6 | 10.476 | 10.3118 | 10.1004 | 8.9654 |
| 0.8 | 5.492 | 5.536 | 5.3226 | 4.7685 |
| 1 | 2.968 | 3.083 | 2.8803 | 2.5873 |
| 1.4 | 0.721 | 0.8646 | 0.6907 | 0.5753 |
| 2 | -0.390 | -0.2684 | -0.3997 | -0.4507 |
| 3 | -0.855 | -0.7812 | -0.8569 | -0.8854 |
| 4 | -0.956 | -0.9153 | -0.9565 | -0.9744 |
| 5 | -0.983 | -0.9612 | -0.9837 | -0.9944 |
| 7 | -0.996 | -0.9887 | -0.9962 | -0.9997 |

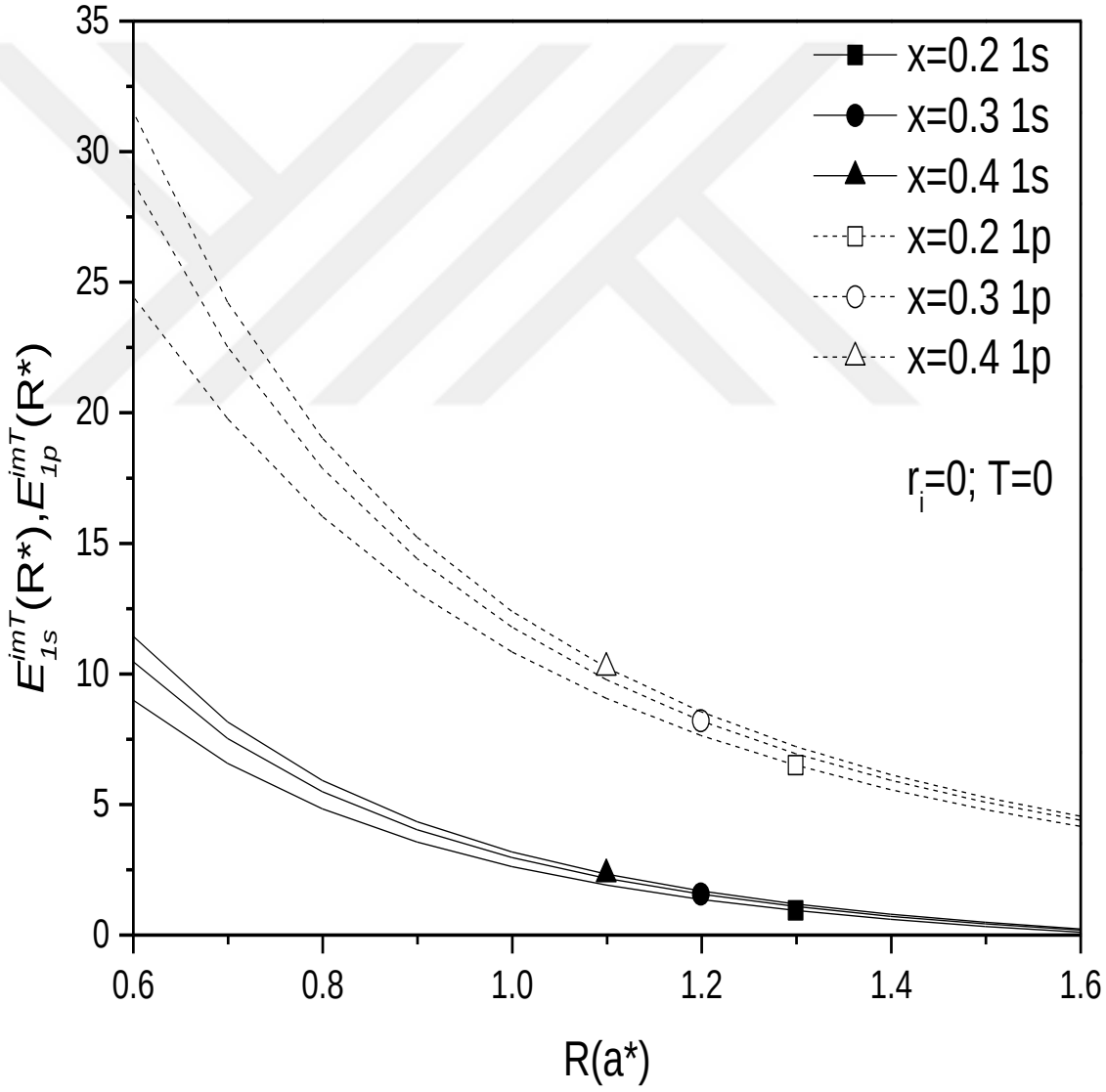
Çizelge 4 de, kuantum nokta yarıçapı değişimine göre, varyasyon yöntemi kullanılarak elde edilen taban durum(1s) yabancı atom(impurity) enerjilerinin

literatürdeki varyasyon yöntemi ve farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplamalarda yabancı atomun konumu $r_i=0$, sıcaklık T=0 ve alüminyum konsantrasyonu x=0.3 alınmıştır. Küçük yarıçap değerlerinde($R<2a^*$) kuantum genetik algoritma yöntemi ile bulunan sonuçlar çok az da olsa farklılık göstermesine rağmen elde edilen diğer sonuçlar karşılaştırılan çalışmalar ile uyum içindedir. Kuantum nokta yarıçapının artması ile taban durum yabancı atom enerjisinin($E_{imp1s}$ ) azaldığı görülmüştür.

**Çizelge 5.** Uyarılmış durum(1p) yabancı atom(impurty) enerji sonuçların literatürle karşılaştırması.

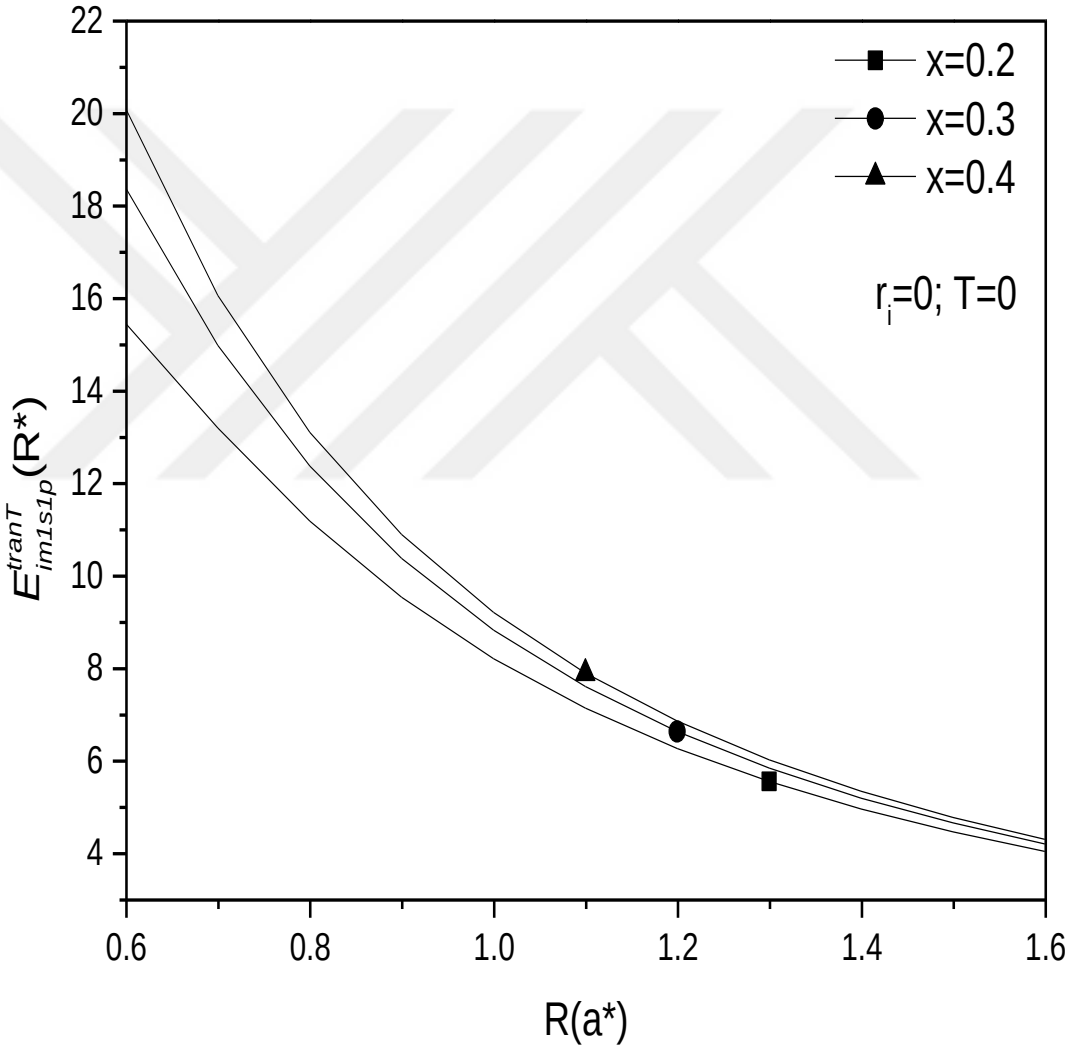
| Kuantum nokta yarıçapı(R) ($a^*$) | $E_{imp1p}$ (R*) Bulunan Sonuçlar Varyasyonel Yöntem | $E_{imp1p}$ (R*) (Mikhail,2010) Güçlü Pertürbasyon | $E_{imp1p}$ (R*) (Mikhail,2010) Varyasyonel Yöntem | $E_{imp1p}$ (R*) (Çakır, 2008) Kuantum Genetik Algoritma |
|---|---|---|---|---|
| 0.6 | 28.868 | 27.7893 | 27.7419 | 25.8050 |
| 0.8 | 17.885 | 17.4907 | 17.4169 | 16.3300 |
| 1 | 11.814 | 11.6486 | 11.5696 | 10.9197 |
| 1.4 | 5.936 | 5.9253 | 5.8459 | 5.5936 |
| 2 | 2.596 | 2.6431 | 2.568 | 2.5031 |
| 3 | 0.813 | 0.8745 | 0.8081 | 0.7783 |
| 4 | 0.232 | 0.2901 | 0.2325 | 0.2176 |
| 5 | -0.007 | 0.0432 | -0.006 | -0.0157 |
| 7 | -0.178 | -0.1422 | -0.1763 | -0.1830 |

Uyarılmış durum (1p) yabancı atom(impurty) enerjilerin kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi varyasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te literatürde bulunan farklı yöntemler kullanılarak yapılmış çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4'te olduğu gibi hesaplamalarda yabancı atomun konumu $r_i$=0, sıcaklık T=0 ve alüminyum konsantrasyonu x=0.3 alınmıştır. Bulduğumuz sonuçların literatürdeki güçlü pertürbasyon ve kuantum genetik algoritma yöntemlerini kullanarak elde edilen sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Uyarılmış durum (1p) yabancı atom(impurty) enerjisinin($E_{imp1p}$) kuantum nokta yarıçapının artmasıyla azaldığı görülmüştür.



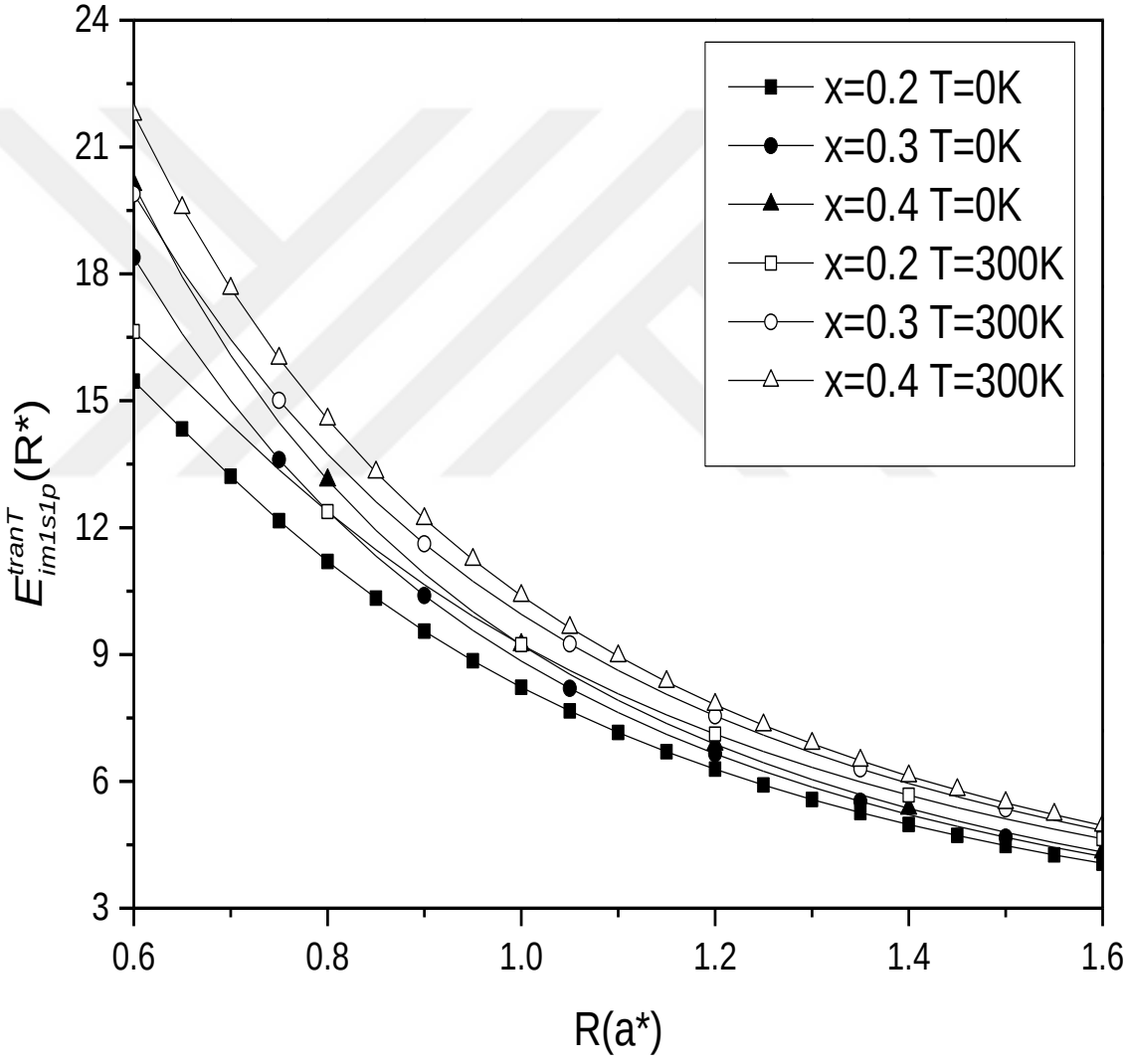

**Şekil 3.5.** Küresel kuantum noktasında bulunan bir yabancı atomun 1s ve 1p impurity enerjilerinin farklı alüminyum konsantrasyonları için yarıçapa bağlı değişimi

Şekil 3.5 de, yaban atomun $r_i = 0$ konumu ve T=0K sıcaklıkta farklı alüminyum konsantrasyonları x = 0.2, 0.3 ve 0.4 için küresel kuantum noktasında bulunan bir yabancı atomun 1s ve 1p impurity enerjilerinin farklı alüminyum konsantrasyonları için yarıçapa bağlı değişimi hesaplanmıştır. Bu şekil, yabancı atom enerjisinin x ve R'ye nasıl bağlı olduğunu gösterir. Şekil 3.6'dan, x konsantrasyonu arttığında herhangi bir R için yabancı atom enerjilerinin arttığını görebiliriz, bu da x'e bağlı ek sınırlamayı yansıtır. Alt band enerjilerinin azalmasıyla aynı şekilde nokta boyutunun artmasıyla yabancı atom enerjileri azalır. Yabancı atom ve alt band enerji grafiklerinin şekli, Şekil 3.1'e çok benzerdir.




**Şekil 3.6.** Yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi

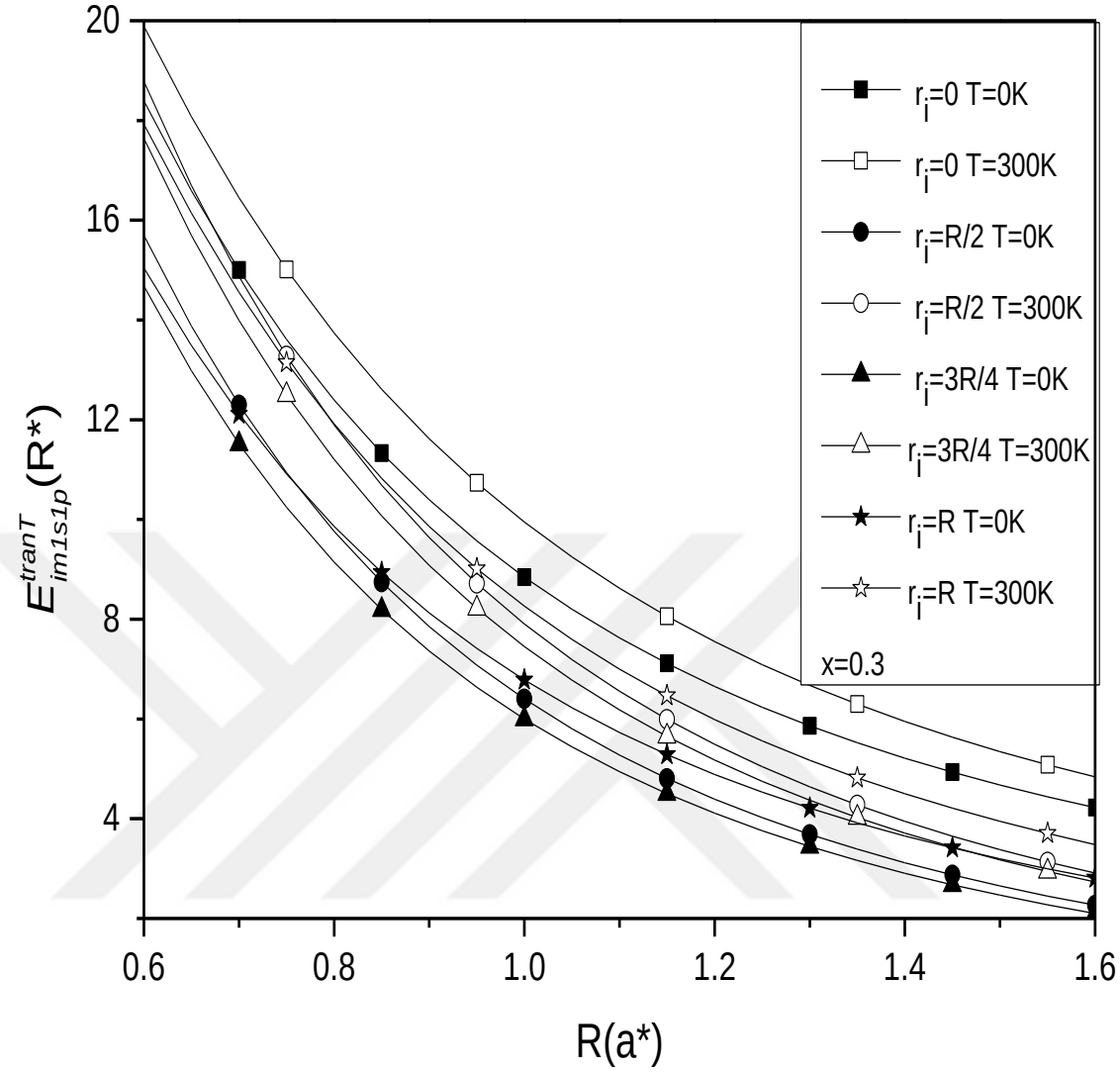
Şekil 3.6 da küresel kuantum noktasında yabancı atom(impurity) geçiş enerjilerinin nokta yarıçapına bağlı değişimi yaban atomun $r_i = 0$ konumu ve T=0K sıcaklıkta farklı alüminyum konsantrasyonları x = 0.2, 0.3 ve 0.4 hesaplanmıştır. $E_{im1s1p}^{tranT}$ geçiş enerjisinin davranışı şekil 3.5 de gösterilen $E_{1s}^{imT}$ ve $E_{1p}^{imT}$ yabancı atom enerjilerine benzer tavır sergilemektedir. Geniş kuantum noktalarında $E_{im1s1p}^{tranT}$ üzerinde alüminyum konsantrasyonun daha az etkili olduğu görülmektedir. Geçiş enerjisindeki azalma sadece nokta yarıçapına değil aynı zaman da alüminyum konsantrasyonuna bağlıdır.




**Şekil 3.7.** T=0, 300K değerleri için yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı alüminyum konsantrasyonları için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi.

Yabancı atom geçiş enerjisi ($E_{im1s1p}^{tranT}$), farklı alüminyum konsantrasyonu ve sıcaklık değerleri için kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi yabancı atomun $r_i$=0 konumu için şekil 3.7 de incelenmiştir. Yabancı atom geçiş enerjisinin ($E_{im1s1p}^{tranT}$) kuantum nokta yarıçapının artması ile azalırken alüminyum konsantrasyonu ve sıcaklığın artışıyla arttığı görülmüştür. Alüminyum konsantrasyonundaki artış tuzaklama potansiyeli artmasına neden oluyor ve böylece kuantum noktanın hapsediciliği artıyor. Bu nedenle alüminyum konsantrasyonu arttığında daha büyük yabancı atom geçiş enerjisine ihtiyaç duyuluyor. Ayrıca, alüminyum konsantrasyonu, sıcaklık ve kuantum nokta yarıçapının geçiş enerjisi üzerindeki etkileri dar kuantum noktalarında(R<1a*) daha belirgin olurken geniş kuantum noktalarında geçiş enerjisi üzerindeki etkileri azalıyor. Bununla birlikte, şekil 3.4 de gösterildiği gibi, alüminyum konsantrasyonu arttığında yabancı atom elektron arasındaki bağlanma enerjisi artıyor ve bunun sonucunda geçiş için daha büyük enerji gerekiyor.

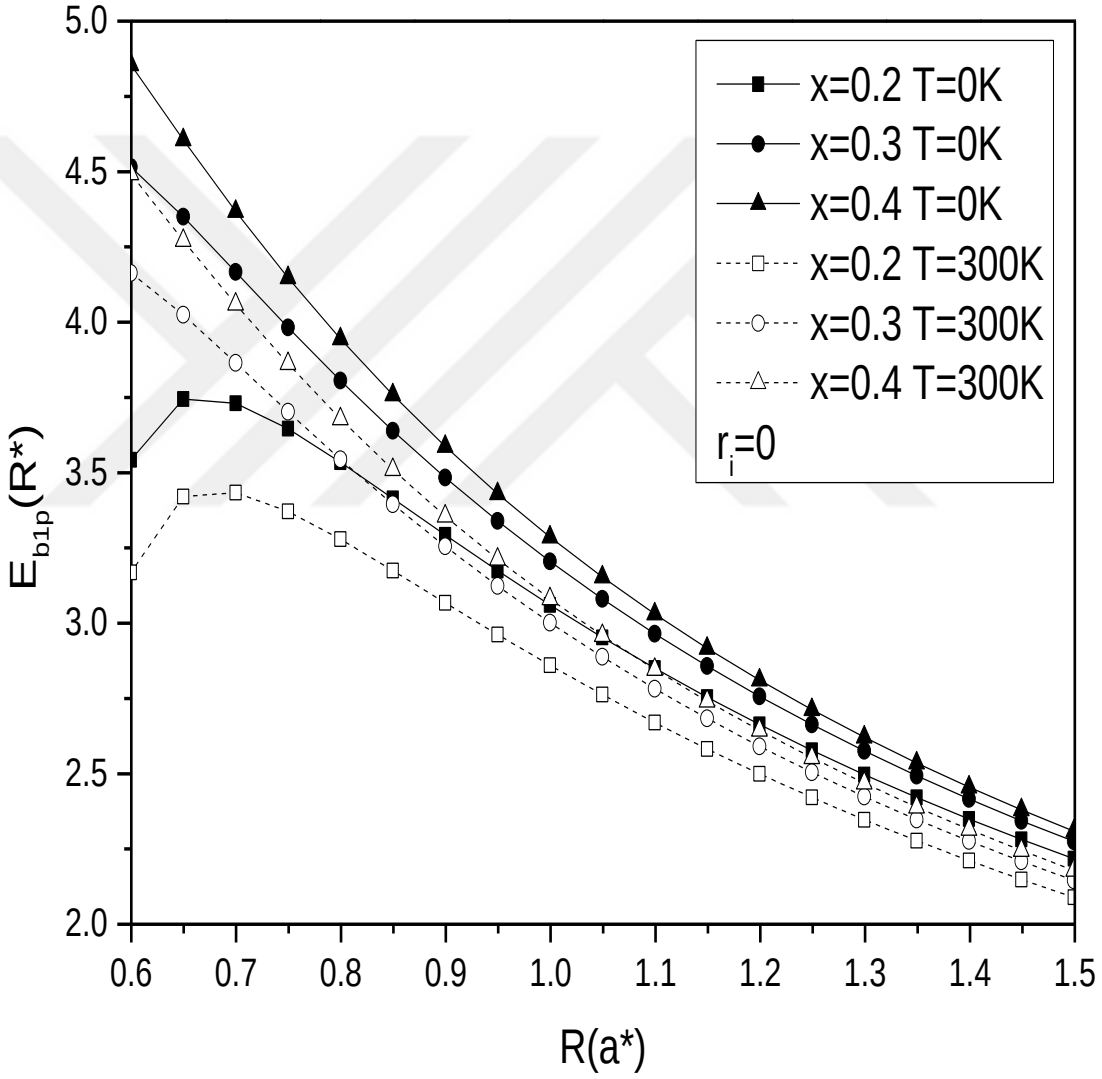
Şekil 3.8 de yabancı atom geçiş enerjisi ($E_{im1s1p}^{tranT}$)'nin kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi sıcaklığın T=0, 300K ve yabancı atomun $r_i$=0,R/2, 3R/4 ve R konumları için incelenmiştir. Hesaplamalarda literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırma yapabilmek için alüminyum konsantrasyonu x=0.3 alınmıştır. Yabancı atom geçiş enerjisi ($E_{im1s1p}^{tranT}$)'nin kuantum nokta yarıçapı arttığında azaldığı görülmüştür. Şekil 3.3 de subband geçiş enerji hesabında gösterildiği gibi sıcaklık arttığında yabancı atom geçiş enerjisi ($E_{im1s1p}^{tranT}$)'nin arttığı ve T=0 ve 300K değerlerinin ikisinde de, yabancı atomun kuantum noktanın merkezinden kenarına doğru gittiğinde 3R/4 değerinde en düşük yabancı atom geçiş enerjisi ($E_{im1s1p}^{tranT}$) sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni tuzaklama potansiyeli içinde uyarılmış durum dalga fonksiyonun olasılık dağılımıdır. Böylece yabancı atom geçiş enerjisini ($E_{im1s1p}^{tranT}$) hesaplayarak yabancı atomun konumu hakkında fikir sahibi olabiliriz.




**Şekil 3.8.** Yabancı atom(impurity) geçiş enerjisinin farklı yabancı atom konumu için küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi

Şekil 3.9 da, uyarılmış durum bağlanma enerjisinin küresel kuantum nokta yarıçapına bağlı değişimi farklı sıcaklık ve alüminyum konsantrasyonu değerleri için incelenmiştir. Hesaplamalarda yabancı atomun konumu $r_i$=0 alınmıştır. Genel olarak uyarılmış durum bağlanma enerjisinin küresel kuantum nokta yarıçapının artışıyla azaldığı görülmüştür. Sıcaklık T=0 ve 300K için, alüminyum konsantrasyonunun x=0.2 değerinde küresel kuantum nokta yarıçapının artışıyla uyarılmış durum bağlanma enerjisinin önce arttığı sonra bir maksimuma ulaştığı ve sonrasında yaklaşık lineer olarak azaldığı görülmüştür. Sıcaklığın artırılması uyarılmış durum bağlanma enerjisindeki bu davranışı değiştirmediği belirlenmiştir. Bunun nedeni alüminyum konsantrasyonunun

azalması tuzaklama potansiyelini azaltmakta ve kuantum noktanın boyutu arttıkça, sınırlama potansiyeli için uyarılmış durum bağlama enerjisi, maksimum değere ulaşana kadar artar ve sonra azalır. Bu davranış kuantum noktalarındaki elektron sınırlamasının değişmesiyle ilgilidir. Kuyu boyutu küçüldüğünde elektronların hapsedilmesi güçlenir ve dolayısıyla uyarılmış durum bağlanma enerjisi artar. Kuantum noktalarının boyutu küçük sınırlı bir değere indirildiğinde, elektronik dalga fonksiyonunun büyük bir kısmı kuyu dışına sızmaya başlar ve dolayısıyla uyarılmış durum bağlama enerjisi azalır.




**Şekil 3.9.** Uyarılmış durum bağlanma enerjisinin kuantum nokta yarıçapına göre sıcaklığın T=0 ve T=300K değerleri için değişimi

Bu çalışmada, taban ve uyarılmış durum bağlanma ve geçiş enerjilerinin alüminyum konsantrasyonu, yabancı atomun konumu, sıcaklık ve küresel kuantum nokta

yarıçapına bağlı değişimleri incelenmiştir. İlk olarak T=0 ve T=300K sıcaklık değerleri için taban ve uyarılmış durum subband enerjileri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde bulunan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Küçük yarıçap değerlerinde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılan çalışma ile farklılık gözlenmiş, çalışmada elde edilen sonuçların özellikle büyük yarıçaplı kuantum noktarında ($R>100A^0$) karşılaştırılan çalışma ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yabancı atom potansiyeli, dielektrik sabiti ve etkin kütle tanımındaki farklılık olarak değerlendirilebilir. Sıcaklık ve alüminyum konsantrasyonu arttığında taban ve uyarılmış durum subband enerjileri artarken küresel kuantum yarıçapı artışıyla azaldığı görülmüştür.

Taban ve uyarılmış durum yabancı atom enerjileri için elde edilen sonuçlar literatürde bulunan farklı metotlar ile bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4 ve 5'te ele alınan küresel kuantum nokta yarıçapının her değeri için elde edilen sonuçlar varyasyon ve pertürbasyon yöntemi ile uyum içinde olduğu görülürken Kuantum Genetik Algoritma ile bulunan sonuçlardan farklı olduğu gözlenmiştir. Yabancı atom geçiş enerjisinin sıcaklık ve alüminyum konsantrasyonu arttığında arttığı, küresel kuantum yarıçapı artışıyla ise azaldığı görülmüştür. İlaveten yabancı atomun farklı konumları için yabancı atom geçiş enerjisi hesaplanmış ve yabancı atom küresel kuantum nokta merkezinden kenarına doğru yer değiştirdiğinde yabancı atom geçiş enerjisinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni tuzaklama potansiyeli içindeki uyarılmış durum dalga fonksiyonun olasılık dağılımıdır. Böylece yabancı atom geçiş enerjisini hesaplayarak yabancı atomun konumu hakkında fikir sahibi olabiliriz. Ayrıca uyarılmış durum bağlanma enerji de farklı alüminyum konsantrasyonu ve sıcaklık değerleri için hesaplanmıştır. Sıcaklığın uyarılmış durum bağlanma enerjisini azaltırken alüminyum konsantrasyonunun artırdığı görülmüştür.

Özetle, alüminyum konsantrasyonu, yabancı atom konumu, küresel kuantum nokta yarıçapı ve sıcaklığa bağlı subband ve yabancı atom geçiş enerjilerini hesaplamak, malzemenin hangi uygulamalarda ne kadar verimli kullanılacağını anlamak için gereklidir. Özellikle mikroelektronik, fotovoltaik, optoelektronik ve sensör teknolojileri gibi alanlarda yarı iletkenlerin performansını optimize etmek, bu hesaplamalara dayanır. Sonuç olarak, subband ve yabancı atom geçiş enerjilerinin doğru hesaplanması, yarı iletken malzemelerin hangi elektronik cihazlarda kullanılabileceğini belirler.

# KAYNAKLAR


Al, E.B., Kasapoglu, E., Sakiroglu, S., Sari, H., Sokmen, I., Duque, C.A. (2020). Binding energies and optical absorption of donor impurities in spherical quantum dot under applied magnetic field. *Physica E* 119 114011.

Alivisatos, A. P. (1996). Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*, 271(5251), 933-937.

Bardeen J. and Brattain W. (1948), The Transistor, a Semi-Conductor Triode. *Physical Review* 74 230-231.

Bastard, G. (1988). Wave Mechanics Applied to Semiconductor Heterostructures. Les Éditions de Physique.

Borghi R., (2018). The variational method in quantum mechanics: an elementary introduction. *Eur. J. Phys*. 39 035410.

Bouhassoune, M., Charrour, R., Fliyou, M., Bria, D., Nougaoui, A. (2001). Binding energy of shallow impurities in a polar quantum well wire. *Physica B: Condensed Matter* 304, 1–4, 389-397

Braun, F. (1874). Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle [Metal sülfürler yoluyla akım iletimi üzerine]. Annalen der Physik und Chemie, 153 (4): 556–563.

Brus, L. E. (1984). Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. *Journal of Chemical Physics*, 80(9), 4403.

Bulut, P., I. Erdogan, I., Akbas, H. (2014). Binding energy of 2p-bound state of a hydrogenic donor impurity in a GaAs/$Ga_{1-x}Al_xAs$ spherical quantum dot under hydrostatic pressure. *Physica E* 63 299-303.

Çakır, B., Özmen, A., Atav, Ü., Yüksel H., and Yakar, Y. (2008). Calculatıon Of Electronıc Structure Of A Spherıcal Quantum Dot Usıng A Combınatıon Of Quantum

Genetıc Algorıthm And Hartree–Fock–Roothaan Method. *International Journal of Modern Physics C 19*, 599-609

Cho, A. Y. (1971). Molecular Beam Epitaxy. *Applied Physics Letters*, 19(8), 347-349.

Ekimov, A. I., Efros, A. L., Onushchenko, A. A. (1985). Quantum size effect in semiconductor microcrystals. *Solid State Communications*, 56(11), 921-924.

Erdogan, I., Akankan, O., Akbas, H. (2013). Simultaneous effects of temperature, hydrostatic pressure and electric field on the self-polarization and electric field polarization in a GaAs/Ga0.7Al0.3As spherical quantum dot with a donor impurity. *Superlattices and Microstructures* 59 13-20.

Esaki, L., Tsu, R. (1970). Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors. IBM Journal of Research and Development, 14(1), 61-65.

Fasol, G. (1990). Quantum Wire Lasers. *Applied Physics Letters*, 58(8), 801-803.

Gossard, A. C., et al. (1977). Quantum well structures grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 31(9), 671-673.

Greene, R. L., Bajaj, K. K. (1983). 'Energy levels of hydrogenic impurity states in GaAs-Ga1–xAsxAs quantum well structures. *Solid State Commun.*, 45:825.

Griffiths, D. J. (2005). Introduction to Quantum Mechanics." Pearson Education.

Hanson, R. (2007). Spins in Few-Electron Quantum Dots. *Reviews of Modern Physics*, 79(4), 1217-1265.

Hohenberg, P., & Kohn, W. (1964). Inhomogeneous Electron Gas. *Physical Review*, 136 (3B), B864.

Jacoboni, C., & Lugli, P. (1989). The Monte Carlo Method for Semiconductor Device Simulation. Springer.

Kasapoglu, E., Sari, H., Sokmen. I. (2003). Geometrical effects on shallow donor impurities in quantum wires. *Physica E* 19 332 – 335.

Kirak, M., Altinok, Y., Yilmaz, S. (2013). The effects of the hydrostatic pressure and temperature on binding energy and optical properties of a donor impurity in a spherical quantum dot under external electric field. *J. Lumin.* 136 415-421.

Kostic, R., Stojanovic. D. (2020) Intersubband transitions in spherical quantum dot quantum well nanoparticle. *Opt. Quantum Electron. 52* 1-10.

Landau, L.D., &Lifshitz, E. M. (1977). Quantum Mechanics:Non-Relativistic Theary. Pergamon Press.

Lieber, C. M. (2003). Nanoscale Science and Technology: Building a Big Future from Small Things. *MRS Bulletin,* 28(7), 486-491.

Loss, D., & DiVincenzo, D. P. (1998). Quantum Computation with Quantum Dots. *Physical Review A*, 57(1), 120-126.

Mailhiot, C., Yia-Chung Chang, and McGill, T. C. (1982) 'Energy spectra of donors in GaAs/Ga1–xAlx As quantum well structures in the effective mass approximation. *Phys. Rev. B* 26, 4449.

Mese, A.I. (2021). The normalized transition energies between ground (1s) and first excited (1p) states in a GaAs/Ga1-xAlxAs spherical quantum dot (SQD). *Superlattices and Microstructures* 156 106932.

Mikhail, I.F.I., Ismail, I.M.M. (2010). Hydrogenic impurity in a quantum dot: comparison between the variational and strong perturbation methods. *Superlattice. Microst. 48* 388–400.

Mishra, U. K., Parikh, P., & Yi-Feng, W. (2008). AlGaN/GaN HEMTs - An Overview of Device Operation and Applications. Proceedings of the IEEE.

Nobel Prize. (2000). The Nobel Prize in Physics 2000. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2000/summary/

Nouailhat, A. (2007). An Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. John Wilwy and Sons Inc, Hoboken, USA

Peter, A.J., Navaneethakrishnan, K. (2009). Hydrogenic Donor in a Spherical Quantum Dot with Different Confinements. *Chin. Phys. Lett.* 26(8) 087302.1-4.

Pierson, H. O. (1999). Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications. William Andrew.

Roup, R. R., & Kilby, J. S. (1956). Transistor amplifier packaged in steatite. *Electronics, Oct*.

Sadeghi, E. (2009). Impurity binding energy of excited states in spherical quantum dot. *Physica E* 41 1319-1322.

Sadeghi, E., Rezaie, G. (2010). Effect of magnetic field on the impurity binding energy of the excited states in spherical quantum dot. *Pramana –J. Phys*. 75(4) 749-755.

Shankar, R.(1944). Principles of Quantum Mechanics. Plenum Press.

Sivakami, A., Gayathri, V. (2013). Hydrostatic pressure and temperature dependence of dielectric mismatch effect on the impurity binding energy in a spherical quantum dot. *Superlattices and Microstructures* 58 218-227.

Sivakami, A., Navaneethakrishnan, K. (2008). Correlation energy in a spherical quantum dot. *Physica E* 40 649-653.

Slater, J. C., & Koster, G. F. (1954). Simplified LCAO Method for the Periodic Potential Problem. *Physical Review*, 94(6), 1498-1524.

Smith, R. A. (1959). Semiconductors. Cambridge University Press.

Stringfellow, G. B. (1999). Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice. Academic Press.

Vahala, K. J. (2003). Optical Microcavities. *Nature*, 424, 839-846.

Weidner, R. T., Sells, R. L. (1980). Elementary Modern Physics. Allyn and Bacon, Boston,Third edition.

Yilmaz, S., Safak, H. (2007). Oscillator strengths for the intersubband transitions in a CdS–SiO2 quantum dot with hydrogenic impurity. *Physica E* 36 40-44.

Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Springer.

Zhao, G.J., Liang, X.X., Ban, S.L. (2003). Binding energies of donors in quantum wells under hydrostatic pressure. *Physics Letters A* 319 191–197.

# ÖZGEÇMİŞ

İlk ve Orta Okulu Sivas'ta tamamladıktan sonra liseyi İstanbul Maçka Teknik Lisesi Elektrik bölümünde tamamladım. Üniversite hayatım Edirne de Trakya üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde tamamladım. Eğitime devam ederken formasyonumu da eğitim fakültesinden aldım. 1997 de askeri görevimi tamamladıktan sonra 2 sene Yerli bir ilaç firmasında İstanbul Bakırköy bölgesinde tıbbi mümessil olarak çalıştım. Daha sonra Hadımköy BP benzin istasyonunda bir sene kadar muhasebe ve finansman müdürlüğü yaptıktan sonra 2000 yılında fizik öğretmeni olarak dershanede göreve başladım. İki yıllık öğretmenlik deneyimimden sonra yaklaşık 20 sene Kurucu Müdürlük ve rehberlik alanında çalıştım. Hayatım boyunca tüm öğrencilerime fiziğin hayatın kendisi olduğunu ve severek yapabilecekleri bir bilim dalı olduğunu göstermeye çalıştım. Bundan sonraki yaşamımı fiziğin diğer boyutlarını öğrenmek ve öğretmekle geçirmeyi planlıyorum. Bilim yolunda atılan hiçbir adımın gereksiz olmadığını ve harcanan her emeğin bir karşılık bulacağını düşünüyor geleceğe adımlarımı bu yönde atmayı planlıyorum.