



**T.C.  
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇLÜ GaAlAs/GaAs VE GaInAs/GaAs NANO YAPILARIN  
ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ozan ÖZTÜRK  
(20169252003)**

**Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ**

**SIVAS  
EYLÜL, 2018**

**Ozan ÖZTÜRK**'ün hazırladığı ve “**ÜÇLÜ GaAlAs/GaAs VE GaInAs/GaAs NANO YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

<b>Tez Danışmanı</b>	<b>Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ</b> ASELSAN Genel Müdür Yardımcısı	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Doç. Dr. Fazlı SÖZMEN</b> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Prof. Dr. Hülya METİN GÜBÜR</b> Mersin Üniversitesi	.....

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. İsmail ÇELİK**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



*Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından **M-679** Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Ozan ÖZTÜRK, 2018



Sevgilerini her zaman hissettiğim babaannem ve dedeme...

## **ETİK**

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

28.09.2018

Ozan ÖZTÜRK

## TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca emeğini, desteğini eksik etmeyen, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemeyen, engin bilgilerinden ve tecrübelerinden yararlandığım, gelecekteki mesleki yaşamımda da önerilerinden faydalanacağımı düşündüğüm çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Beni her zaman destekleyen, motive eden, her konuda yanımda olan annem Prof. Dr. Emine Öztürk'e, babam Dr. Öğretim Üyesi Adnan ÖZTÜRK'e ve kardeşim Eren'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü'ndeki ve Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma anlayış, sabır ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

### ÜÇLÜ GaAlAs/GaAs VE GaInAs/GaAs NANO YAPILARIN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

Ozan ÖZTÜRK

Yüksek Lisans Tezi

Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2018, 67 + xvi sayfa

Bu çalışmada,  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$  yapılardan oluşan hem simetrik-asimetrik çift kuantum kuyuları hem de asimetrik üçlü kuantum kuyularının elektronik özellikleri (enerji özdeğer ve özfonksiyonları, olasılık yoğunlukları), sistemin ayarlanabilir fiziksel parametreleri (kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel kalınlığı) bağlı olarak araştırılmıştır. Etkin kütle yaklaşımı kullanılarak, potansiyel profili tasarlanan sistemin enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonları, Schrödinger dalga denkleminin çözümüyle hesaplanmış ve ilgili yapıların elektronik özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; GaAlAs/GaAs yapıların elektronik özelliklerinin değişimi, sistemdeki fiziksel parametrelere GaInAs/GaAs yapısından daha duyarlıdır. Yapı parametrelerine bağlı olarak sistemlerin elektronik yapılarının değişimi, kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel kalınlığının amaca yönelik ayarlanabilir parametreler biçiminde değerlendirilmesine olanak sağlar.

**Anahtar kelimeler:** GaAlAs/GaAs kuantum kuyusu, GaInAs/GaAs kuantum kuyusu, enerji özdeğeri, dalga fonksiyonu, olasılık yoğunluğu, kuyu genişliği, engel kalınlığı, alaşım oranı.



## ABSTRACT

### ELECTRONIC PROPERTIES OF TRIPLE GaAlAs / GaAs AND GaInAs / GaAs NANO STRUCTURES

Ozan ÖZTÜRK

Master of Science Thesis

Department of Nanotechnology Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2018, 67 + xvi pages

In this study, the electronic properties (energy eigenvalues and eigenfunctions, probability densities) of both symmetric-asymmetric double quantum wells and asymmetric triple quantum wells consisting of  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$  and  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$  structures have been investigated depending on the adjustable structure parameters (well width, potential height and barrier thickness) of the system. Using the effective mass approach, the energy levels and wave functions of the system with the potential profile are calculated by solving the Schrödinger wave equation and the electronic properties of the related structures are compared. According to the results obtained; the change of electronic properties of  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  structure is more sensitive than  $\text{GaInAs}/\text{GaAs}$  structure to the physical parameters in the system. The variation of electronic structures of the systems as depending on the structure parameters allows the evaluation of well width, potential height and barrier thickness in the form of adjustable parameters for the purpose.

**Key words:**  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  quantum well,  $\text{GaInAs}/\text{GaAs}$  quantum well, energy eigenvalue, wave function, probability density, well width, barrier thickness, alloy ratio.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xvi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER</b> .....	4
2.1 Giriş .....	4
2.2 Yarıiletkenler .....	6
<b>3. MATERYAL VE METOT</b> .....	10
3.1 Hesaplama Yöntemi .....	10
3.2 GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs Yapılarının Karşılaştırılması .....	13
<b>4. ÇİFT KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ</b> .....	16
4.1 Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Alaşım Oranının Etkisi .....	16
4.2 Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Kuyu Genişliğinin Etkisi .....	22
4.3 Simetrik ve Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Engel Kalınlığının Etkisi .....	27
<b>5. ÜÇLÜ KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ</b> .....	37
5.1 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Alaşım Oranının Etkisi .....	37
5.2 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Kuyu Genişliğinin Etkisi .....	43
5.3 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Engel Kalınlığının Etkisi .....	49
<b>6. SONUÇ VE TARTIŞMA</b> .....	57
<b>KAYNAKLAR</b> .....	61
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	66

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 2.1</b>	III-V bileşikli önemli yarıiletken malzemelerinin örgü sabitine karşılık gelen yasak enerji aralığı ve dalga boyu .... 9
<b>Şekil 3.1</b>	a) $Ga_{0.88}Al_{0.12}As/GaAs$ , b) $Ga_{0.88}In_{0.12}As/GaAs$ yapıları için simetrik çift kare kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve üç bağlı durum enerji seviyesindeki elektronun olasılık yoğunluğu ..... 15
<b>Şekil 4.1</b>	$GaAlAs/GaAs$ yapısı için a) $x = 0.10$ , b) $x = 0.15$ , c) $x = 0.20$ değerlerinde asimetrik çift kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları ..... 17
<b>Şekil 4.2</b>	$GaInAs/GaAs$ yapısı için a) $x = 0.10$ , b) $x = 0.15$ , c) $x = 0.20$ değerlerinde asimetrik çift kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları ..... 18
<b>Şekil 4.3</b>	a) $GaAlAs/GaAs$ yapısı, b) $GaInAs/GaAs$ yapısı için alaşım oranına karşılık çift kuantum kuyularında potansiyel yüksekliğinin ve bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi... 20
<b>Şekil 4.4</b>	a) $GaAlAs/GaAs$ yapısı, b) $GaInAs/GaAs$ yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak çift kuantum kuyularında elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları ..... 21
<b>Şekil 4.5</b>	$GaAlAs/GaAs$ yapısı için a) $L = 8$ nm, b) $L = 16$ nm genişliklerinde asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları ..... 23
<b>Şekil 4.6</b>	$GaInAs/GaAs$ yapısı için a) $L = 8$ nm, b) $L = 16$ nm genişliklerinde asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları ..... 23
<b>Şekil 4.7</b>	a) $GaAlAs/GaAs$ yapısı, b) $GaInAs/GaAs$ yapısı için kuyu genişliğine bağlı olarak bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi..... 25
<b>Şekil 4.8</b>	a) $GaAlAs/GaAs$ yapısı, b) $GaInAs/GaAs$ yapısı için kuyu genişliğinin değişimine karşılık elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları ..... 26
<b>Şekil 4.9</b>	$GaAlAs/GaAs$ yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde simetrik DSVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları ..... 29
<b>Şekil 4.10</b>	$GaInAs/GaAs$ yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde simetrik DSVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları ..... 29

<b>Şekil 4.11</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde simetrik DISPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	30
<b>Şekil 4.12</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde simetrik DISPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	30
<b>Şekil 4.13</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde asimetrik SGQW-SPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	31
<b>Şekil 4.14</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde asimetrik SGQW-SPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	31
<b>Şekil 4.15</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde asimetrik IPQW-IVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	32
<b>Şekil 4.16</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $b = 0$ ve b) $b = 4$ nm genişliklerinde asimetrik IPQW-IVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	32
<b>Şekil 4.17</b>	a) DSVQW sistemi, b) DISPQW sistemi için engel kalınlığının fonksiyonu olarak ilk iki enerji seviyesinin ve bu seviyeler arasındaki enerji farkının değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.) .....	34
<b>Şekil 4.18</b>	a) SGQW-SPQW sistemi, b) IPQW-IVQW sistemi için engel kalınlığının fonksiyonu olarak ilk iki enerji seviyesinin ve bu seviyeler arasındaki enerji farkının değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.) .....	35
<b>Şekil 5.1</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $x = 0.10$ , b) $x = 0.15$ , c) $x = 0.20$ değerlerinde asimetrik üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	38
<b>Şekil 5.2</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $x = 0.10$ , b) $x = 0.15$ , c) $x = 0.20$ değerlerinde asimetrik üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	39
<b>Şekil 5.3</b>	a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranına karşılık asimetrik üçlü kuantum kuyularının potansiyel yüksekliğinin ve bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi .....	41
<b>Şekil 5.4</b>	a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak asimetrik üçlü kuantum kuyularında elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları .....	42

<b>Şekil 5.5</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $L = 5$ nm, b) $L = 10$ nm, c) $L = 15$ nm genişliklerinde üçlü kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları .....	44
<b>Şekil 5.6</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $L = 5$ nm, b) $L = 10$ nm, c) $L = 15$ nm genişliklerinde üçlü kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları .....	45
<b>Şekil 5.7</b>	a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğine bağlı olarak üçlü kuantum kuyularında bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi .....	47
<b>Şekil 5.8</b>	a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğinin değişimine karşılık üçlü kuantum kuyularında elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları .....	48
<b>Şekil 5.9</b>	GaAlAs/GaAs yapısı için a) $b_L = 0$ ; $b_R = 0$ , b) $b_L = 3$ nm; $b_R = 3$ nm, c) $b_L = 3$ nm; $b_R = 8$ nm, d) $b_L = 8$ nm; $b_R = 3$ nm kalınlıklarında asimetrik üçlü kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve ilk üç bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	50
<b>Şekil 5.10</b>	GaInAs/GaAs yapısı için a) $b_L = 0$ ; $b_R = 0$ , b) $b_L = 3$ nm; $b_R = 3$ nm, c) $b_L = 3$ nm; $b_R = 8$ nm, d) $b_L = 8$ nm; $b_R = 3$ nm kalınlıklarında asimetrik üçlü kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve ilk üç bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları .....	51
<b>Şekil 5.11</b>	a) $b_L = 0$ ve b) $b_L = 3$ nm için sağ engel kalınlığına bağlı olarak ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.) .....	53
<b>Şekil 5.12</b>	a) $b_R = 0$ ve b) $b_R = 3$ nm için sol engel kalınlığına bağlı olarak ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.) .....	53
<b>Şekil 5.13</b>	a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için x-ekseninde $b_L$ parametresi ve y-ekseninde $b_R$ parametresinin değişimine karşılık ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi .....	54
<b>Şekil 5.14</b>	x-ekseninde $b_L$ parametresi ve y-ekseninde $b_R$ parametresinin değişimine karşılık, GaAlAs/GaAs yapısı için a) taban durum, b) ikinci durum, c) üçüncü durum ve GaInAs/GaAs yapısı için d) taban durum, e) ikinci durum, f) üçüncü durum enerji seviyelerindeki elektronların sol, orta ve sağ kuyuda bulunma olasılıkları .....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 2.1</b> Bazı önemli yarıiletkenlerin özellikleri (D-Direkt, I-İndirekt geçiş) .....	9
<b>Çizelge 3.1</b> $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ ve $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$ yapıları için alaşım oranına bağlı olarak potansiyel yüksekliği, yasak enerji aralığı ve etkin kütle denklemleri .....	14
<b>Çizelge 3.2</b> $Ga_{0.88}Al_{0.12}As/GaAs$ ve $Ga_{0.88}In_{0.12}As/GaAs$ sistemlerinde sabit yapı parametreleri için simetrik çift kare kuantum kuyusunun elektronik özellikleri .....	14
<b>Çizelge 4.1</b> Kuyular arasında engel yokken ve varken $GaAlAs/GaAs$ ve $GaInAs/GaAs$ yapılarındaki ilk iki enerji değeri (meV biriminde) .....	36
<b>Çizelge 4.2</b> Kuyular arasında engel yokken ve varken $GaAlAs/GaAs$ ve $GaInAs/GaAs$ yapıları için ilk iki enerji seviyesinde elektronların bulunma olasılıkları .....	36
<b>Çizelge 5.1</b> $GaAlAs/GaAs$ ve $GaInAs/GaAs$ yapısı için farklı engel kalınlıkları için asimetrik üçlü kuantum kuyularında ilk üç seviye arasındaki enerji farkları (meV biriminde) .....	55

## SİMGELER DİZİNİ

$m^*$	Elektronun etkin kütlesi
$m_0$	Serbest elektron kütlesi
$h$	Planck sabiti
$E_n$	n. seviyedeki enerji özdeğeri
$\Psi_i$	i. enerji seviyesindeki özfonksiyon
$\delta_n$	Faz farkı
$T$	Sıcaklık
$c_{in}$	Açılım katsayıları
$N_0$	Sistem boyutu
$P_i^W$	i. enerji seviyesinin W kuyusundaki olasılık yoğunluğu
$V_0$	Kuşatma potansiyelinin yüksekliği
$E_g$	Yasak enerji aralığı
$x$	Alaşım miktarı (oranı)
$L_b$	Sonsuz yükseklikteki potansiyel kuyusunun genişliği
$L$	Kuyu genişliği
$L_L$	Sol kuyu genişliği
$L_M$	Orta kuyu genişliği
$L_R$	Sağ kuyu genişliği
$b$	Engel kalınlığı
$b_L$	Sol engel kalınlığı
$b_R$	Sağ engel kalınlığı

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>MOCVD</b>	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme ( <i>Metal Organic Chemical Vapour Deposition</i> )
<b>MBE</b>	Moleküler Demet Epitaksi ( <i>Molecular Beam Epitaxy</i> )
<b>QW</b>	Kuantum Kuyusu ( <i>Quantum Well</i> )
<b>VCSEL</b>	Yüzeyden-Işımalı Dikey-Kavite Lazeri ( <i>Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser</i> )
<b>FET</b>	Alan Etkili Transistör ( <i>Field Effect Transistor</i> )
<b>MODFET</b>	Modülasyon Katkılı Alan Etkili Transistörleri ( <i>Modulation-Doped Field Effect Transistor</i> )
<b>GaAs</b>	Galyum Arsenit ( <i>Gallium Arsenite</i> )
<b>AlAs</b>	Alüminyum Arsenit ( <i>Aluminum Arsenite</i> )
<b>InAs</b>	İndiyum Arsenit ( <i>Indium Arsenite</i> )
<b>GaAlAs</b>	Galyum Alüminyum Arsenit ( <i>Gallium Aluminum Arsenite</i> )
<b>GaInAs</b>	Galyum İndiyum Arsenit ( <i>Gallium Indium Arsenite</i> )
<b>ATQW</b>	Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyuları ( <i>Asymmetric Triple Quantum Wells</i> )
<b>DSVQW</b>	Simetrik Çift Yarı V-Şekilli Kuantum Kuyusu ( <i>Double Semi V-Shaped Quantum Wells</i> )
<b>DISPQW</b>	Simetrik Çift Ters Yarı Parabolik Kuantum Kuyusu ( <i>Double Inverse Semi Parabolic Quantum Wells</i> )
<b>SGQW</b>	Yarı Eğik Kuantum Kuyusu ( <i>Semi Graded Quantum Well</i> )
<b>SPQW</b>	Yarı Parabolik Kuantum Kuyusu ( <i>Semi Parabolic Quantum Well</i> )
<b>IPQW</b>	Ters Yarı Parabolik Kuantum Kuyusu ( <i>Inverse Parabolic Quantum Well</i> )
<b>IVQW</b>	Ters Yarı V-Şekilli Kuantum Kuyusu ( <i>Inverse V-Shaped Quantum Well</i> )
<b>LED</b>	Işık Yayan Diyotlar ( <i>Light-Emitting Diodes</i> )



## 1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, büyüklüğü yaklaşık 100 nanometre (nm) altında olan yapılardan, günümüzde kullandığımız malzemelere ve sistemlere göre daha hızlı, daha güçlü, daha verimli, daha kullanışlı malzemeler ve sistemler tasarlama ve yaratma teknolojisi olarak tanımlanabilir. Nanoteknoloji sayesinde üretilen ürünler, kozmetik sanayisinden savunma sanayisine kadar her alanda yerlerini alıp, günlük yaşantımızda çok büyük değişikliklere yol açacaktır. Nanoteknolojinin gelişimi, başarısı ve geleceği şüphesiz ki nanoboyutlarda ortaya çıkan kimyasal, fiziksel ve biyolojik olayların doğru olarak anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi ile orantılıdır.

Yarıiletkenler, birçok elektronik devrenin ve çeşitli düzeneklerin temel yapı elemanlarının oluşturulmasında yaygın bir kullanım alanına sahip olup, yaşantımız içerisinde önemli bir yer tutarlar. Gelişen teknoloji ile birlikte farklı özellik ve işlevlerdeki devre elemanlarının çok daha küçük hacimler içerisinde yerleştirilebilmeleri, yarıiletkenlerin günümüzde temel tercih nedenlerinden birisi olmuştur. Elektronik ve iletişim teknolojisinin çok daha hızlı çalışan elektronik devre elemanlarına ihtiyaç duyabileceği düşünüldüğünde, yeni yarıiletken yapıların ortaya çıkması kaçınılmaz olacaktır. Elektronik devrelerin temel elemanları olan kristal diyot ve transistörler, akım yükseltme katsayılarının büyüklüğü, herhangi bir ısıtma gerilimine ihtiyaç duymamaları, çok küçük bir hacme buna karşılık son derece sağlam bir yapıya sahip olmaları gibi nedenlerle bugün elektron tüplerinin yerini almış durumdadırlar.

Yarıiletken üretim teknolojisindeki gelişmeler, nanometre ölçeklerinde yüksek kaliteli heteroyapıların üretilmesini mümkün kılmıştır. MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme) ve MBE (Moleküler Demet Epitaksi) gibi kristal büyütme teknikleri kullanılarak büyütülen yarıiletkenlerde, kuantum kuyusunun (QW) kuşatma potansiyel profili ayarlanarak, hem alt bant enerjisi hem de dalga fonksiyonu değiştirilebilir ve çeşitli fiziksel özellikler bu parametrelere göre elde edilebilir. Bu tür yapılar, yarıiletken cihazların çıkışı kontrol etmek ve modüle etmek için amaca uygun olarak istenen cihaz tasarımının optik ve elektronik özelliklerini sağlar. Yarıiletken heteroyapılar alanındaki çalışmalar temel fizikte yeni bir ufuk açmakta ve aynı zamanda optoelektronik cihazlar için çeşitli potansiyel uygulamalar sunmaktadır [1-2]. Farklı şekillerdeki [3-4], kare [5-8], parabolik [9-10], yarı parabolik [11-13],

eđik [14-15], V-Őekilli ve ters V-Őekilli [16], ters parabolik [17] kuantum kuyuları bu tekniklerle bűyűtűlebilir. Uygulama alanlarından bazıları, yarıiletken lazerler [18], kuantum kaskat lazerler (*quantum cascade lasers*) [19-20], tek elektronlu transistűrler [1], foto dedektűrler [2] ve yűksek hızlı elektro-optik modűlatűrlerdir [21].

Çoklu yarıiletken yapının tek bir kuantum kuyusuna gűre temel avantajı, eksiton (elektron-boŐluk çifti) elektro-optik tepkisinin geliŐtirilmesidir. Çoklu kuantum kuyularında eksitonların elektro-optik űzellikleri, yűksek hızlı uzamsal ıŐık modűlatűrleri ve anahtarlarında bir takım potansiyel uygulamalar vaat etmektedir. Çoklu yapılardaki elektronik űzelliklerin, bir dıŐ elektrik alanı kullanılarak kolayca deđiŐtirilebildiđi, bu deđiŐimin dalga fonksiyonlarının birleŐmesi ve ayrılmasını sađladığı bilinmektedir. Bu etkiler optik űzelliklerde űnemli bir deđiŐikliğe neden olmakta, dođrusal olmayan optik geçiŐlere imkân sađlamakta ve optik cihazların űretilmesine olanak tanımaktadır. Yarıiletken heteroyapılardaki ince bir engel tabakası sayesinde taŐıyıcı tűnelleme dinamikleri, son yıllarda hem fiziksel yapı hem de uygulamalar için uygun tasarımdan dolayı űnemli bir araŐtırma konusu olmuŐtur. Çift ve űçlű kuantum kuyularında dalga fonksiyonu ayarlaması, temel fiziđin aktif bir alanıdır [22-23] ve bazı iletiŐim ve optoelektronik cihazların geliŐtirilmesi bu tűr çalıŐmalara dayanmaktadır. Ŭrneđin, bazı yarıiletken gűrűnűr lazerler, çift ve űçlű kuantum kuyulu hetero-yapıların elektronik spektrum űzelliklerine dayanmaktadır [24-25]. Bu lazerler verimli, minyatűr, modűler ve ucuz oldukları için çok çeŐitli opto-elektronik iletiŐim cihazlarında kullanılmaktadır. DűŐűk boyutlu sistemlerin elektronik ve optik űzellikleri, bűyűk űlűde sınırlama potansiyelindeki bazı asimetriilerin varlığına bađlıdır. Potansiyel profilindeki bu tűr bir asimetri, yapıya bir elektrik alanı uygulayarak veya alaŐımlı yapıda alaŐım oranını ayarlayarak sađlanabilir. Dođrusal olmayan alt-bant geçiŐlerine dayanan yeni optik cihazlar űretmek amacıyla birçok asimetrik çoklu kuantum kuyu sistemleri araŐtırılmıŐtır. Bu yapılar sayesinde radar, opto-elektronik ve iletiŐim gibi birçok teknolojik uygulamalar geliŐtirilmiŐtir [26-29]. En gűze çarpan uygulamaları ise, bitiŐik kuantum kuyuları arasındaki rezonans tűnellemelere ve altbantlar arası optiksel geçiŐlere bađlı olan kuantum kuyu kızılűtesi radyasyon fotodetektűrleri [30] ve kuantum kaskat lazerleridir [31].

GaAs/AlGaAs bileŐikleri yűksek bađlanma gűcű, ısıl kararlılık ve kolay katkılanabilme gibi űzelliklere sahip olması nedeniyle kuantum kuyu yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GaAlAs/GaAs yapıları modern foto-elektronik ve

yüksek hızlı elektronik cihazlarda kullanıldığından, ilgili sistemlerde elektriksel ve optik özelliklerin basınç ve dış alan bağımlılığı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [32-39]. GaAs/AlGaAs çoklu kuantum kuyularda optik soğurma doygunluğu, hem elektro soğurma süreçleri hem de termal olarak indüklenen soğurma süreçleri, doğrusal olmayan optik geçişlerle ilişkili olarak araştırılmıştır [40-42].

GaAs/InGaAs temelli aygıtlar; foto-diyotları, metal-yarıiletken-metal fotodedektörleri, çoklu yapılı lazerleri, yüzeyden-ışımali dikey-kavite lazerleri (VCSEL), rezonant tünellemeli yapıları, kuantum kuyu, tel ve noktalarını, modülasyon katkılı alan etkili transistörleri (MODFET) ve heteroeklem bipolar transistörleri içermektedir [43]. InGaAs/GaAs kuantum kuyu yapıları, temel araştırma ve cihaz geliştirme ile ilgili çalışmalarda, kızılötesi lazerlerde, fotodedektörlerde ve entegre optoelektronik sistemlerde önemli uygulamalara sahiptir [44-45].

Günümüz yarıiletken teknolojisinde olduğu kadar geleceğin yarıiletken teknolojisinde de önemli bir yere sahip olacağı düşünülen GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapılarının nano boyutlardaki elektrik, manyetik, elektronik ve optik özelliklerinin sistematik bir biçimde incelenmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Çoklu kuantum kuyulu yapılarda, kuyu genişlikleri, engel kalınlıkları ve x-alaşım oranına bağlı olarak potansiyel yükseklikleri değiştirilerek kuantum kuyularının algılama bölgesi ayarlanabilir. Bu özellikleriyle adı geçen yapılar, kızılötesi algılayıcılar için verimli ve elverişli malzemelerdir.

Bir elektronun kararlı enerji durumu ve bu durumdaki elektronu tanımlayan dalga fonksiyonu, onun potansiyel enerjisini de içeren Schrödinger dalga denkleminin çözümüdür. Nano boyutlu kuantum kuyularında, bağlı durumlar ve kuşatma potansiyeli, sistemin ayarlanabilir fiziksel parametrelerine (kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel kalınlığı) bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışma kapsamında, hem simetrik- asimetrik çift kuantum kuyuları hem de asimetrik üçlü kuantum kuyuları için Schrödinger denkleminin çözümü yapılarak sistemin elektronik özellikleri (enerji özdeğer ve özfonksiyonları, olasılık yoğunlukları) yapı parametrelerine bağlı olarak araştırılmıştır. Literatürden farklı olarak, asimetrik çift ve üçlü kuantum kuyularını oluştururken, kuyu genişlikleri veya potansiyel yüksekliğinin asimetrisinden [23-25, 46-48] ziyade farklı potansiyel profiline sahip kuantum kuyuları tercih edilmiştir.

## 2. DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER

### 2.1 Giriş

Yarıiletken malzemenin elektronik ve optik özelliklerinin yarıiletkenin boyutlarına duyarlılık göstermesi, *düşük boyutlu yarıiletken yapılar* olarak adlandırılan bir araştırma alanının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Külçe (bulk) yarıiletkenlerin bilinen fiziksel özelliklerinin düşük boyutlu yarıiletken yapılarda değişim göstermesi, bu yapılara olan merakı artırmıştır ve yarıiletken cihazların bu yapılar sayesinde performanslarının artırılabilmesi ve geliştirilmesi gibi fikirler bu konuda çalışan araştırmacıların ilgi odağı olmuştur.

MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme) ve MBE (Moleküler Demet Epitaksi) gibi kristal büyütme tekniklerinden yararlanarak, farklı bant aralığına sahip yarıiletkenlerin bir alt tabaka üzerinde atomik mertebelerde epitaksiyel olarak (çok ince tabakalar halinde atomların üst üste düzenli olarak dizilmesiyle) büyütülmesiyle oluşturulan düşük boyutlu yapılar, nano yapılar olarak da adlandırılabilir. MOCVD ve MBE teknikleri modern yarıiletken aygıtların epitaksiyel büyütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle MOCVD tekniği, III-V yarıiletken bileşikleriyle yüksek kaliteli epitaksiyel tabakalar, keskin arayüzeyler ve birkaç atom kalınlığında çok tabakalı yapılar üretebilmedeki avantajları bakımından kendini kanıtlamış önemli bir epitaksiyel büyütme tekniğidir [49-50]. Çok yüksek vakum altında kontrollü bir şekilde yarıiletkenlerin buharlaştırılarak epitaksiyel olarak büyütüldüğü MBE yönteminde ise, büyütme esnasında yarıiletken kristal içerisinde oluşabilecek kirlilikler de en az seviyeye indirilebilmektedir. Dolayısıyla çok saf düşük boyutlu yarıiletken yapılar oluşturmak mümkün olmaktadır [51].

Fiziksel bir olayın anlaşılmasında üzerinde çalışılan sistemin boyutu önemli bir parametredir. Dışarıdan uygulanan bir etkiyle, bir sistemi daha düşük boyuta indirgeyerek, sistemin önemli bazı parametreleri (elektronik yapı, yük yoğunluğu, saçılmaya bağlı hareketlilik) ayarlanabilir duruma getirilebilir ve uygulama alanında amaca yönelik koşullar sağlanabilir. Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, yük taşıyıcılarının (elektronlar, boşluklar) hareketlerine getirilen sınırlamalar nedeniyle farklı isimlendirilirler. Yük taşıyıcılarının hareketini tek boyutta kısıtlayan yarıiletken yapılara *iki boyutlu yarıiletken yapılar* ya da *kuantum kuyuları* denir. Bu yapılarda

taşıyıcıların örneğin,  $z$ -doğrultusundaki hareketleri kısıtlanırken  $x$ - $y$ -düzlemindeki hareketlerinde herhangi bir kısıtlama yoktur. Yük taşıyıcılarının hareketini iki boyutta, örneğin, hem  $z$  hem de  $x$ -doğrultusunda kısıtlayan yarıiletken yapılara *bir boyutlu yarıiletken yapılar* ya da *kuantum telleri* denir. Bu kuantum telindeki yük taşıyıcıları sadece  $y$ -doğrultusunda rahatça hareket edebilir. Yük taşıyıcılarının hareketi, üç boyutta da kısıtlanırsa, bu tür yarıiletken yapılar *sıfır boyutlu* ya da *kuantum noktaları* olarak adlandırılır. Kuantum mekaniğinden bilindiği gibi, kuantum kuyusu içindeki bir parçacık (elektron, boşluk gibi) tek boyutlu potansiyel kuyusu içinde kuşatılan (hapsedilen) bir parçacık demektir. Dolayısıyla, bu parçacığın sahip olabileceği enerji seviyeleri hareketin sınırlandırıldığı  $z$ -doğrultusundaki kuantum kuyusunun genişliği ile doğrudan ilişkilidir. Kuantum kuyusundan kuantum noktasına yaklaşıldıkça yük taşıyıcıları için hareket serbestliği daha da azaldığından, enerji seviyeleri arasındaki farklar da artacaktır. Bir başka deyişle, durum yoğunluğu değişecektir. Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, elektronik ve opto-elektronik aygıtlardaki potansiyel uygulamaları ve benzersiz fiziksel özellikleri nedeni ile yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [52-58]. Sanki iki-boyuttaki hareketin söz konusu olduğu kuantum kuyu yapılarında, iki-boyuta sıkıştırılmış elektron gazı özelliği gözlenir. İki boyutlu elektron gazının en önemli özelliklerinden biri, aynı bant içinde kuantize altbantlar arasındaki optiksel geçişlerdir. Yarıiletken nano boyutlu kuantum kuyularının bantlar ve altbantlar arasındaki optiksel geçişleri, malzemenin elektronik seviyelerinin lokalizasyonu ile ilişkilidir. Opto-elektronik aygıt uygulamalarında kullanılan düşük boyutlu yarıiletken yapıların optiksel özellikleri, genellikle sistemin ayarlanabilir parametreleri (kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel genişliği vb.) ve dış kuvvetler (yüksek frekanslı lazer alanı, elektrik ve manyetik alan, hidrostatik basınç vb.) ile ayarlanabilmektedir [59-64]. Ayrıca bu sistemlerin optiksel özellikleri, uzak kızıl ötesi lazer yükselticiler, fotodetektörler ve yüksek hızlı elektro-optik modülatörler gibi yarıiletken aygıt uygulamaları için önemlidir [65-69].

Düşük boyutlu yapılardaki saçılma olaylarının düşük sıcaklıklarda azalması sonucunda, elektronların hareketliliklerinde artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla külçe yapılardan farklı olarak, düşük boyutlu yapılarda gözlenen yüksek hareketlilikten yararlanılarak daha hızlı çalışabilen elektronik düzenekler yapmak mümkündür. Bu sistemlerde gözlenen fiziksel olayların açıklanabilmesi için yapılan çalışmalar günümüzde de yoğun olarak devam etmektedir.

## 2.2 Yarıiletkenler

Katı malzemeler elektriksel iletkenlerine göre iletken, yalıtkan ve yarıiletkenler olmak üzere üç kategoride incelenirler. Yarıiletkenler, iletkenlik bakımından iletkenler ve yalıtkanlar arasında kalırlar, normal durumda yalıtkan gibi davranırlar. İletkenlerin tersine yarıiletkenlerde, sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel özdirenç azalmaktadır. Bu durum, yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran en belirgin özelliktir. Yarıiletkenler elektrik alan, manyetik alan, ısı, ışık gibi etki altında bırakıldıklarında bir miktar valans elektronu serbest hale gelip iletim bandına geçer ve bu malzemeler iletkenlik özelliği kazanırlar. Bu geçici bir durum olup üzerlerindeki etki kalktığında tekrardan eski hallerine dönerler. Diğer önemli özellikleri ise, katkılama (doping) yoluyla iletkenliklerinin artmasıdır. İletkenliklerinin kontrol edilebilir olması nedeniyle yarıiletkenler, günümüzde birçok elektronik devrenin ve çeşitli düzeneklerin temel yapıtaşlarını oluşturmaktadır.

Mutlak sıfır sıcaklığında (0K) saf yarıiletkenlerin valans bandı tamamen elektronlarla dolu ve bunu takip eden iletkenlik bandı ise boştur. Bu iki bant arasında kalan enerji aralığı, yasak bant aralığı ( $E_g$ )'dır. Bu aralık yarıiletkenlerde 3 eV veya daha küçüktür. Yalıtkanlarda ise, yaklaşık olarak 10 eV civarındadır. Yarıiletkenlerin en belirgin özelliği, mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkan özellik göstermesidir. Bu maddeler düşük sıcaklıkta iletme hiçbir katkıda bulunmazken, sıcaklığın artırılmasıyla özdirençleri azalarak iletme katkıda bulunurlar. Saf bir yarıiletkende elektriksel bir iletimin gerçekleştirilmesi, elektronların valans bandından sıcaklığın etkisiyle iletkenlik bandına geçmesi ile mümkün olur. Bu durum yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa sıkı sıkıya bağlı olduğunu gösterir. Yarıiletkenlerde elektronların valans bandından yasak bant aralığı miktarında enerji kazanarak iletim bandına geçmesi sonucunda, valans bandında elektronların bıraktıkları yerlere boşluk adı verilir. Boşluklar pozitif yüklü tanecikler gibi davranırlar ve elektrik alanı altında elektronlarla zıt yönde hareket edip, aynı yönde akım yoğunluğu oluştururlar. Böylece yarıiletkenlerde iki tür taşıyıcı varlığından bahsedilir. İdeal bir yarıiletken kristalde, örgü kusurları ve yabancı atomların oluşturdukları safsızlıklar yoktur ve bu yarıiletkenler katkısız veya saf yarıiletkenler olarak bilinirler. Böylece saf bir yarıiletkendeki elektron yoğunluğu  $n$ , boşluk yoğunluğu  $p$  ise,  $n = p = n_i$  olacaktır. Burada  $n_i$ , yarıiletkendeki saf taşıyıcı yoğunluğudur.

Birbirinden farklı iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya yarıiletken literatüründe heteroyapı adı verilir. Heteroyapıyı oluşturan külçelerin benzer yapıda (atomik uzaklıkları birbirine yakın) olmaları, uygulamada önemli sonuçların alınmasını sağlar. Aynı zamanda bu koşul ile, elektron dalga vektörünün arayüzeyde değişmemesi de sağlanmış olur. Heteroyapıyı oluşturan bir yarıiletkenin kristal potansiyeli ile elektronik yapısının, arayüzey düzlemine kadar değişmediği kabul edilir. Ara yüzeyde elektronik yapı ve kristal potansiyel, aniden diğer külçenin özelliklerini sergileyecek biçimde değişir. Zaten teknolojik uygulamada önemli olan yarıiletkenlerin çoğu, aynı simetri grubuna sahip olduklarından, heteroyapı için kabul edilen koşullar sağlanmış olur. Genel olarak yarıiletkenlerin örgü sabiti, heteroyapı için uygunluk sabiti olarak değerlendirilir. Yarıiletken mikroyapı uygulamalarının çoğunda basit heteroyapılar esas alınır ve bu uygulamalarda GaAs, GaAlAs ve InGaAs materyalleri sıkça kullanılır.

Yarıiletkenleri üç ana başlık altında gruplandırabiliriz:

(a) Elementsel Yarıiletkenler: Ge ve Si gibi aynı atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır ve doğada saf halde bulunmaktadır.

(b) Bileşik Yarıiletkenler: Doğada bulunmayan ancak yapay büyütme teknikleri ile elde edilebilen GaAs, AlAs, InAs, InP ve GaN gibi iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmanın bir birleşimidir. GaAs hem direkt bant aralığına sahiptir hem de optik ve elektriksel özellikleri iyi anlaşıldığından optoelektronik uygulamalarda yaygın kullanılır.

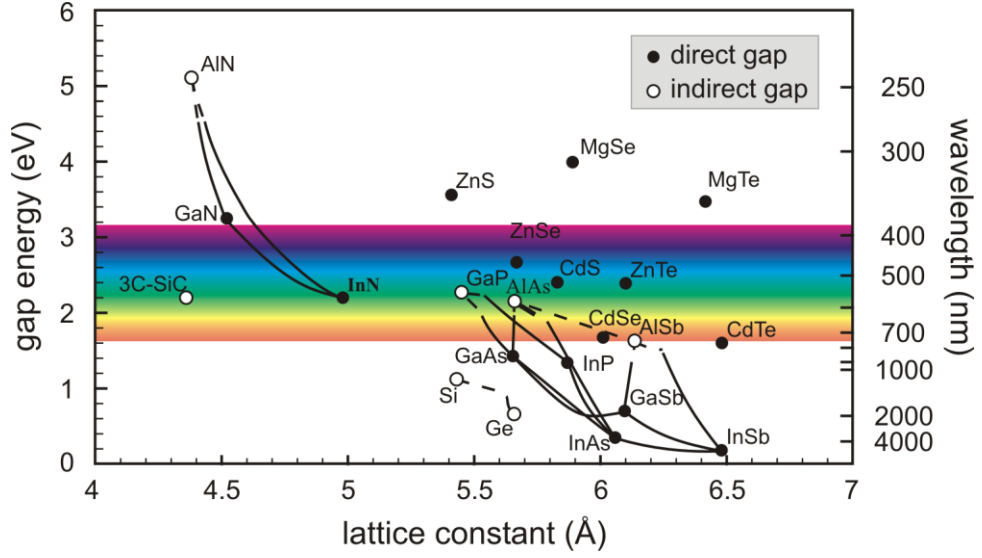
(c) Alaşım Yarıiletkenler: Bileşiğe üçüncü bir elementin katılmasıyla meydana gelen yarıiletkenlerdir. Örneğin,  $Al_xGa_{1-x}As$ ,  $In_xGa_{1-x}As$ ,  $In_xGa_{1-x}N$ . Burada  $x$ , ilgili elementin alaşımdaki alaşım oranını temsil eder. Bununla birlikte  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  ve  $Ga_xAl_{1-x}As_yP_{1-y}$  gibi dördü alaşım yarıiletkenleri elde etmek de mümkündür. Burada  $x$  ve  $y$ , alaşımı meydana getiren elementlerin alaşım oranlarını gösterir [70]. Elde edilecek alaşımın örgü sabiti, ana malzemelerin örgü sabitlerinin birbirlerine doğrusal olarak eklenmesiyle (Vegard Yasası) bulunur. Örneğin,  $Al_xGa_{1-x}As$  alaşımının  $a_{AlGaAs}$  örgü sabiti, verilen bir  $x$  alaşım oranı için  $a_{AlGaAs} = x a_{AlAs} + (1 - x) a_{GaAs}$  örgü sabitlerinden bulunur. Hem Ga atomu hem de Al atomu üçüncü grup olduğundan, bunlar birbirleri ile yer değiştirir. Bazı önemli yarıiletkenlerin örgü sabitleri, etkin

kütlesi (serbest elektron kütlesi  $m_0$  ile bölünerek) ve yasak enerji aralıkları Çizelge 2.1’ de verilmiştir [71]. III-V bileşikli önemli yarıiletken malzemelerinin örgü sabitine karşılık gelen yasak enerji aralığı ve dalga boyu değerleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir [72]. Şekilden de görüldüğü gibi,  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$  yapısının yasak bant genişliği,  $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$  yapısına kıyasla daha büyüktür.

Örgü sabitleri birbirine yakın yarıiletkenlerin oluşturdukları heteroyapıda, eğer bu yarıiletkenin temel bant aralığı direkt ise, büyük yasak enerji bant aralıklı iki malzeme arasına daha düşük bant aralıklı yarıiletken malzeme yerleştirildiğinde kuantum kuyusu oluşturulur. Dar bant aralıklı yarıiletken tabaka kuyu, geniş bant aralıklı yarıiletken tabaka ise engel adını alır. Kuantum kuyusunu oluşturan yarıiletkenlerin bant yapıları, bant sınırlarında benzer olduklarından dolayı, engelde ve kuyuda etkin kütle farkı önemsenmeyebilir. Bir boyutlu potansiyel içinde kuşatılan parçacık,  $z$ -yönündeki kuşatma doğrultusuna dik olan  $(x-y)$  düzleminde serbest parçacık karakterinde olup, sanki iki boyutlu davranış gösterir. Yani, elektronların hareketi  $z$ -yönünde kuantumlanmıştır ve enerji seviyeleri büyüme doğrultusunda kesiklidir.

Tekli kuantum kuyulu yapılar bir araya gelerek çoklu kuantum kuyulu yapıları oluşturur. Kuantum kuyulu yapılarda engeli oluşturan yarıiletken tabakalar yeterince geniş ise, kuantum kuyusunda bulunan taşıyıcıların dalga fonksiyonları, engelin içinde fazla ilerleyemeden sönüme uğrarlar. Yani, her kuyu sanki birbirinden yalıtılmış bağımsız kuantum kuyusu gibi davranır. İnce engel tabakası, taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının ardışık kuyularda örtüşmesine olanak tanır, yani taşıyıcılar bir kuyudan diğer kuyuya tünelleme yapabilirler.





**Şekil 2.1** III-V bileşikli önemli yarıiletken malzemelerinin örgü sabitine karşılık gelen yasak enerji aralığı ve dalga boyu

**Çizelge 2.1** Bazı önemli yarıiletkenlerin özellikleri (D-Direkt, I-İndirekt geçiş)

Yarıiletken	Örgü sabiti (Å) (300K için)	Etkin kütle ( $/m_0$ )	Yasak enerji aralığı (eV)	
			0K	300K
AlAs	5.6605	0.1	2.23	2.15 (I)
AlP	5.4635	-	2.50	2.45 (I)
AlSb	6.1355	0.12	1.69	1.61 (I)
GaAs	5.6533	0.067	1.52	1.42 (D)
GaP	5.4512	0.093	2.34	2.26 (I)
GaSb	6.09	0.042	0.81	0.75 (D)
InAs	6.0584	0.024	0.42	0.36 (D)
InP	5.8686	0.077	1.42	1.35 (D)
InSb	6.47	0.013	0.24	0.17 (D)

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1 Hesaplama Yöntemi

Heteroyapıyı oluşturan bir yarıiletkenin kristal potansiyeli ile elektronik yapısının, ara yüzey düzlemine kadar değişmediği kabul edilir. Ara yüzeyde elektronik yapı ve kristal potansiyeli, aniden diğer külçenin özelliklerini sergileyecek şekilde değişir. Teknolojik uygulamada önemli olan yarıiletkenlerin çoğu, aynı simetri grubuna sahip olduklarından heteroyapı için kabul edilen koşullar sağlanmış olur. Genel olarak külçelerin örgü sabiti, heteroyapı için uygunluk sabiti olarak değerlendirilir. Benzer örgüye sahip materyaller arasında yapılan ekleme ile yapının iletim ve valans bantlarında süreksizlikler meydana gelir. Bu süreksizlikler tekrarlanarak kuantum kuyularını oluştururlar ve böylece yük taşıyıcılarının büyüme doğrultusundaki hareketlerini sınırlayarak kuşatmaya neden olurlar. Bu yapı içinde artık kuantum etkileri söz konusu olur ve enerji durumları kesikli bir spektrum oluşturur.

Farklı potansiyel profillerine sahip kuantum kuyularının dalga fonksiyonlarının ve enerji özdeğerlerinin bulunabilmesi için Schrödinger dalga denkleminin belirlenen sınır koşullarında çözülmesi gerekir. Schrödinger dalga denkleminin en genel hali

$$H \Psi (x, y, z, t) = E \Psi (x, y, z, t) \quad [3.1]$$

şeklindedir. Bu ifadedeki H, Hamiltonien operatörü olup kuantum mekaniğinde sıkça kullanılan bir işlemcidir.

Sonsuz yükseklikteki duvarlarla sınırlandırılan bir kuyuda duvarlar, yük taşıyıcılarının  $\pm\infty$ 'a kaçmasını önler ve lokalizasyonu korur. z –doğrultusundaki bir sistemin Hamiltonien operatörü, etkin kütle yaklaşımı çerçevesinde

$$H = \frac{p^2}{2m^*} + V(z) \quad [3.2]$$

eşitliği ile verilir. Burada P ve z, parçacığın momentum ve konumu,  $m^*$  malzeme bileşenine bağlı olarak elektronun etkin kütlesi (etkin kütleinin kuantum kuyuları ve engel bölgelerinde aynı olduğu kabul edilmiştir), V(z) ise sistemin potansiyel enerji terimidir. Bir boyutlu Schrödinger dalga denklemi

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V(z) \right) \bar{\Psi}_n(z) = E_n \bar{\Psi}_n(z) \quad [3.3]$$

şeklindedir. Burada  $\hbar$  Planck sabiti olmak üzere,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  dir.

Schrödinger dalga denkleminin en genel çözümü, sistemin enerji özdeğerlerini ( $E_n$ ) ve özfonksiyonları olan  $\bar{\Psi}_n(z)$  dalga fonksiyonunu verir. Sonsuz yükseklikteki duvarlarla sınırlandırılan ve genişliği  $L_b$  olan bir potansiyel kuyusundaki elektronun dalga fonksiyonu

$$\bar{\Psi}_n(z) = \sqrt{\frac{2}{L_b}} \cos \left[ \frac{n\pi z}{L_b} - \delta_n \right] \quad [3.4]$$

eşitliğiyle verilir. Bu eşitlikte, kuyunun özfonksiyonlarındaki tek veya çift özdeğerlere karşılık gelen faz farkı

$$\delta_n = \begin{cases} 0 & n \text{ tek ise} \\ \frac{\pi}{2} & n \text{ çift ise} \end{cases} \quad [3.5]$$

değerlerine sahiptir. Sistemin dalga fonksiyonları için sonsuz kare kuyunun ortonormal fonksiyonlarını baz alarak,

$$\Psi_i(z) = \sum_{n=1}^{N_0} c_{i n} \bar{\Psi}_n(z) \quad [3.6]$$

denklemini kullanılmıştır. Eğer sistemin özfonksiyonları bilinmiyorsa, bu özfonksiyonlar kendine yakın bir sistemin ortonormal dalga fonksiyonları ( $\langle \bar{\Psi}_n(z) | \bar{\Psi}_m(z) \rangle = \delta_{n,m}$ ) cinsinden tanımlanabilir.  $\{\bar{\Psi}_n\}$  fonksiyonları bilinen sistemin baz vektörleri,  $\{c_{i n}\}$  açılım katsayısı ve  $N_0$  sistem boyutudur. Tüm hesaplamalarda  $N_0 = 20$  olarak alınmıştır.

Sonsuz yükseklikteki potansiyel kuyusuna sahip sistemdeki elektronun özenerji spektrumu

$$E_j = \frac{j^2 \pi^2 \hbar^2}{2m^* L_b^2} \quad [3.7]$$

biçimindedir ve  $j = 1$  için taban durumu enerjisi,  $E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* L_b^2}$  olarak elde edilir. Bu denklemlerde yer alan  $L_b$  uzunluk boyutunda (nm biriminde) dır ve kuyu genişliklerinden oldukça büyüktür.  $E_1$  ise enerji boyutunda (meV biriminde) dır. Uzunluk ve enerji mertebesinde olan fiziksel nicelikler sırasıyla  $L_b$  ve  $E_1$ 'a bölünerek boyutsuz hale getirilebilir.

Kuantum kuyularına sahip sistemin elektronik özelliklerini hesaplama işlemlerinde, Hamiltonien operatörü ve beklenen değer ifadesi kullanılabilir. Bu durumda Hamiltonien operatörünün beklenen değeri

$$\langle \bar{\Psi}_n | H | \bar{\Psi}_m \rangle = \int \bar{\Psi}_m H \bar{\Psi}_n dz \quad [3.8]$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu çalışmada Denklem [3.3] ile verilen Schrödinger dalga denklemini çözmek için kullanılan yöntem,  $V(z)$  kuşatma potansiyeline sahip sistemde  $E_n$  enerji özdeğerlerine ( $n=1$  için taban durum enerji seviyesi ve uyarılmış durumlar olan  $n=2, 3, 4, \dots$  durumları için ise, sırasıyla ikinci, üçüncü, dördüncü, ... durumlardaki enerji seviyeleri ifadeleri kullanılmıştır.) karşılık gelen ve  $\bar{\Psi}_n$  baz fonksiyonunun bir tam set açılımıyla genişletilen, kuyu bölgelerinde lokalize olan özfonksiyonlardan oluşan köşegenleştirme yöntemidir. Bu yöntemde tek, çift ve üçlü kuyulardaki enerji seviyeleri 0.001 meV duyarlılıkla doğru bir şekilde kontrol edilebilir. Ayrıca, köşegenleştirme yöntemi değişken potansiyel profili ve etkin kütle durumlarına kolayca uygulanarak sistemin enerji özdeğerlerini ve özfonksiyonlarını vermektedir. Bu teknik, kuyuların dışındaki öz durumları ve sanki-bağlı durum yaklaşımının geçerliliğini de belirler.

Kuantum kuyusunun potansiyel profili elektronların kuşatılması için oldukça önemlidir. Bu nedenle, farklı kuşatılmış kuantum kuyularında elektronun bulunma olasılığı (veya olasılık yoğunluğu)

$$P_i^W = \int |\Psi_i^W(z)|^2 dz \quad (i = 1, 2, 3, \dots; \quad W = L, M, R) \quad [3.9]$$

eşitliğiyle verilir. Burada L, M ve R sırasıyla sol, orta ve sağ kuantum kuyusunu ifade eder.

Bu çalışmada,  $V(z)$  kuşatma potansiyel ifadeleri Denklem [3.3]'de kullanılıp, simetrik-asimetrik çift ve asimetrik üçlü kuantum kuyularının elektronik özellikleri, yapı parametrelerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bilinen simetrik çift kare kuantum kuyusunun (Şekil 3.1) potansiyel profili aşağıdaki gibidir.

$$V(z) = V_0 \begin{cases} 0 & -\left(L_L + \frac{b}{2}\right) \leq z \leq -\left(\frac{b}{2}\right) \\ 0 & \left(\frac{b}{2}\right) \leq z \leq \left(\frac{b}{2} + L_R\right) \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [3.10]$$

Kuşatma potansiyellerini seçerken, literatürden farklı profiller tercih edilmiştir.

### 3.2 GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs Yapılarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada, GaAs yarıiletkeni üzerinde büyütülen  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  yapılardan oluşan iki sistemin elektronik özellikleri incelenmiştir.  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$  [73-75] ve  $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$  [73-74,76] yapıları için hesaplamalarda kullanılan alaşım oranının fonksiyonu olarak potansiyel yüksekliği, yasak enerji aralığı ve etkin kütle denklemleri Çizelge 3.1 de belirtilmiştir. Bu yapıların arasındaki temel farklılık, yasak enerji bant aralığı ve elektronun etkin kütesidir.  $Ga_{0.88}Al_{0.12}As/GaAs$  ve  $Ga_{0.88}In_{0.12}As/GaAs$  sistemlerinde sabit yapı parametreleri için simetrik çift kare kuantum kuyusunun elektronik özellikleri Çizelge 3.2 ile verilmiştir.  $Ga_{0.88}Al_{0.12}As/GaAs$  yapısına kıyasla,  $Ga_{0.88}In_{0.12}As/GaAs$  yapısının yasak enerji bant genişliği daha küçük olduğu için iletkenlik bandındaki süreksizlik (potansiyel yüksekliği) daha büyüktür. Kuşatılmış potansiyelin yüksek olması ve aynı zamanda elektronun etkin kütesinin küçük olması nedeniyle enerji seviyeleri daha yüksektir. Buna bağlı olarak kuyular içerisinde elektronların bulunma olasılığı da biraz daha azdır.

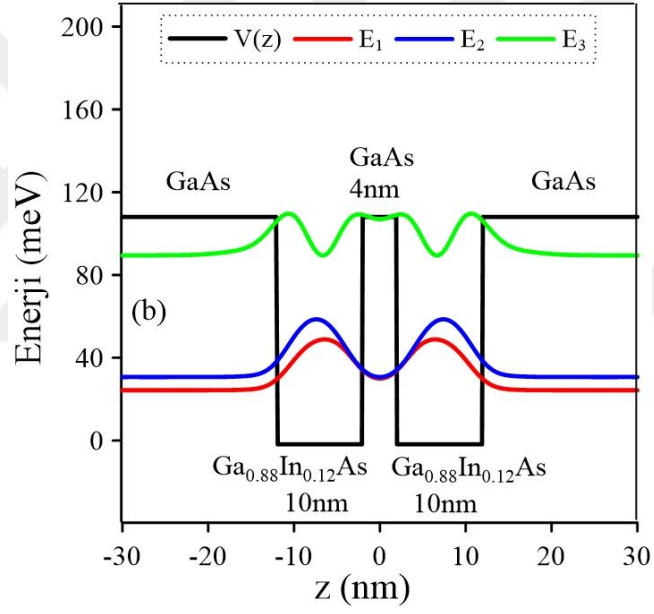
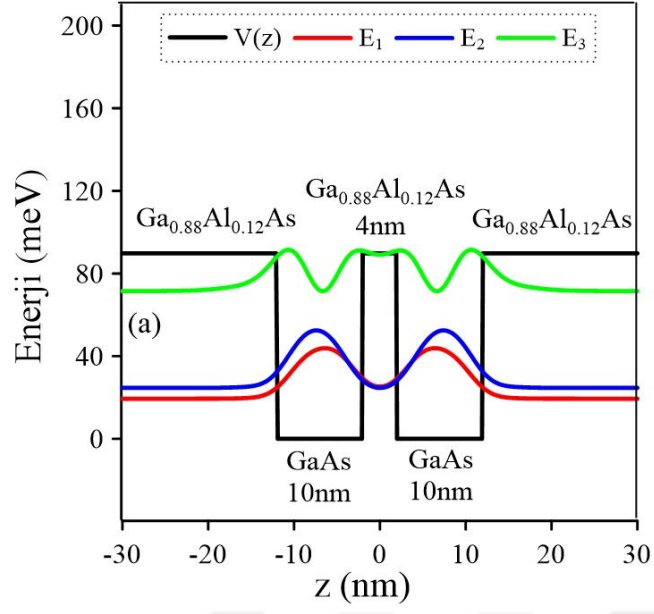
Hem  $Ga_{0.88}Al_{0.12}As/GaAs$  hem de  $Ga_{0.88}In_{0.12}As/GaAs$  yapısı için Çizelge 3.2’de kullanılan yapı parametrelerinin sonucunda elde edilen simetrik çift kare kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve üç bağlı durum enerji seviyesindeki elektronların olasılık yoğunluğu Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. GaAlAs/GaAs yapısında kuyu GaAs ve engel GaAlAs, GaAlAs/GaAs yapısında ise kuyu GaInAs ve engel GaAs’dır. GaAlAs/GaAs için potansiyel yüksekliği daha az olup, buna bağlı olarak yapının enerji seviyeleri daha düşüktür.

**Çizelge 3.1**  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$  ve  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$  yapıları için alaşım oranına bağlı olarak potansiyel yüksekliği, yasak enerji aralığı ve etkin kütle denklemleri

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{GaAs}$
$V_0^{\text{GaAlAs}} = \%60(E_g^{\text{GaAlAs}} - E_g^{\text{GaAs}})$	$V_0^{\text{GaInAs}} = \%60(E_g^{\text{GaAs}} - E_g^{\text{GaInAs}})$
$E_g^{\text{GaAlAs}} = (E_g^{\text{GaAs}} + 1247 x) \text{ meV}$	$E_g^{\text{GaInAs}} = (E_g^{\text{GaAs}} - 1619 x + 555 x^2) \text{ meV}$
$E_g^{\text{GaAs}} = 1424 \text{ meV}$	$E_g^{\text{GaAs}} = 1424 \text{ meV}$
$m_{\text{GaAlAs}}^* = (0.067 + 0.083 x)m_0$	$m_{\text{GaInAs}}^* = (0.067 - 0.04 x)m_0$

**Çizelge 3.2**  $\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$  ve  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$  sistemlerinde sabit yapı parametreleri için simetrik çift kare kuantum kuyusunun elektronik özellikleri

$x = 0.12, L_b = 60 \text{ nm}, L_L = L = L_R = 10 \text{ nm}, b = 4 \text{ nm}, T = 300\text{K}$	
$\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$	$\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$
$E_g^{\text{GaAlAs}} = 1573.6 \text{ meV}$	$E_g^{\text{GaInAs}} = 1237.7 \text{ meV}$
$m_{\text{GaAlAs}}^* = 0.0767 m_0$	$m_{\text{GaInAs}}^* = 0.0622 m_0$
$V_0^{\text{GaAlAs}} = 89.78 \text{ meV}$	$V_0^{\text{GaInAs}} = 111.77 \text{ meV}$
$E_1 = 19.41 \text{ meV}$	$E_1 = 24.09 \text{ meV}$
$E_2 = 24.66 \text{ meV}$	$E_2 = 30.56 \text{ meV}$
$E_3 = 71.46 \text{ meV}$	$E_3 = 88.69 \text{ meV}$
$P_1^L = P_1^R = 0.4473$	$P_1^L = P_1^R = 0.4466$
$P_2^L = P_2^R = 0.4681$	$P_2^L = P_2^R = 0.4676$
$P_3^L = P_3^R = 0.3026$	$P_3^L = P_3^R = 0.3002$



**Şekil 3.1** a)  $\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$ , b)  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{As}/\text{GaAs}$  yapıları için simetrik çift kare kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve üç bağlı durum enerjisi seviyesindeki elektronun olasılık yoğunluğu

## 4. ÇİFT KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

### 4.1 Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Alaşım Oranının Etkisi

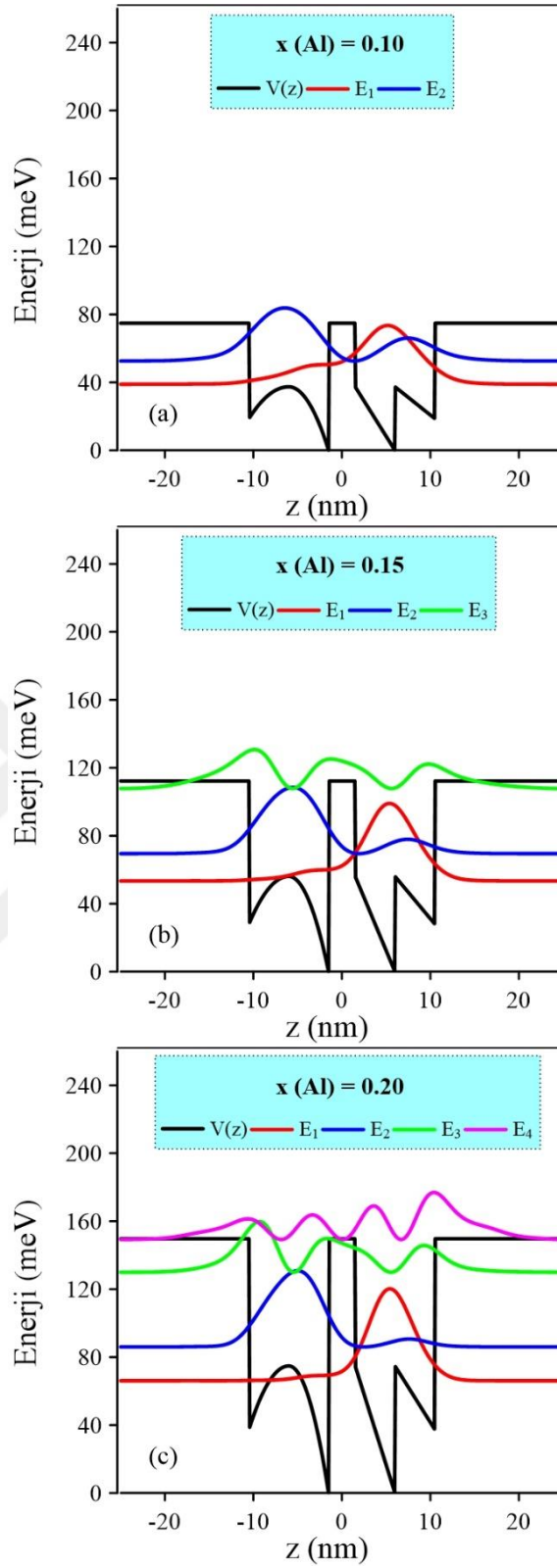
Asimetrik ters yarı parabolik kuantum kuyusu (sol kuyu) ve asimetrik ters çift yarı V-şekilli kuantum kuyusu (sağ kuyu) bir araya getirilerek oluşturulan asimetrik çift kuantum kuyuları için,  $L_b = 50$  nm, kuyu genişlikleri  $L_L = L_R = 9$  nm ve engel genişliği  $b = 3$  nm olmak üzere, yapının potansiyel profil ifadesi

$$V(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{1}{L_L^2} \left( z + \frac{b+L_L}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} & - \left( L_L + \frac{b}{2} \right) \leq z \leq - \left( \frac{L_L+b}{2} \right) \\ -\frac{2}{L_L^2} \left( z + \frac{b+L_L}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} & - \left( \frac{L_L+b}{2} \right) \leq z \leq - \left( \frac{b}{2} \right) \\ -\frac{1}{L_R} \left( z - \frac{b}{2} \right) + \frac{1}{2} & \left( \frac{b}{2} \right) \leq z \leq \left( \frac{L_R+b}{2} \right) \\ -\frac{1}{2L_R} \left( z - \frac{b}{2} \right) + \frac{3}{4} & \left( \frac{L_R+b}{2} \right) \leq z \leq \left( \frac{b}{2} + L_R \right) \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.1]$$

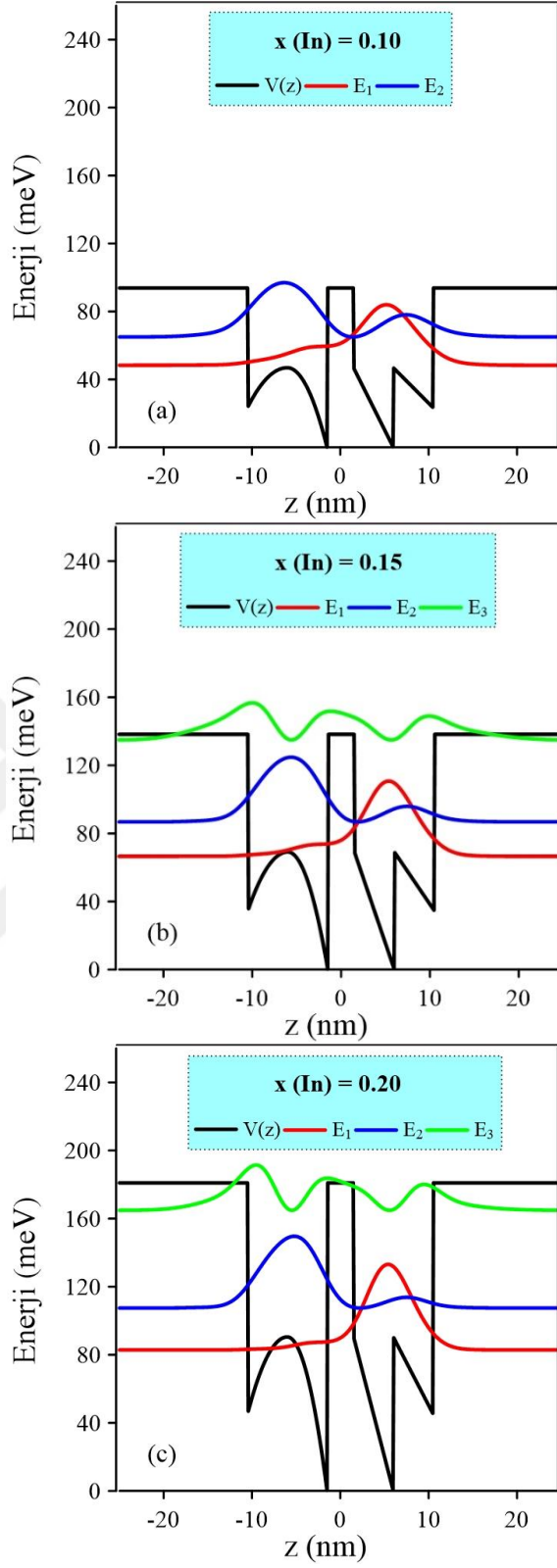
ile verilmektedir.

GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için üç farklı alaşım oranında asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun bulunma olasılıkları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi,  $x = 0.10$ ,  $x = 0.15$  ve  $x = 0.20$  değerleri için GaAlAs/GaAs yapısında sırasıyla iki, üç ve dört bağlı durum varken, aynı orana sahip GaInAs/GaAs yapısında ise, sırasıyla iki, üç ve üç bağlı enerji seviyesi ortaya çıkmaktadır. Taban durumdaki elektronun çoğunlukla sağ kuantum kuyusuna yerleştiği ve ikinci enerji seviyesindeki elektronun ise sol kuantum kuyusunda kuşatıldığı görülmektedir. Alaşım oranına bağlı olarak potansiyel profilinin yüksekliği değiştikçe, hem bağlı durum enerji seviyeleri hem de bu enerji seviyelerindeki elektronların olasılık yoğunlukları değişmektedir. GaAlAs/GaAs yapısının alaşım oranına duyarlılığının GaInAs/GaAs yapısından daha fazla olduğu görülmektedir.





**Şekil 4.1** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $x = 0.10$ , b)  $x = 0.15$ , c)  $x = 0.20$  değerlerinde asimetrik çift kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları

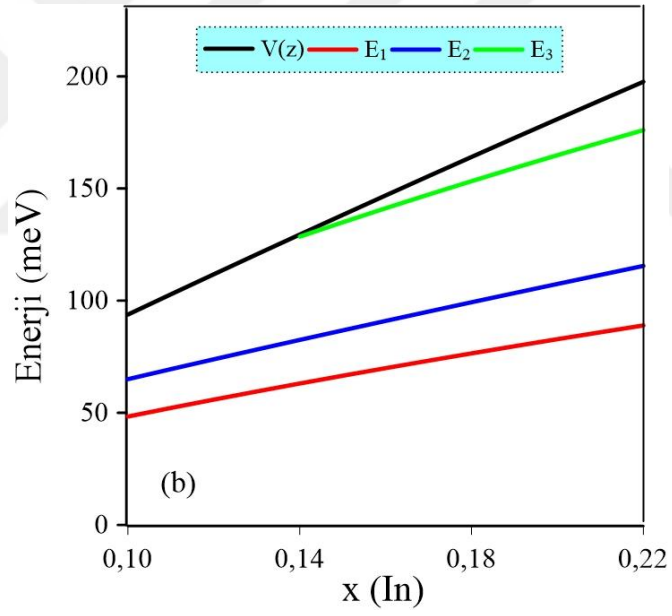
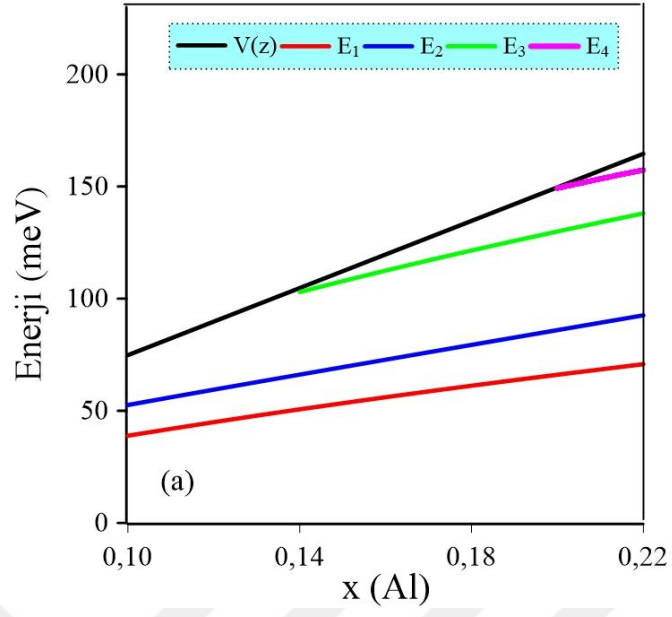


**Şekil 4.2** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $x = 0.10$ , b)  $x = 0.15$ , c)  $x = 0.20$  değerlerinde asimetrik çift kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları

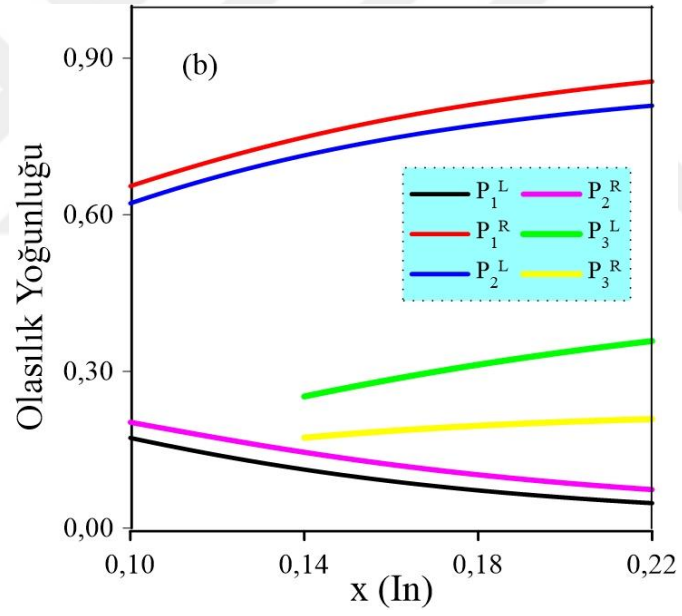
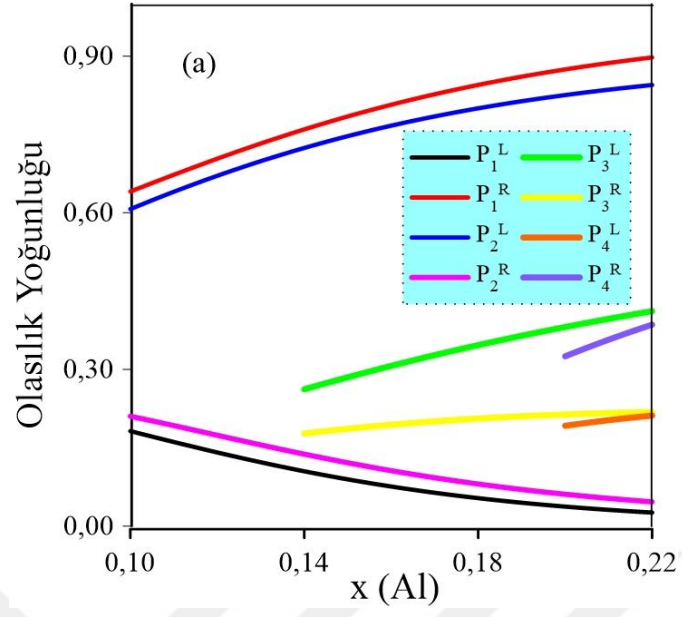
Şekil 4.3’de GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için  $x = (0.10 - 0.22)$  arasındaki alaşım oranının değişimine karşılık ortaya çıkan bağlı durum enerji seviyeleri verilmektedir. Beklendiği gibi, alaşım oranı arttıkça kuşatılmış potansiyel yüksekliği ve buna bağlı olarak da enerji seviyelerinin değerleri artmakta ve kuyular içerisinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi yer almaktadır. Üçüncü bağlı durum enerjisi hem GaAlAs/GaAs yapısında hem de GaInAs/GaAs yapısında  $x \geq 0.14$  değerinde görülmektedir. GaAlAs/GaAs yapısında dördüncü enerji seviyesi  $x \geq 0.20$  değerinde kuşatılmış potansiyel içerisinde bulunurken, bu enerji seviyesi  $x = (0.10 - 0.22)$  aralığında GaInAs/GaAs yapısında ortaya çıkmamıştır. Aradaki farklar, GaInAs/GaAs yapısında elektronun etkin kütlesi daha küçük olduğundan, enerji seviyelerinin daha yüksek değerlere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden amaca uygun olarak, örneğin  $x = 0.20$  değerinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi elde etmek istenirse, GaAlAs/GaAs yapısı tercih edilir.

GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları Şekil 4.4’de yer almaktadır. Her iki yapıda da  $x = 0.10$  olan ilk değer için, taban durum ve ikinci durum enerji seviyeleri sırasıyla sağ ve sol kuyularda yer almakta ve alaşım oranı artarken aynı kuyularda bulunma olasılık yoğunlukları büyümektedir.  $x = 0.14$  değerinde ortaya çıkan üçüncü enerji seviyesi, alaşım oranı değerinin artmasına bağlı olarak çoğunlukla sol kuyuda bulunmaktadır.

Bu çalışma, “Depending on Al and In concentration of the electronic properties of asymmetric double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlığıyla 02/05/2018-06/05/2018 tarihleri arasında 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS-2018) Kiev, UKRAYNA’da poster olarak sunulmuş olup, ilgili konferansın bildiri kitabında tam metin olarak basım aşamasındadır.



**Şekil 4.3** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranına karşılık çift kuantum kuyularında potansiyel yüksekliğinin ve bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi



**Şekil 4.4** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak çift kuantum kuyularında elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları

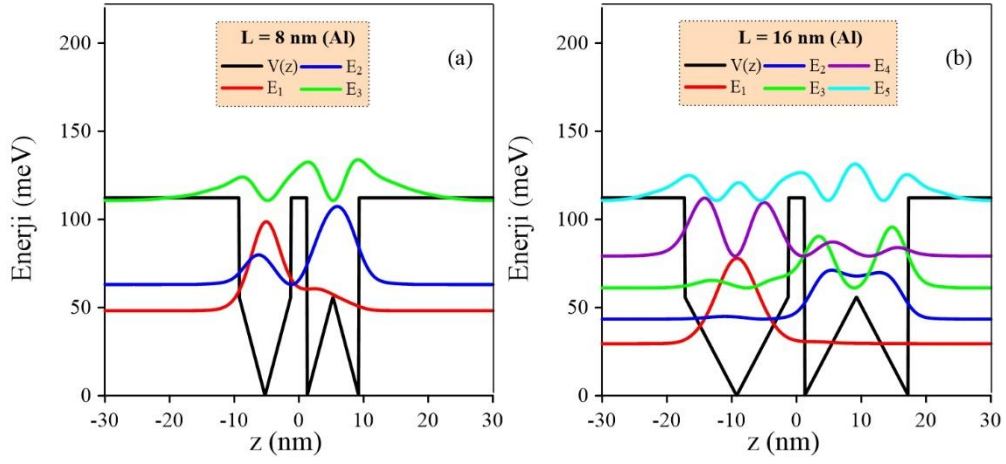
## 4.2 Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Kuyu Genişliğinin Etkisi

Yarı V-şekilli kuantum kuyusu (sol kuyu) ve ters yarı V-şekilli kuantum kuyusu (sağ kuyu) ile oluşturulan asimetrik çift kuantum kuyuları için,  $L_b = 60$  nm, alaşım oranı  $x = 0.15$ , engel genişliği  $b = 2.5$  nm ve  $L = L_L = L_R$  olmak üzere, yapının potansiyel ifadesi

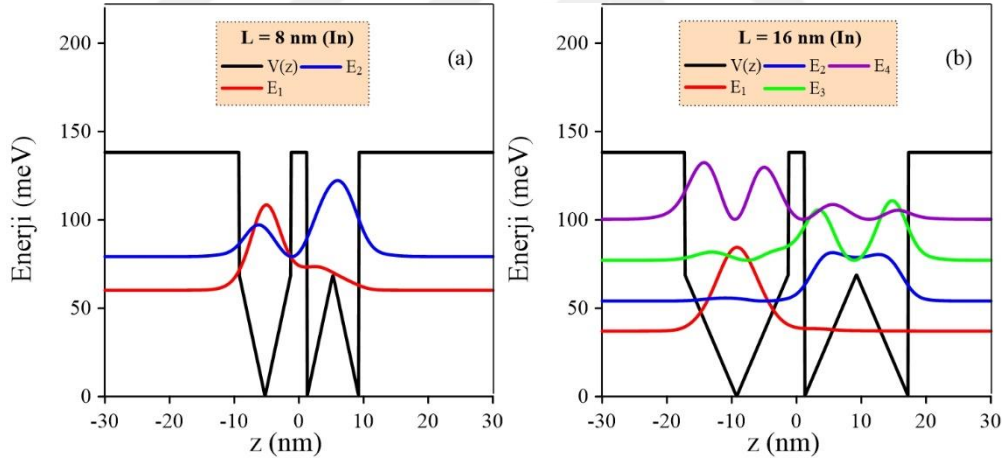
$$V(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{1}{L_L} \left( z + \frac{b+L_L}{2} \right) & - \left( L_L + \frac{b}{2} \right) \leq z \leq - \left( \frac{L_L+b}{2} \right) \\ \frac{1}{L_L} \left( z + L_L + \frac{b}{2} \right) - \frac{1}{2} & - \left( \frac{L_L+b}{2} \right) \leq z \leq - \left( \frac{b}{2} \right) \\ \frac{1}{L_R} \left( z - \frac{(b+L_R)}{2} \right) + \frac{1}{2} & \left( \frac{b}{2} \right) \leq z \leq \left( \frac{L_R+b}{2} \right) \\ -\frac{1}{L_R} \left( z - \left( \frac{b}{2} + L_R \right) \right) & \left( \frac{L_R+b}{2} \right) \leq z \leq \left( \frac{b}{2} + L_R \right) \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.2]$$

biçimindedir. Burada potansiyel yüksekliği, GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapıları için sırasıyla  $V_0 = 112$  meV ve  $V_0 = 138$  meV'dir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de sırasıyla GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için iki farklı kuyu genişliğinde asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun bulunma olasılıkları verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi,  $L = 8$  nm için GaAlAs/GaAs yapısında üç bağlı durum varken, GaInAs/GaAs yapısında iki bağlı durum ortaya çıkmaktadır. Taban durumdaki elektronun çoğunlukla sol kuantum kuyusuna yerleştiği ve ikinci enerji seviyesindeki elektronun ise sağ kuantum kuyusunda lokalize olduğu görülmektedir.  $L = 16$  nm genişliği için, GaAlAs/GaAs yapısında beş bağlı durum, GaInAs/GaAs yapısında ise dört bağlı durum görülmektedir. Potansiyel profilinin değişiminden en fazla etkilenen enerjisi düşük olan parçacıklardır, bu yüzden taban durum enerjisindeki elektron tamamen sol kuyuda bulunurken, ikinci enerji seviyesindeki elektron da sağ kuyuda sanki simetrik çift kuyuda kuşatılmış gibi davranmaktadır. Diğer enerji seviyeleri ise, kuyu şekillerine bağlı olarak yerleşirler.



**Şekil 4.5** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $L = 8$  nm, b)  $L = 16$  nm genişliklerinde asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları

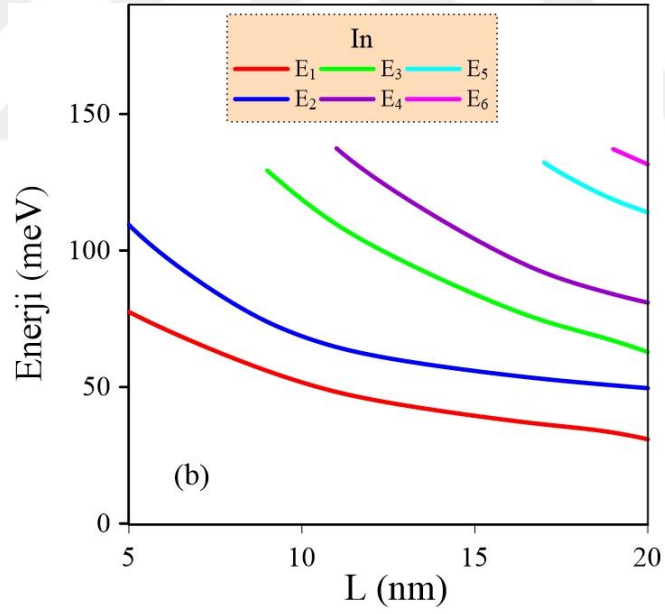
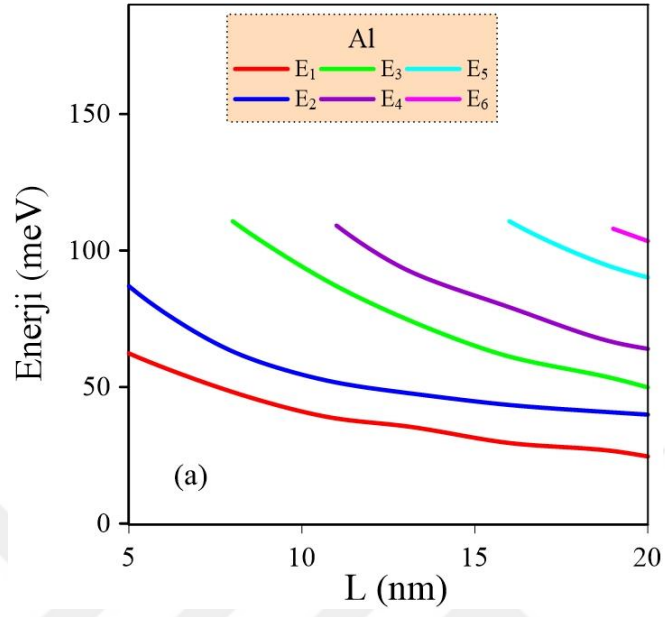


**Şekil 4.6** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $L = 8$  nm, b)  $L = 16$  nm genişliklerinde asimetrik çift kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları

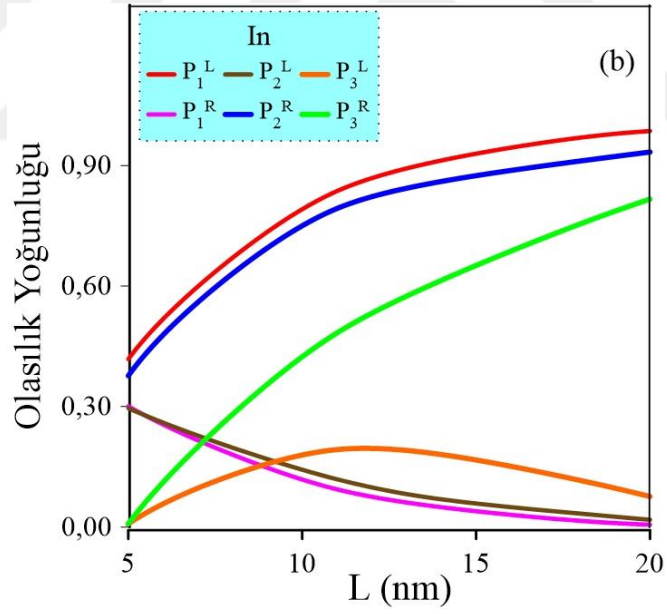
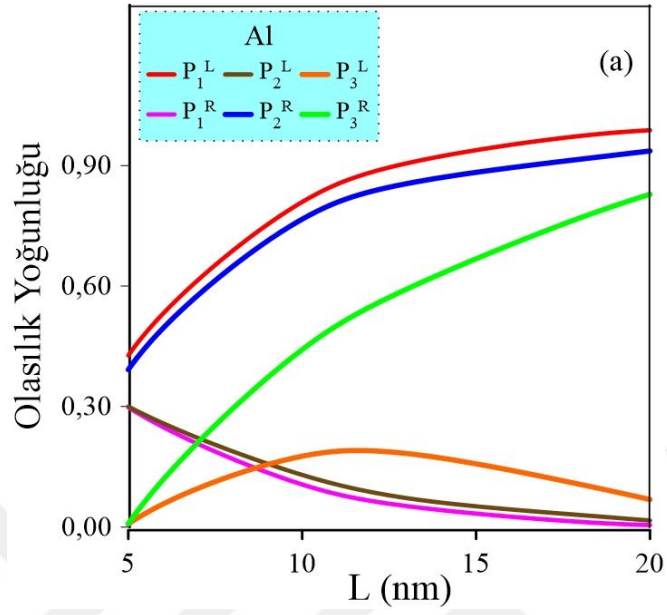
GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için  $L = (5 - 20)$  nm arasındaki kuyu genişliğine bağlı olarak bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi Şekil 4.7’de görülmektedir. Beklendiği gibi, kuyular genişledikçe enerji seviyelerinin değerleri azalmakta ve kuyular içerisinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi yer almaktadır. Üçüncü bağlı durum enerjisi GaAlAs/GaAs yapısında  $L = 8$  nm genişliğinde görünürken, GaInAs/GaAs yapısında  $L = 9$  nm’de ortaya çıkmaktadır. Her iki yapıda da dördüncü ve altıncı seviyeler sırasıyla  $L = 11$  nm ve  $L = 19$  nm’de kuyu içinde lokalize olurken, beşinci enerji seviyesi sırasıyla GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için  $L = 16$  nm ve  $L = 17$  nm genişliklerinde kuyu içerisinde yerleşmiştir. Aradaki farklar, GaInAs/GaAs yapısında elektronun etkin kütlelerinin daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.8 hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğine bağlı olarak elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıklarını göstermektedir. Her iki yapıda da  $L = 5$  nm başlangıç değeri için, taban durum ve ikinci durum enerji seviyeleri sırasıyla sol ve sağ kuyularda yer almakta ve kuyu genişlikleri arttıkça daha fazla buralara yerleşmektedir. Üçüncü enerji seviyesi, kuyu genişliğinin küçük olduğu durumlarda ( $L < 11$  nm için) hem sol hem de sağ kuyularda bulunurken, genişliğin daha fazla artmasıyla birlikte ( $L = 11$  nm’de dördüncü enerji seviyesi de ortaya çıktığından) sağ kuyuya yerleşmektedir.





**Şekil 4.7** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğine bağlı olarak bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi



**Şekil 4.8** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğinin değişimine karşılık elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları

### 4.3 Simetrik ve Asimetrik Çift Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Engel Kalınlığının Etkisi

Kuyu genişlikleri  $L = L_L = L_R = 10$  nm,  $L_b = 60$  nm ve alaşım oranı  $x = 0.12$  olmak üzere, sırasıyla kuşatma potansiyel ifadeleri verilen simetrik ve asimetrik çift kuyulardan oluşan sistemler aşağıdaki gibi isimlendirilmiştir.

- Simetrik çift yarı V-şekilli kuantum kuyusu (*Double Semi V-Shaped Quantum Wells* (DSVQW))
- Simetrik çift ters yarı parabolik kuantum kuyusu (*Double Inverse Semi Parabolic Quantum Wells* (DISPQW))
- Yarı eğik kuantum kuyusu (*Semi Graded Quantum Well* (SGQW)) –  
Yarı parabolik kuantum kuyusu (*Semi Parabolic Quantum Well* (SPQW))
- Ters yarı parabolik kuantum kuyusu (*Inverse Parabolic Quantum Well* (IPQW))–  
Ters yarı V-şekilli kuantum kuyusu (*Inverse V-Shaped Quantum Well* (IVQW))

$$V^{DSVQW}(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{1}{L} \left( z + \frac{b+L}{2} \right) & -L - \frac{b}{2} \leq z \leq -\frac{L+b}{2} \\ \frac{1}{L} \left( z + \frac{b-L}{2} \right) + 1 & -\frac{L+b}{2} \leq z \leq -\frac{b}{2} \\ \frac{1}{L} \left( -z + \frac{b}{2} \right) + \frac{1}{2} & \frac{b}{2} \leq z \leq \frac{L+b}{2} \\ \frac{1}{L} \left( z + \frac{-b+L}{2} \right) - 1 & \frac{L+b}{2} \leq z \leq L + \frac{b}{2} \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.3]$$

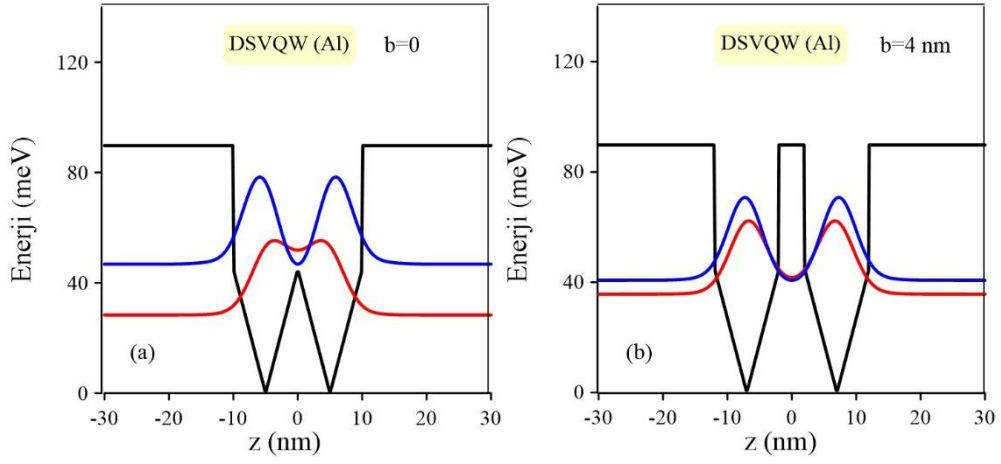
$$V^{DISPQW}(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{1}{2L^2} \left( z + \left( \frac{b}{2} + L \right) \right)^2 + \frac{1}{2} & -L - \frac{b}{2} \leq z \leq -\frac{b}{2} \\ -\frac{1}{2L^2} \left( z - \left( \frac{b}{2} + L \right) \right)^2 + \frac{1}{2} & \frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b}{2} + L \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.4]$$

$$V^{SGQW-SPQW}(z) = V_0 \begin{cases} \frac{1}{2L} \left( z + \frac{b}{2} + L \right) & -\frac{b}{2} - L \leq z \leq -\frac{b}{2} \\ \frac{1}{2L^2} \left( z - \left( \frac{b}{2} + L \right) \right)^2 & \frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b}{2} + L \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.5]$$

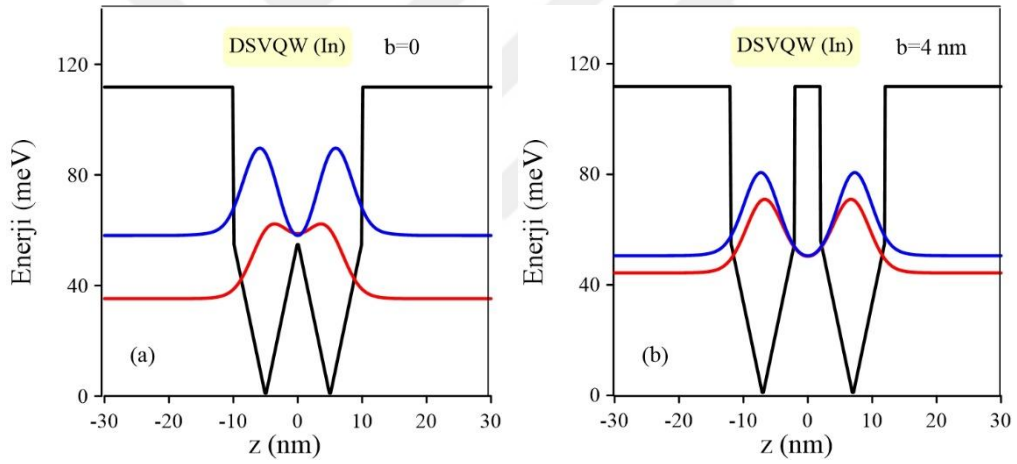
$$V^{\text{IPQW-IVQW}}(z) = V_0 \begin{cases} -\frac{2}{L^2} \left( z + \left( \frac{b+L}{2} \right) \right)^2 + \frac{1}{2} & -\frac{b}{2} - L \leq z \leq -\frac{b}{2} \\ \frac{1}{L} \left( z - \frac{b}{2} \right) & \frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b+L}{2} \\ \frac{1}{L} \left( -z + \frac{b+L}{2} \right) + \frac{1}{2} & \frac{b+L}{2} \leq z \leq \frac{b}{2} + L \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [4.6]$$

Burada tüm sistemlerin potansiyel yükseklikleri, GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapıları için sırasıyla  $V_0 = 90$  meV ve  $V_0 = 110$  meV'dir.

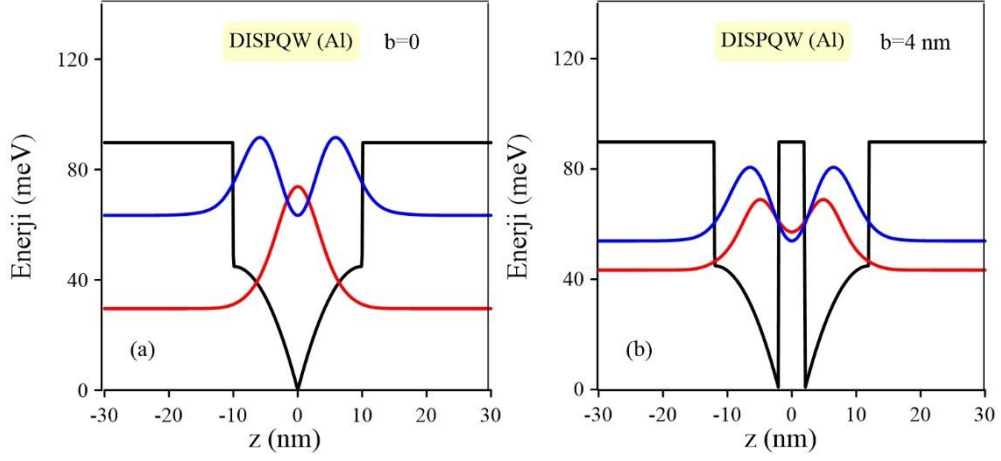
Hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapıları için kuyular arasında engel genişliği yokken ve varken, yapıların kuşatma potansiyel profilleri ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun bulunma olasılıkları, (DSVQW için) Şekil 4.9 ve Şekil 4.10, (DISPQW için) Şekil 4.11 ve Şekil 4.12, (SGQW-SPQW için) Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ve (IPQW-IVQW için) Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi,  $b = 0$  için sadece DISPQW yapısı tek bir kuyudur. Farklı kuyu şekillerine sahip iki simetrik yapının enerji seviyeleri de birbirinden farklıdır. Beklendiği gibi, simetrik sistemlerde aynı enerji durumundaki elektronlar her iki kuyuda eşit oranda bulunurken, buradaki asimetrik olan SGQW-SPQW ve IPQW-IVQW sistemlerinde taban durumdaki parçacık çoğunlukla sağ kuantum kuyusuna yerleşmiş ve ikinci durumdaki elektronlar sol kuyuda kuşatılmıştır. Engel kalınlığı arttıkça, parçacıklar buldukları yerlerde daha fazla kuşatılırlar. Kuyular arasında engel bulunmadığında kuyulardaki parçacıklar arasında etkileşim fazla iken, engel kalınlığı arttıkça bu etkileşim azalır ve çok büyük genişliklerde bu kuyular yalıtılmış tek kuantum kuyusu gibi davranır. İnce bir engel tabakası ile ayrılan iki kuantum kuyusundan oluşan yapılarda enerji seviyeleri arasındaki fark, kalın engel tabakalı sistemlere göre daha büyüktür. Engel kalınlığı arttıkça, taban durum daha yüksek enerjilere, ikinci durum ise daha düşük enerjilere zorlanır. İki simetrik kuantum kuyusu arasındaki ayrılma büyükse, kuyular aynı taban durum enerjilerine sahip iki bağımsız tek kuantum kuyusu gibi davranır. Bu durum, Ref. [77-79] ile verilen sonuçlarla uyumludur. Asimetrik kuantum kuyularında da engel kalınlığı artırılırsa, belli bir kalınlıktan sonra enerji seviyeleri birbirinden farklı olan bağımsız iki kuantum kuyusu ortaya çıkar. Yani, kalın olan engel genişliği, iki kuantum kuyusu arasındaki tünellemeyi azaltır ve çift kuyuların bitişik kuyuyla bağlantısı olmadan tek bir yalıtılmış kuantum kuyusu gibi davranmasına neden olur.



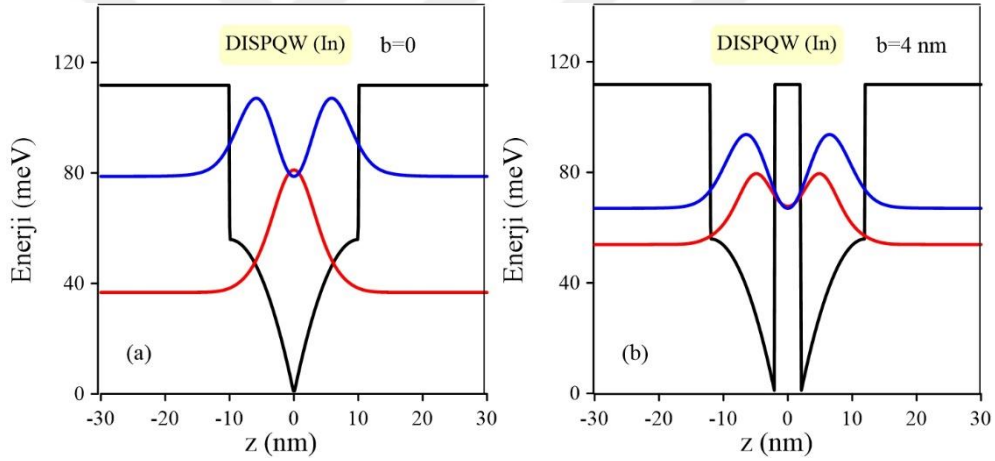
**Şekil 4.9** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde simetrik DSVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



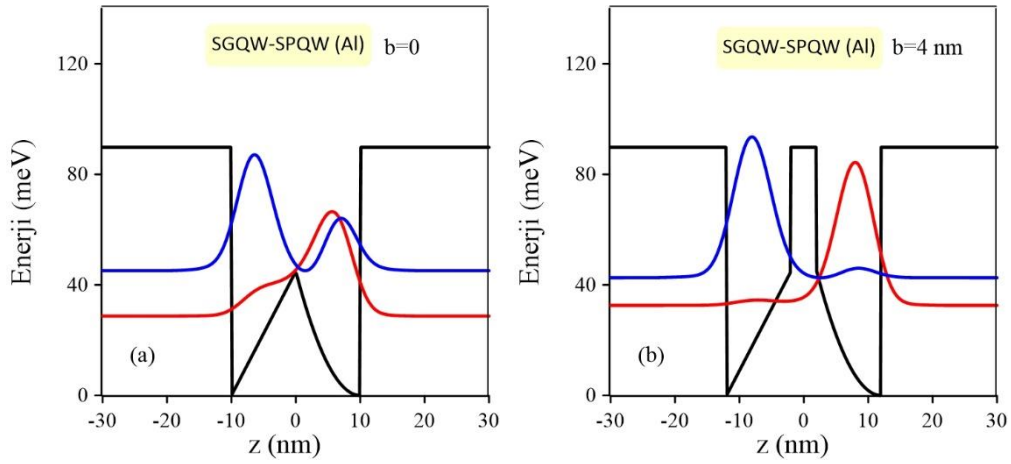
**Şekil 4.10** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde simetrik DSVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



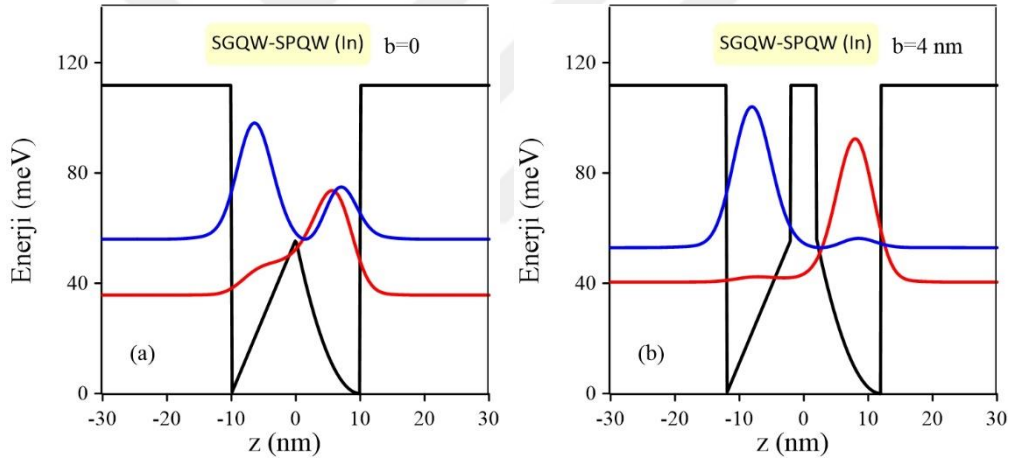
**Şekil 4.11** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde simetrik DISPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



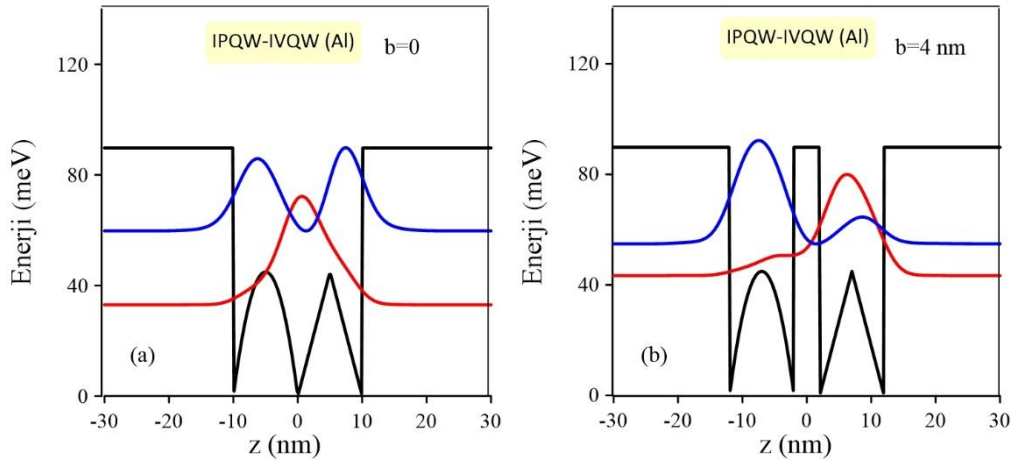
**Şekil 4.12** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde simetrik DISPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



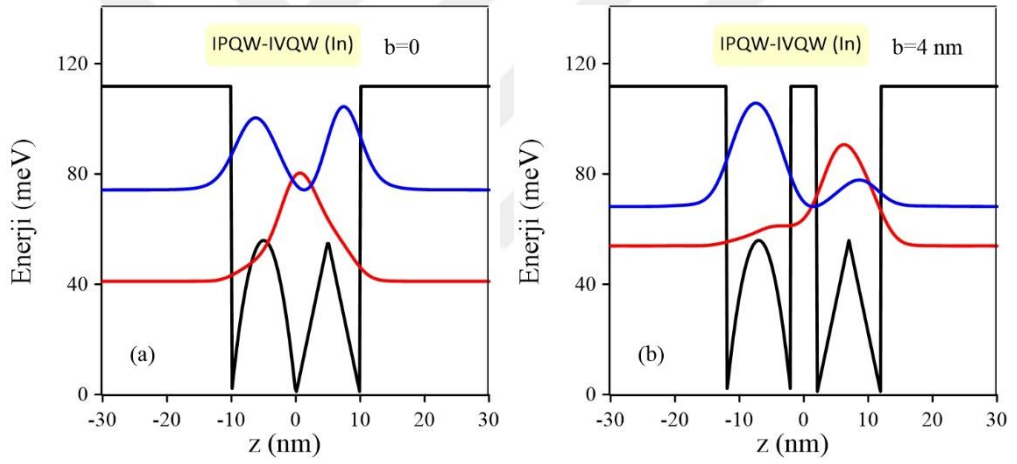
**Şekil 4.13** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde asimetrik SGQW-SPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



**Şekil 4.14** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde asimetrik SGQW-SPQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



**Şekil 4.15** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde asimetrik IPQW-IVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



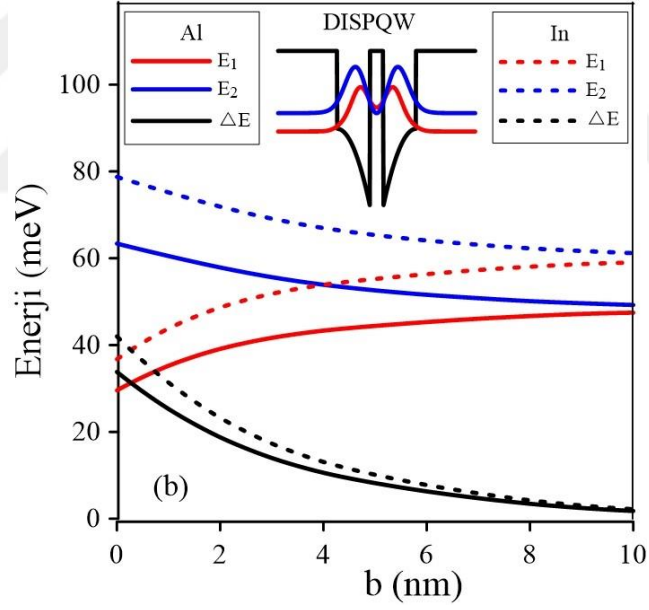
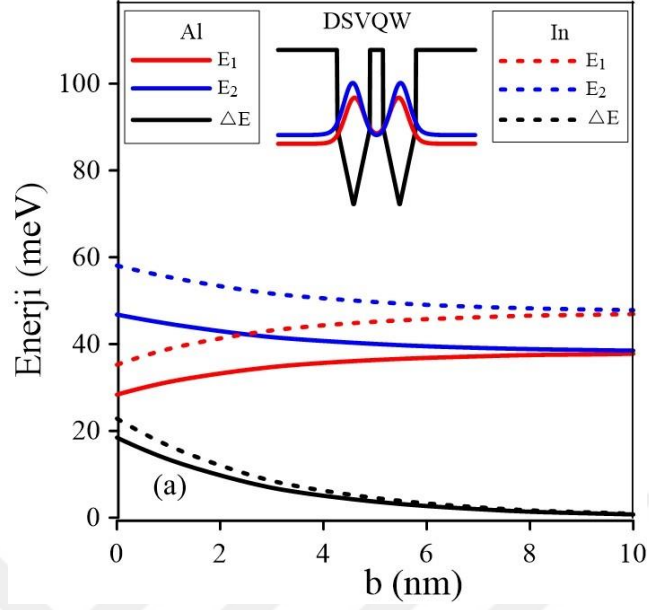
**Şekil 4.16** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $b = 0$  ve b)  $b = 4$  nm genişliklerinde asimetrik IPQW-IVQW kuşatma potansiyeli ve ilk iki bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



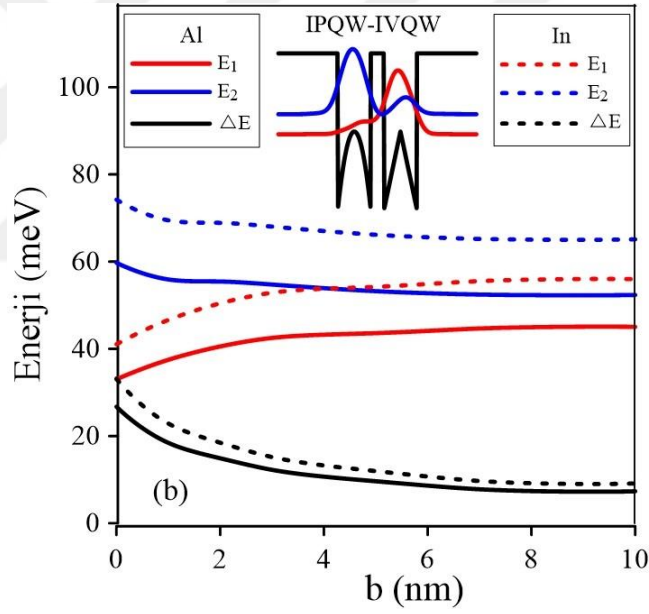
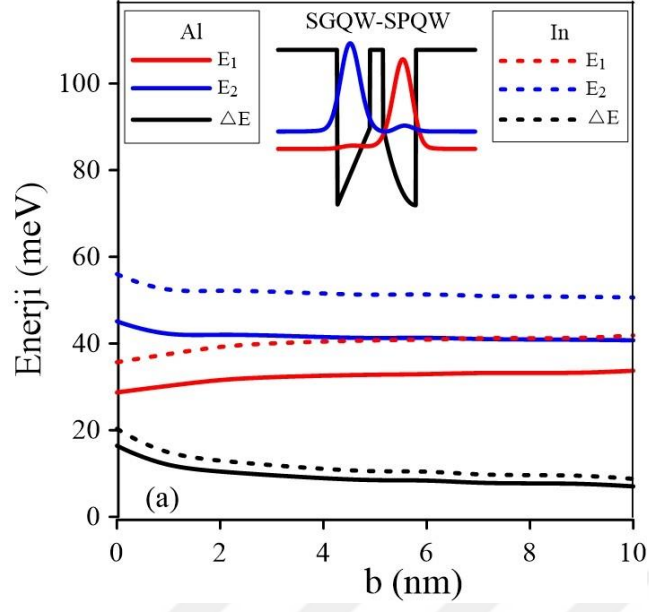
Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısını, kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısını göstermek üzere, simetrik ve asimetrik çift kuantum kuyuları için  $b = (0 - 10)$  nm arasındaki engel kalınlığının fonksiyonu olarak ilk iki bağlı durum enerji seviyelerinin ve bu seviyeler arasındaki enerji farklarının değişimleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmektedir. Beklendiği gibi,  $b = 0$  için her bir kuyuda kuşatılmış olan elektronlar arasındaki etkileşim fazladır, engel kalınlığı büyüdükçe bu etkileşim azalır, çünkü kalın engel genişliği, iki kuantum kuyusu arasındaki tünellemeyi azaltır ve çift kuyuların birbirleriyle etkileşimi olmayan tek bir yalıtılmış kuantum kuyusu gibi davranmasına neden olur. Taban durum enerji seviyesi yükselirken, ikinci durum enerji seviyesi azalır. Belli bir engel kalınlığından sonra, simetrik çift kuantum kuyularının enerji seviyeleri birbirine yaklaşır ve aynı taban durum enerji seviyelerine sahip iki bağımsız tek kuantum kuyusu haline gelir. Şekil 4.17’den görüldüğü gibi, DSVQW ve DISPQW için, engel kalınlığı sırasıyla  $b = 8$  nm ve  $b = 10$  nm değerini aştıktan sonra, sistem artık aynı enerji seviyesinde birbirinden bağımsız iki kuantum kuyusuna sahiptir. Asimetrik SGQW-SPQW ve IPQW-IVQW sistemleri için ise, sırasıyla  $b = 4$  nm ve  $b = 6$  nm değerinden sonra, sistemde enerji seviyeleri birbirinden farklı olan ve etkileşmeyen iki kuantum kuyusu ortaya çıkar.

Hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapısı için  $b = 0$  ve  $b = 4$  nm değerlerinde simetrik ve asimetrik çift kuantum kuyuları için ilk iki enerji seviyesi Çizelge 4.1’de ve bu iki enerji seviyesinde elektronların bulunma olasılıkları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi, yüksek potansiyel profiline sahip olan GaInAs/GaAs yapısının enerji seviyeleri, GaAlAs/GaAs yapısının enerji seviyelerinden büyüktür. Beklendiği gibi, simetrik DSVQW ve DISPQW için aynı enerji seviyesindeki elektronların her iki kuyuda bulunma olasılıkları eşittir. Simetrik yapılarda taban durumunda elektronun bulunma olasılığı  $b = 0$  için DISPQW sisteminde daha fazla, oysa  $b = 4$  nm için DSVQW sisteminde daha fazladır. Asimetrik yapılarda  $b = 0$  ve  $b = 4$  nm değerlerinde, taban durumdaki elektronlar çoğunlukla sağ kuyuda ve ikinci durumdaki elektronlar ise sol kuyuda yerleşmişlerdir. Bu yapılar arasındaki en önemli fark, enerji seviyelerinin büyüklükleridir.

Bu çalışma, “The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlığıyla Journal of Molecular Structure 1156 (2018) 726-732 dergisinde yayımlanmıştır.



**Şekil 4.17** a) DSVQW sistemi, b) DISPQW sistemi için engel kalınlığının fonksiyonu olarak ilk iki enerji seviyesinin ve bu seviyeler arasındaki enerji farkının değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.)



**Şekil 4.18** a) SGQW-SPQW sistemi, b) IPQW-IVQW sistemi için engel kalınlığının fonksiyonu olarak ilk iki enerji seviyesinin ve bu seviyeler arasındaki enerji farkının değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.)

**Çizelge 4.1** Kuyular arasında engel yokken ve varken GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapılarındaki ilk iki enerji değeri (meV biriminde)

	GaAlAs/GaAs				GaInAs/GaAs			
	b = 0		b = 4 nm		b = 0		b = 4 nm	
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>
DSVQW (Simetrik)	28.35	46.80	35.66	40.72	35.24	58.07	44.32	50.55
DISPQW (Simetrik)	29.56	63.37	43.32	53.90	36.73	78.74	53.89	66.97
SGQW-SPQW	28.71	45.12	32.56	42.60	35.68	56.01	40.44	52.92
IPQW-IVQW	33.01	59.72	43.35	54.85	41.03	74.21	53.91	68.18

**Çizelge 4.2:** Kuyular arasında engel yokken ve varken GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapıları için ilk iki enerji seviyesinde elektronların bulunma olasılıkları

GaAlAs/GaAs	b = 0				b = 4 nm			
	P <sub>1</sub> <sup>L</sup>	P <sub>1</sub> <sup>R</sup>	P <sub>2</sub> <sup>L</sup>	P <sub>2</sub> <sup>R</sup>	P <sub>1</sub> <sup>L</sup>	P <sub>1</sub> <sup>R</sup>	P <sub>2</sub> <sup>L</sup>	P <sub>2</sub> <sup>R</sup>
DSVQW (Simetrik)	0.487	0.487	0.459	0.459	0.446	0.446	0.467	0.467
DISPQW (Simetrik)	0.494	0.494	0.434	0.434	0.411	0.411	0.457	0.457
SGQW-SPQW	0.249	0.696	0.646	0.241	0.039	0.852	0.840	0.047
IPQW-IVQW	0.391	0.581	0.439	0.389	0.126	0.703	0.709	0.154

GaInAs/GaAs	b = 0				b = 4 nm			
	P <sub>1</sub> <sup>L</sup>	P <sub>1</sub> <sup>R</sup>	P <sub>2</sub> <sup>L</sup>	P <sub>2</sub> <sup>R</sup>	P <sub>1</sub> <sup>L</sup>	P <sub>1</sub> <sup>R</sup>	P <sub>2</sub> <sup>L</sup>	P <sub>2</sub> <sup>R</sup>
DSVQW (Simetrik)	0.488	0.488	0.460	0.460	0.447	0.447	0.468	0.468
DISPQW (Simetrik)	0.495	0.495	0.436	0.436	0.412	0.412	0.458	0.458
SGQW-SPQW	0.248	0.697	0.647	0.240	0.038	0.854	0.842	0.046
IPQW-IVQW	0.390	0.582	0.439	0.391	0.125	0.705	0.711	0.153

## 5. ÜÇLÜ KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

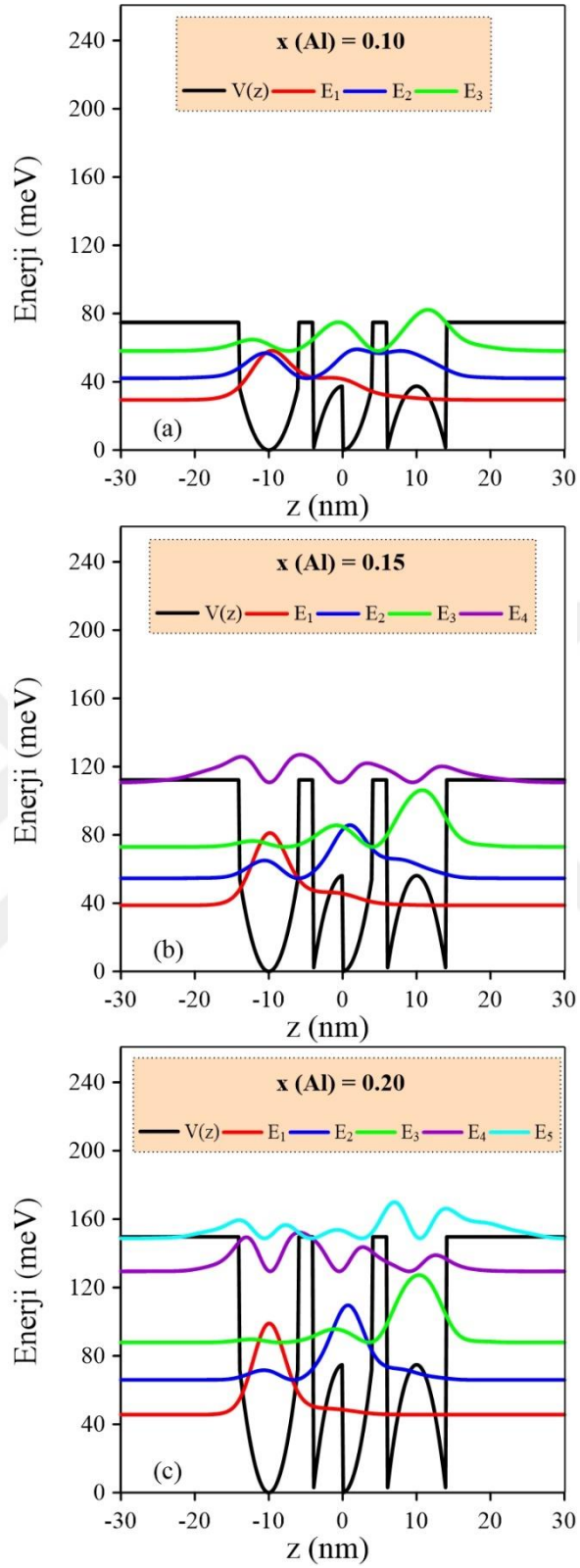
### 5.1 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Alaşım Oranının Etkisi

Simetrik yarı parabolik kuantum kuyusu (sol kuyu), asimetrik yarı parabolik-yarı ters parabolik kuantum kuyusu (orta kuyu) ve simetrik ters yarı parabolik kuantum kuyusu (sağ kuyu) bir araya getirilerek oluşturulan asimetrik üçlü kuantum kuyuları (*Asymmetric Triple Quantum Wells* (ATQW)) için,  $L_b = 60$  nm, sol, orta ve sağ kuyu genişliği  $L_L = L = L_R = 8$  nm ile sol ve sağ engel genişliği  $b_L = b_R = 2$  nm olmak üzere, yapının kuşatılmış potansiyel ifadesi

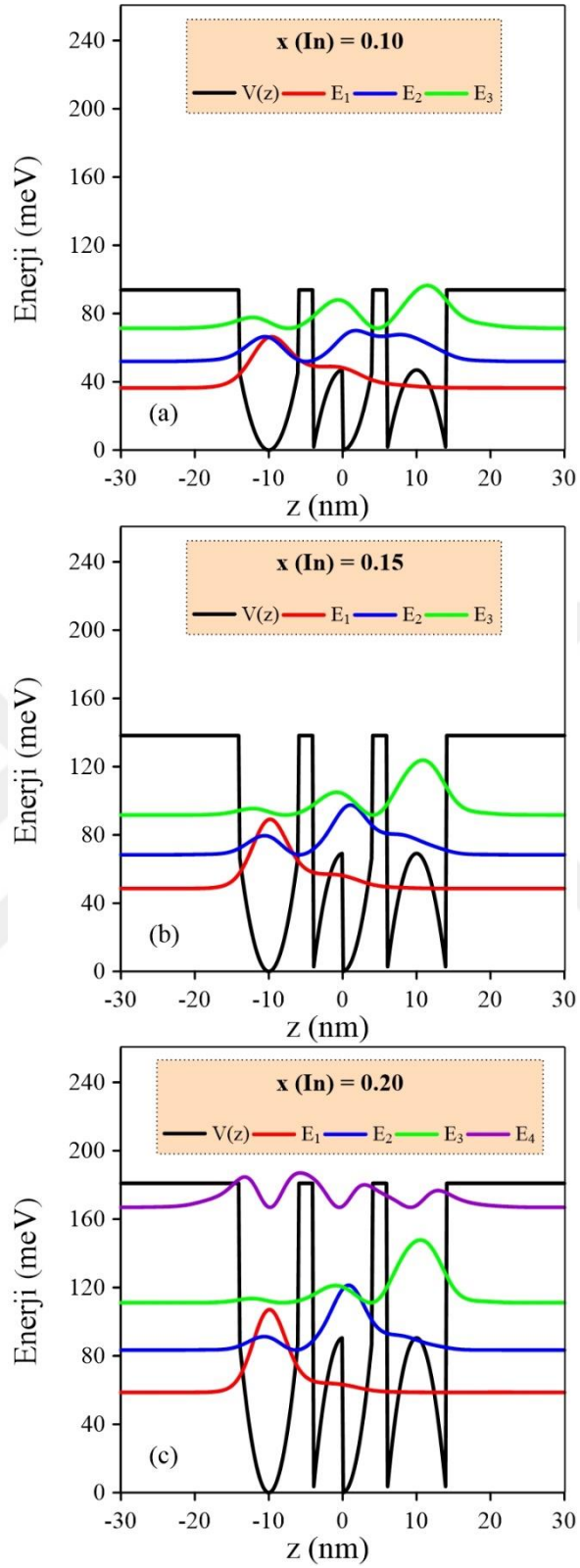
$$V(z) = V_0 \begin{cases} \frac{2}{L_L^2} \left( z + b_L + \frac{(L+L_L)}{2} \right)^2 & - \left( L_L + b_L + \frac{L}{2} \right) \leq z \leq - \left( b_L + \frac{L}{2} \right) \\ -\frac{2}{L^2} z^2 + \frac{1}{2} & -\frac{L}{2} \leq z \leq 0 \\ \frac{2}{L^2} z^2 & 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\ -\frac{2}{L_R^2} \left( z - b_R - \frac{(L+L_R)}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} & \frac{L}{2} + b_R \leq z \leq \frac{L}{2} + b_R + L_R \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [5.1]$$

biçimindedir.

GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için üç farklı alaşım oranında asimetrik üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun bulunma olasılıkları sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi,  $x = 0.10$ ,  $x = 0.15$  ve  $x = 0.20$  değerleri için GaAlAs/GaAs yapısında sırasıyla üç, dört ve beş bağlı durum varken, aynı oranlara sahip GaInAs/GaAs yapısında ise, sırasıyla üç, üç ve dört bağlı enerji seviyesi ortaya çıkmaktadır. Taban durumdaki elektronun çoğunlukla sol kuantum kuyusuna yerleştiği, ikinci ve üçüncü enerji seviyesindeki elektronların ise sırasıyla orta ve sağ kuantum kuyusunda kuşatıldığı görülmektedir. Alaşım oranına bağlı olarak potansiyel profilinin yüksekliği değiştikçe, hem bağlı durum enerji seviyeleri hem de bu enerji seviyelerindeki elektronların olasılık yoğunlukları değişmektedir. GaAlAs/GaAs yapısının alaşım oranına duyarlılığının GaInAs/GaAs yapısından daha fazla olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.1** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $x = 0.10$ , b)  $x = 0.15$ , c)  $x = 0.20$  değerlerinde asimetric üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları



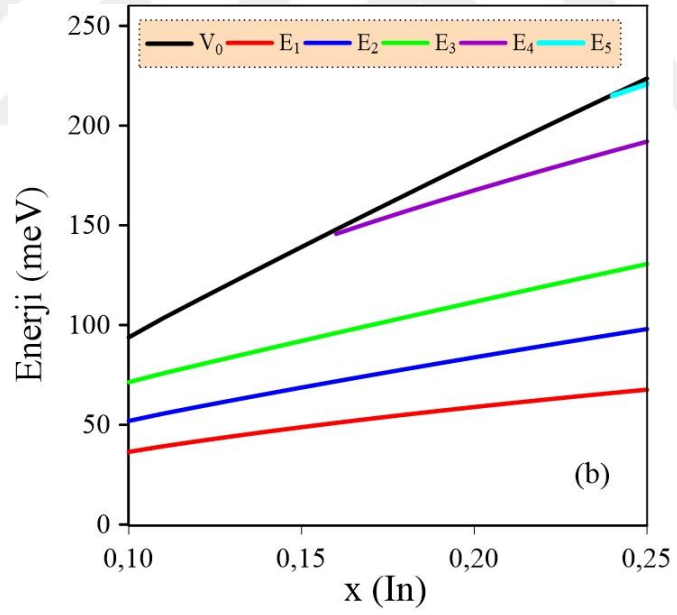
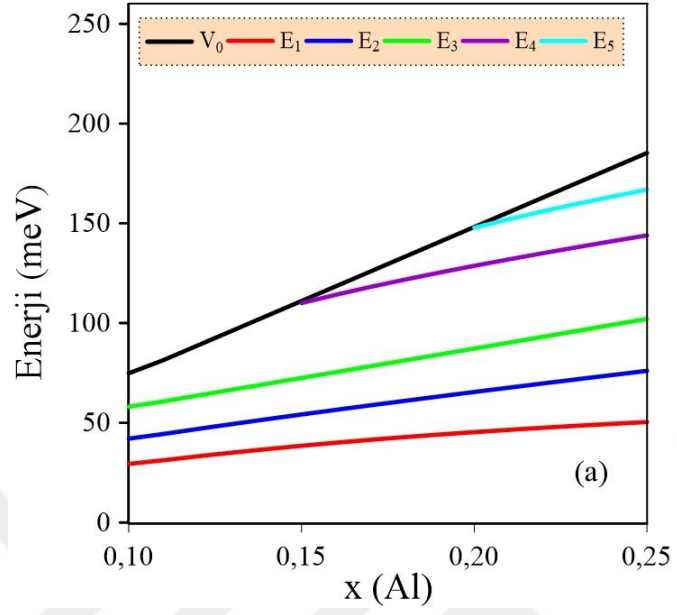
**Şekil 5.2** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $x = 0.10$ , b)  $x = 0.15$ , c)  $x = 0.20$  değerlerinde asimetrik üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyeli ve bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları

Şekil 5.3’de GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için  $x = (0.10 - 0.25)$  arasındaki alaşım oranının değişimine karşılık ortaya çıkan bağlı durum enerji seviyeleri verilmektedir. Beklendiği gibi, alaşım oranı arttıkça kuşatılmış potansiyel yüksekliği ve buna bağlı olarak da enerji seviyelerinin değerleri artmakta ve kuyular içerisinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi yer almaktadır. Dördüncü bağlı durum enerjisi GaAlAs/GaAs yapısında  $x \geq 0.15$  değerinde, GaInAs/GaAs yapısında ise  $x \geq 0.16$  değerinde görülmektedir. GaAlAs/GaAs yapısında beşinci enerji seviyesi  $x \geq 0.20$  değerinde kuşatılmış potansiyel içerisinde bulunurken, bu enerji seviyesi  $x \geq 0.24$  değerinde GaInAs/GaAs yapısında ortaya çıkmıştır. Aradaki farklar, önceki bölümde de belirtildiği gibi, GaInAs/GaAs yapısında elektronun etkin kütesinin daha küçük olmasından ve dolayısıyla enerji seviyelerinin daha yüksek değerlere çıkmasından kaynaklanmaktadır.

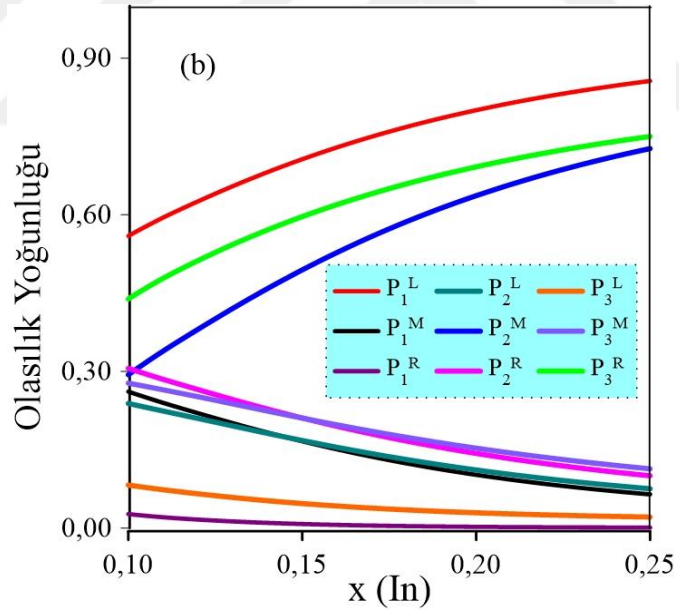
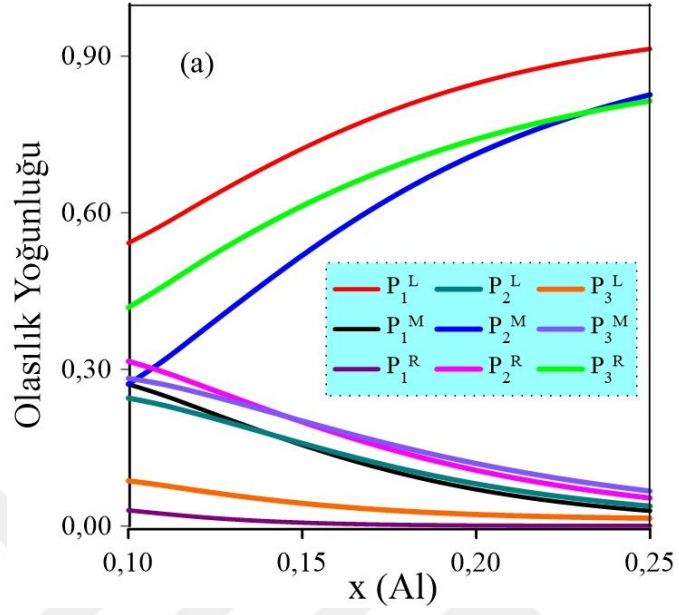
Şekil 5.4, hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıklarını göstermektedir. Her iki yapıda da  $x = 0.10$  olan ilk değer için, taban, ikinci ve üçüncü durum enerji seviyeleri sırasıyla sol, orta ve sağ kuyularda yer almakta ve alaşım oranının artmasıyla birlikte aynı kuyularda bulunma olasılık yoğunlukları büyümektedir.

Bu çalışma, “Electronic characteristics of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on Al and In concentration” başlığıyla 04/10/2018-06/10/2018 tarihleri arasında *5<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Advanced-Nanotechnologies For Next Generation* (MSNG-2018) Cappadocia, TÜRKİYE’de poster şeklinde sunulmak üzere, başvurusu yapılmış ve davet mektubu alınmıştır.





**Şekil 5.3** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranına karşılık asimetrik üçlü kuantum kuyularının potansiyel yüksekliğinin ve bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi



**Şekil 5.4** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için alaşım oranının fonksiyonu olarak asimetrik üçlü kuantum kuyularında elektronların bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları

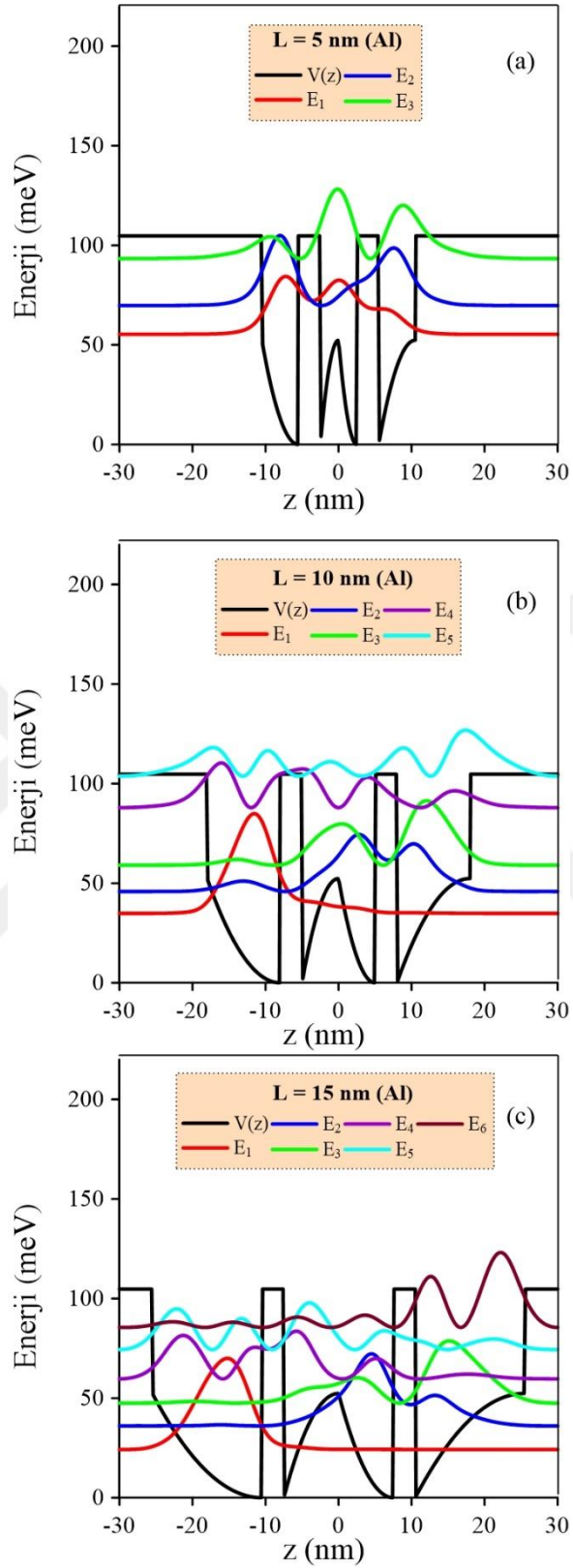
## 5.2 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri Üzerine Kuyu Genişliğinin Etkisi

Yarım parabolik kuantum kuyusu (sol kuyu), yarım ters parabolik-yarım parabolik kuantum kuyusu (orta kuyu) ve yarım ters parabolik kuantum kuyusu (sağ kuyu) ile oluşturulan asimetrik üçlü kuantum kuyuları (ATQW)) için,  $L_b = 60$  nm, alaşım oranı  $x = 0.14$ , sol ve sağ engel genişliği  $b_L = b_R = 3$  nm ve  $L_L = L = L_R$  olmak üzere, yapının potansiyel ifadesi

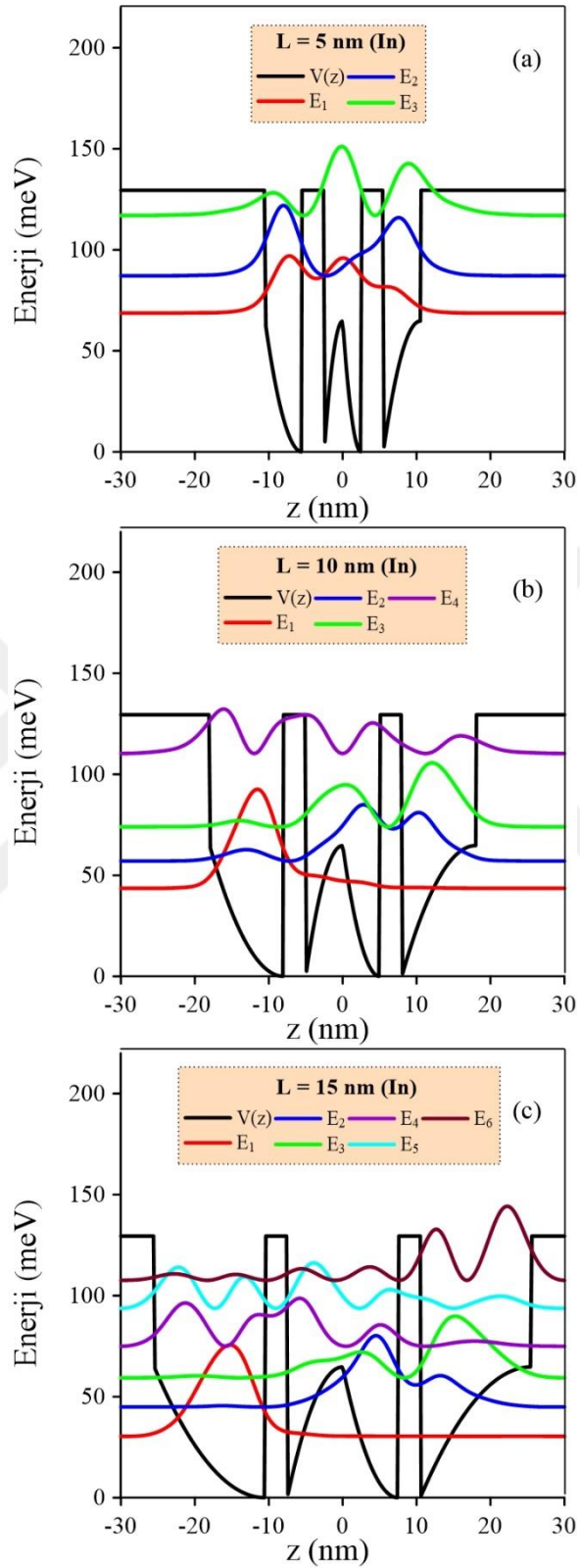
$$V(z) = V_0 \begin{cases} \frac{1}{2L_L^2} \left( -z - \left( b_L + \frac{L}{2} \right) \right)^2 & - \left( L_L + b_L + \frac{L}{2} \right) \leq z \leq - \left( b_L + \frac{L}{2} \right) \\ -\frac{2z^2}{L^2} + \frac{1}{2} & -\frac{L}{2} \leq z \leq 0 \\ \frac{2}{L^2} \left( -z + \frac{L}{2} \right)^2 & 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\ -\frac{1}{2L_R^2} \left( z - \left( b_R + L_R + \frac{L}{2} \right) \right)^2 + \frac{1}{2} & \frac{L}{2} + b_R \leq z \leq \frac{L}{2} + b_R + L_R \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [3.2]$$

ile verilmektedir. Burada potansiyel yüksekliği, GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapıları için sırasıyla  $V_0 = 105$  meV ve  $V_0 = 129$  meV'dir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için üç farklı kuyu genişliğinde asimetrik üçlü kuantum kuyularının kuşatma potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun bulunma olasılıkları verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi, hem GaAlAs/GaAs hem de yapısında GaInAs/GaAs yapısında  $L = 5$  nm ve  $L = 15$  nm için sırasıyla üç ve altı bağlı durum enerji seviyesi vardır.  $L = 10$  nm için GaAlAs/GaAs yapısında beş enerji seviyesi, oysa GaInAs/GaAs yapısında dört enerjisi seviyesi ortaya çıkmaktadır. Küçük kuyu genişliklerinde kuyular arasındaki etkileşim oldukça fazladır, bu yüzden her bir seviyedeki elektronlar herhangi bir kuyu içerisine yerleşmemişlerdir.  $L = 15$  nm için taban durumdaki elektronun çoğunlukla sol kuantum kuyusunda, ikinci enerji seviyesindeki elektronun orta kuyuda ve üçüncü seviyedeki elektronun ise sağ kuantum kuyusunda çoğunlukla lokalize olduğu görülmektedir. Diğer enerji seviyeleri ise, kuyu şekillerine bağlı olarak yerleşmektedirler.



**Şekil 5.5** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $L = 5 \text{ nm}$ , b)  $L = 10 \text{ nm}$ , c)  $L = 15 \text{ nm}$  genişliklerinde üçlü kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları

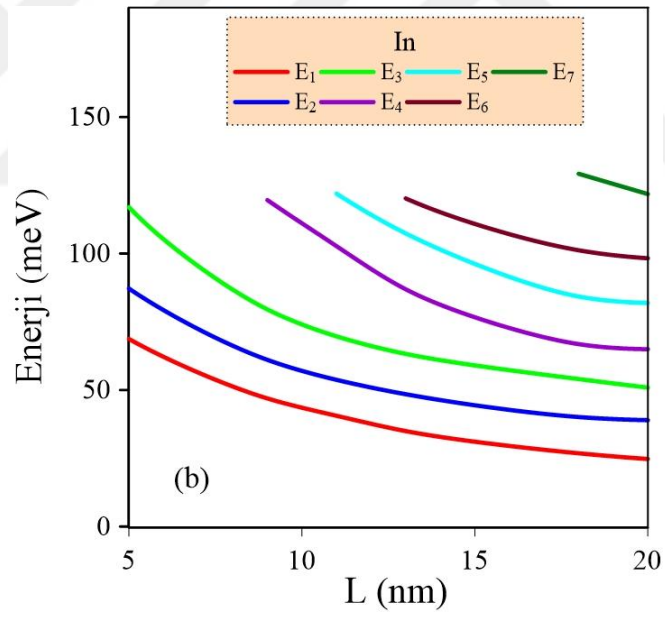
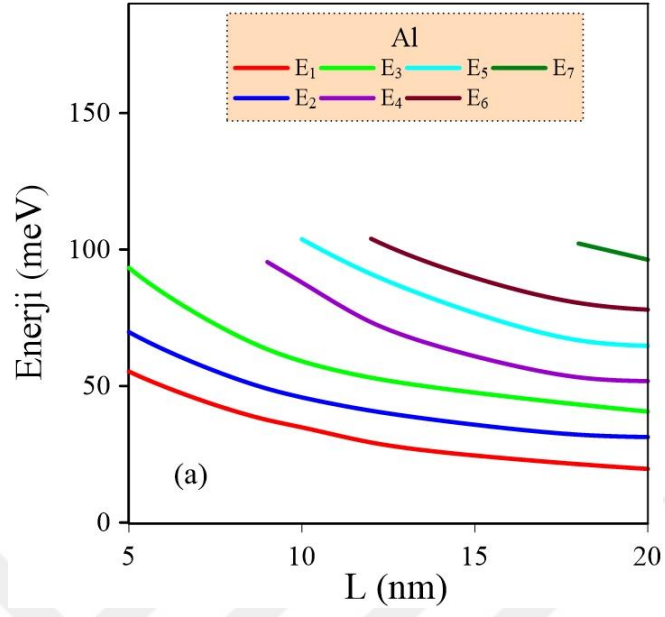


**Şekil 5.6** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $L = 5 \text{ nm}$ , b)  $L = 10 \text{ nm}$ , c)  $L = 15 \text{ nm}$  genişliklerinde üçlü kuantum kuyularının potansiyel profili ve bağlı durum enerji seviyelerinde elektronun olasılık yoğunlukları

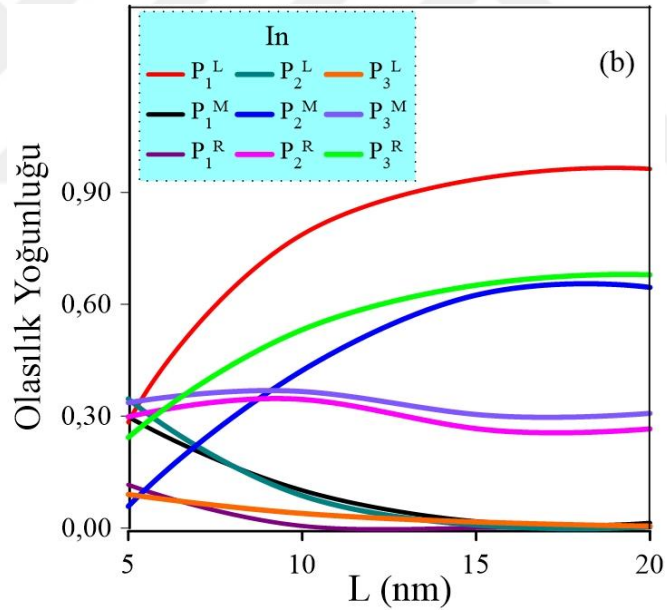
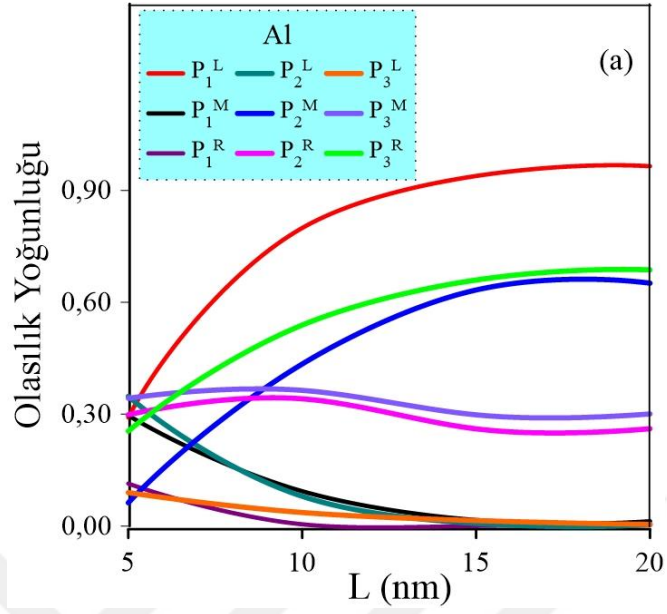
GaAlAs/GaAs yapısı ve GaInAs/GaAs yapısı için  $L = (5 - 20)$  nm arasındaki kuyu genişliğine bağlı olarak bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi Şekil 5.7’de görülmektedir. Beklendiği üzere, kuyular genişledikçe enerji seviyelerinin büyüklüğü azalmakta ve kuyular içerisinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi yer almaktadır. GaAlAs/GaAs yapısında dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci bağlı durum enerjileri sırasıyla  $L = 9, 10, 12$  ve  $18$  nm genişliklerinde görünürken, GaInAs/GaAs yapısında sırasıyla  $L = 9, 11, 13$  ve  $18$  nm’de ortaya çıkmaktadır. Buradan da görülüyor ki, GaInAs/GaAs yapısında enerji seviyeleri GaAlAs/GaAs yapısına nazaran daha yüksektir ve daha fazla bağlı durum enerji seviyesi için, kuantum kuyularının daha geniş olması gerekmektedir. Bu yüzden amaca uygun olarak, örneğin  $L = 10$  nm değerinde daha fazla bağlı durum enerji seviyesi elde etmek istenirse, GaAlAs/GaAs yapısı tercih edilir.

Şekil 5.8’de hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğinin değişimine karşılık elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıklarını göstermektedir. Her iki yapıda da ilk değer olan  $L = 5$  nm için, taban, ikinci ve üçüncü durum enerji seviyeleri sırasıyla sol, orta ve sağ kuyularda yer almakta ve kuyu genişlikleri arttıkça daha fazla buldukları kuyularda kuşatılmaktadırlar.

Bu çalışma, “Dependence on well widths of the electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlığıyla 04/10/2018-06/10/2018 tarihleri arasında *5<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Advanced-Nanotechnologies For Next Generation (MSNG-2018)* Cappadocia, TÜRKİYE’de sözlü sunum olarak sunulmak üzere, başvurusu yapılmış ve davet mektubu alınmıştır.



**Şekil 5.7** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğine bağlı olarak üçlü kuantum kuyularında bağlı durum enerji seviyelerinin değişimi



**Şekil 5.8** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için kuyu genişliğinin değişimine karşılık üçlü kuantum kuyularında elektronların ilk üç bağlı durum enerji seviyelerinde bulunma olasılıkları



### 5.3 Asimetrik Üçlü Kuantum Kuyularının Elektronik Özellikleri

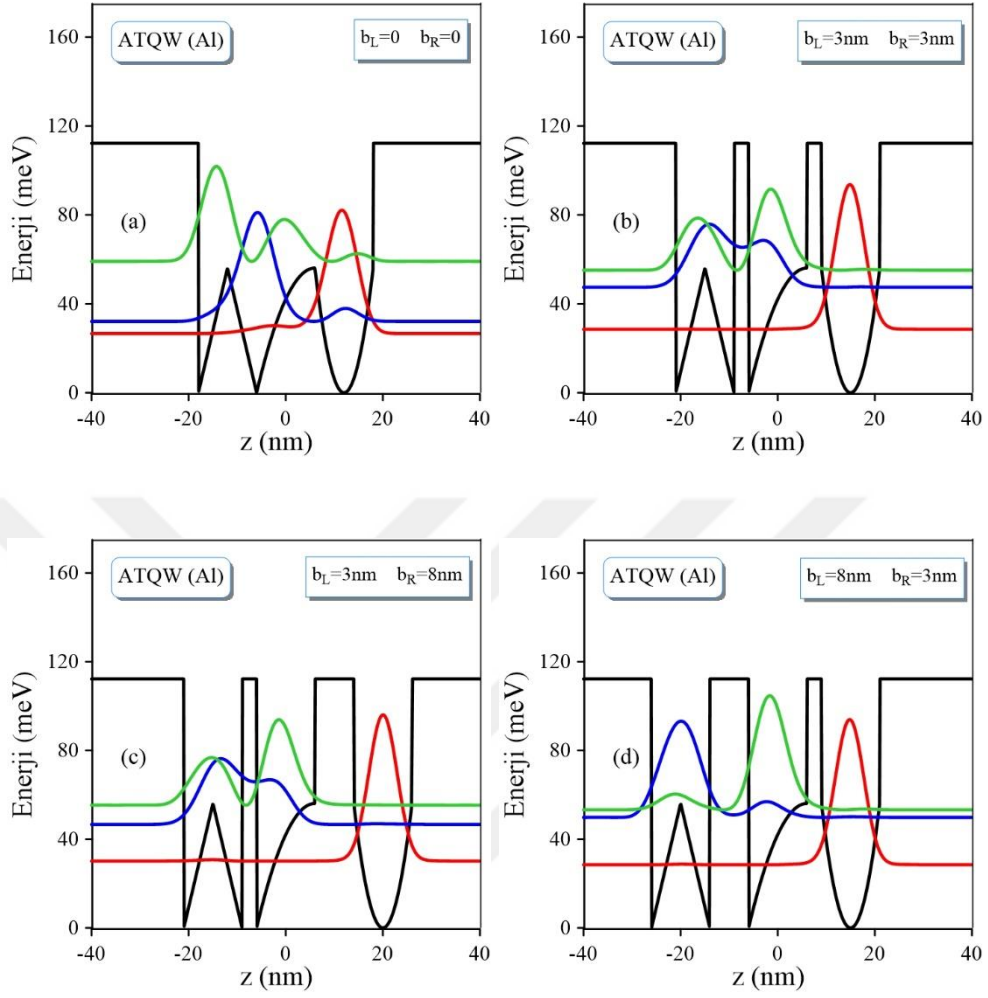
#### Üzerine Engel Kalınlığının Etkisi

Ters yarı V-şekilli kuantum kuyusu (sol kuyu), yarım yarı ters parabolik kuantum kuyusu (orta kuyu) ve yarı parabolik kuantum kuyusu (sağ kuyu) ile oluşturulan asimetrik üçlü kuantum kuyuları (ATQW) için, sol, orta ve sağ kuyu genişlikleri  $L_L = L = L_R = 12$  nm,  $L_b = 80$  nm ve alaşım oranı  $x = 0.15$  olmak üzere, sistemin kuşatma potansiyel ifadesi aşağıda verilmiştir.

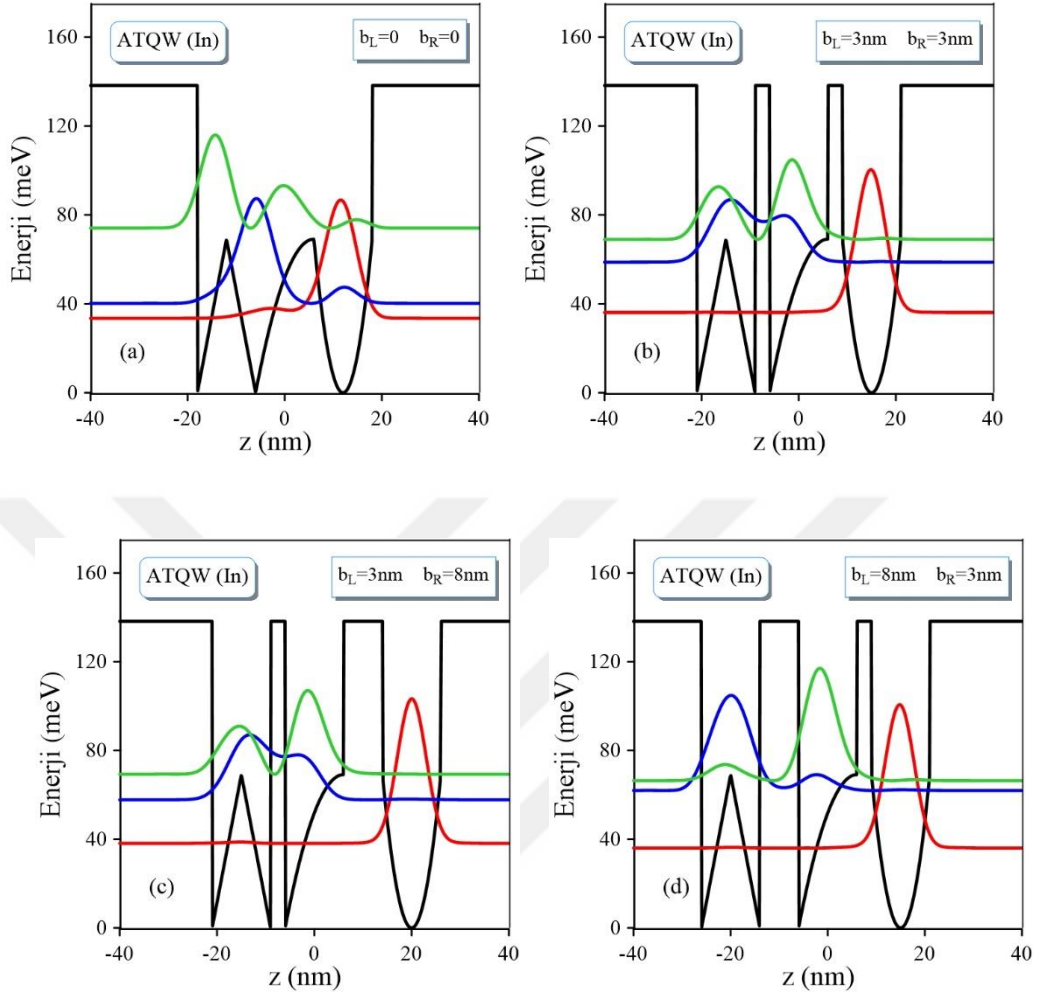
$$V(z) = V_0 \begin{cases} \frac{1}{L_L} \left( z + \left( b_L + \frac{L+L_L}{2} \right) \right) + \frac{1}{2} & - \left( L_L + b_L + \frac{L}{2} \right) \leq z \leq - \left( b_L + \frac{L+L_L}{2} \right) \\ - \frac{1}{L_L} \left( z + \left( b_L + \frac{L+L_L}{2} \right) \right) + \frac{1}{2} & - \left( b_L + \frac{L+L_L}{2} \right) \leq z \leq - \left( b_L + \frac{L}{2} \right) \\ - \frac{1}{2L^2} \left( z - \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} & - \frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2} \\ \frac{2}{L_R^2} \left( z - \left( b_R + \frac{L+L_R}{2} \right) \right)^2 & \left( b_R + \frac{L}{2} \right) \leq z \leq \left( b_R + L_R + \frac{L}{2} \right) \\ 1 & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad [5.3]$$

Burada potansiyel yükseklikleri, GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapıları için sırasıyla  $V_0 = 112$  meV ve  $V_0 = 138$  meV'dir.

Şekil 5.9'da GaAlAs/GaAs yapısı ve Şekil 5.10'da GaInAs/GaAs yapısı için farklı  $b_L$  ve  $b_R$  kalınlıklarında asimetrik üçlü kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve ilk üç bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları gösterilmektedir. Kuyular arasında engel varken ve yokken, taban durumdaki elektron tamamen sağ kuyuya yerleşmiştir ve engel kalınlıklarının değişiminden hemen hemen etkilenmez. Engel yokken, ikinci durumdaki elektronlar sol ve orta kuyu arasında, üçüncü durumda ise çoğunlukla sol kuyuda kuşatılmıştır. Sabit  $b_L = 3$  nm değeri için, hem  $b_R = 3$  nm hem de  $b_R = 8$  nm kalınlıklarında tüm enerji durumlarındaki elektronlar benzer davranış göstermektedir. Fakat  $b_R = 3$  nm sabit değeri için,  $b_L$  kalınlığının artmasıyla ikinci ve üçüncü durumlar büyük değişim gösterir. İnce bir engel kalınlığı ( $b_L = 3$  nm) için sol ve orta kuyular arasında tünelleme yoluyla etkileşim fazladır ve enerji seviyeleri arasındaki fark büyüktür. Oysa büyük bir engel kalınlığında ( $b_L = 8$  nm), kuyular arasındaki etkileşim azalır, enerji seviyeleri birbirine yaklaşır ve kuyular bağımsız tek kuantum kuyusu gibi davranır.



**Şekil 5.9** GaAlAs/GaAs yapısı için a)  $b_L = 0$  ;  $b_R = 0$ , b)  $b_L = 3\text{nm}$  ;  $b_R = 3\text{nm}$ , c)  $b_L = 3\text{nm}$  ;  $b_R = 8\text{nm}$ , d)  $b_L = 8\text{nm}$  ;  $b_R = 3\text{nm}$  kalınlıklarında asimetrik üçlü kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve ilk üç bağlı enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları

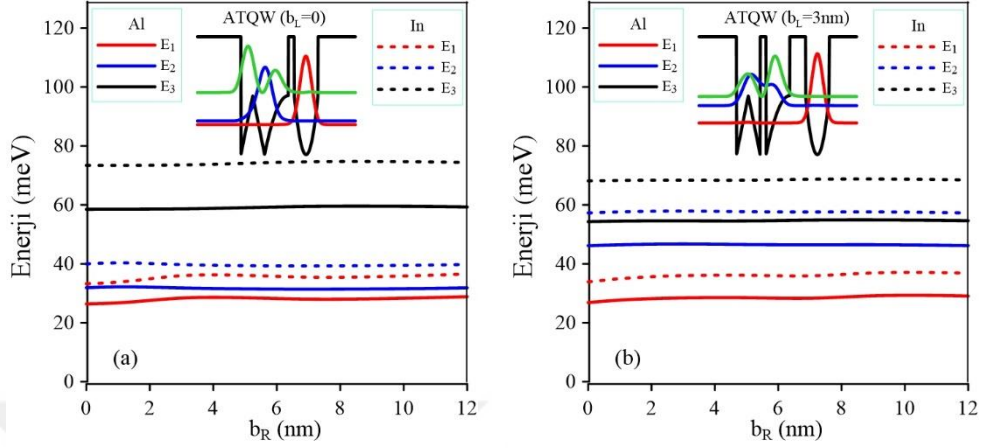


**Şekil 5.10** GaInAs/GaAs yapısı için a)  $b_L = 0$  ;  $b_R = 0$ , b)  $b_L = 3\text{nm}$  ;  $b_R = 3\text{nm}$ , c)  $b_L = 3\text{nm}$  ;  $b_R = 8\text{nm}$ , d)  $b_L = 8\text{nm}$  ;  $b_R = 3\text{nm}$  kalınlıklarında asimetrik üçlü kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli ve ilk üç bağlı durum enerji seviyelerindeki elektronun olasılık yoğunlukları

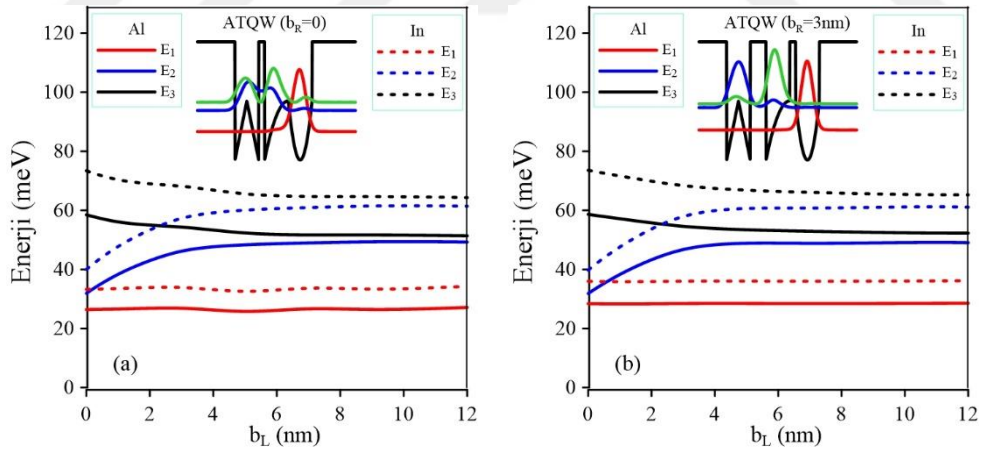
Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısını ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısını göstermek üzere,  $b_L = 0$  ve  $b_L = 3\text{nm}$  değerleri için  $b_R$  sağ engel kalınlığına bağlı olarak ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi Şekil 5.11’de verilmiştir. Buradan da görülüyor ki, taban durum tamamen sağ kuyuda yerleştiği için sağ engel kalınlığının değişimi, enerji seviyelerinde belirgin bir değişim yaratmamıştır. Şekil 5.12’de ise,  $b_R = 0$  ve  $b_R = 3\text{nm}$  değerleri için  $b_L$  sol engel kalınlığına karşılık bu üç enerji seviyesinin değişimi gösterilmiştir. Hem  $b_R = 0$  hem de  $b_R = 3\text{nm}$  için  $b_L$  kalınlığının artmasıyla, taban durum enerji seviyesinde belirgin bir değişim olmadığı, ikinci enerji seviyesi artarken üçüncü enerji seviyesinin azaldığı görülmektedir. Kuyu şekilleri farklı olduğu için bu enerjiler birbirine yaklaşır, fakat aynı seviyeye gelmezler.  $b_R = 0$  ve  $b_R = 3\text{nm}$  kalınlıklarında sol ve orta kuyuların birbirinden yalıtılmış tek bir kuantum kuyusu gibi davranması için sırasıyla  $b_L > 6\text{nm}$  and  $b_L > 5\text{nm}$  olması gereklidir.

GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için x-ekseninde  $b_L$  parametresi ve y-ekseninde  $b_R$  parametresinin değişimine karşılık ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi Şekil 5.13’de sunulmuştur. GaAlAs/GaAs yapısının enerji seviyeleri, GaInAs/GaAs yapısına kıyasla daha düşüktür. Tüm enerji seviyeleri  $b_R$  kalınlığının değişiminden çok az etkilenmektedir.  $b_L$ ’nin artmasıyla birlikte her iki yapıda da en büyük değişim ikinci enerji seviyesinde gözlemlenmiştir. Sol ve orta kuyularda kuşatılmış enerji seviyeleri arasındaki etkileşim, bu kuyular arasındaki engel kalınlığı arttıkça düşer.  $b_L$  değerinin artmasıyla kuyular arasında tünelleme azalır ve her biri bağımsız tek kuyu gibi hareket eder.

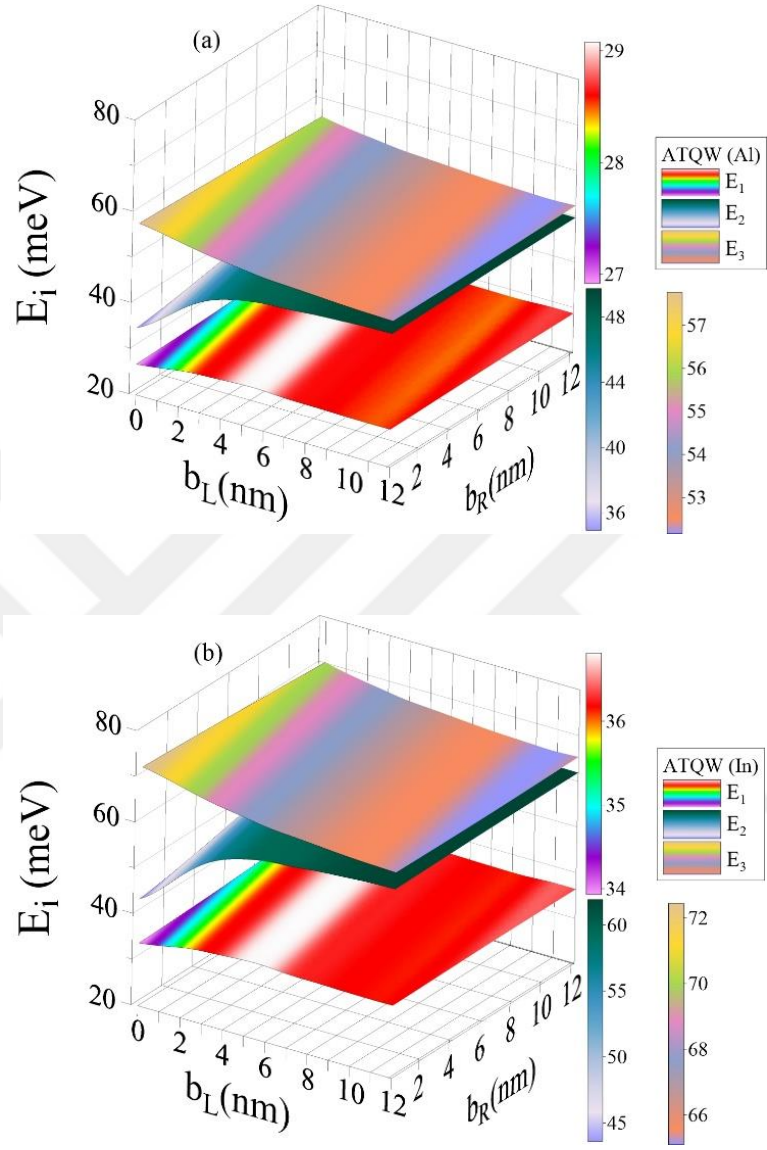
Hem  $b_L$  ve hem de  $b_R$  kalınlığının değişiminin fonksiyonu olarak GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için taban, ikinci ve üçüncü durum enerji seviyelerindeki elektronların sol, orta ve sağ kuyuda bulunma olasılıkları Şekil 5.14’de sergilenmiştir. İki yapı arasındaki farklar, renk ölçeklerinden daha net anlaşılmaktadır. Küçük engel kalınlıklarında ( $b_L \leq 1\text{nm}$ ,  $b_R \leq 1\text{nm}$ ) taban durumdaki elektron az miktar da olsa orta kuyuda bulunurken, engel kalınlıkları arttıkça tamamen sağ kuyuya yerleşir. İkinci seviyedeki elektronlar, engeller yokken sol ve orta kuyuya hemen hemen eşit oranda yerleşirler, fakat bu kalınlıkların artmasıyla daha çok sol kuyuda bulunurlar. Engeller yokken çoğunlukla sol kuyuda bulunan üçüncü durumdaki elektronlar ise, engel kalınlıklarının artmasıyla orta kuyuya geçmektedirler.



**Şekil 5.11** a)  $b_L = 0$  ve b)  $b_L = 3\text{nm}$  için sağ engel kalınlığına bağlı olarak ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.)



**Şekil 5.12** a)  $b_R = 0$  ve b)  $b_R = 3\text{nm}$  için sol engel kalınlığına bağlı olarak ATQW sisteminde ilk üç enerji seviyesinin değişimi (Sürekli eğriler GaAlAs/GaAs yapısı ve kesikli eğriler GaInAs/GaAs yapısı içindir.)



**Şekil 5.13** a) GaAlAs/GaAs yapısı, b) GaInAs/GaAs yapısı için x-ekseninde  $b_L$  parametresi ve y-ekseninde  $b_R$  parametresinin değişimine karşılık sistemde ilk üç enerji seviyesinin değişimi

**Çizelge 5.1** GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapısı için farklı engel kalınlıkları için asimetrik üçlü kuantum kuyularında ilk üç seviye arasındaki enerji farkları (meV biriminde)

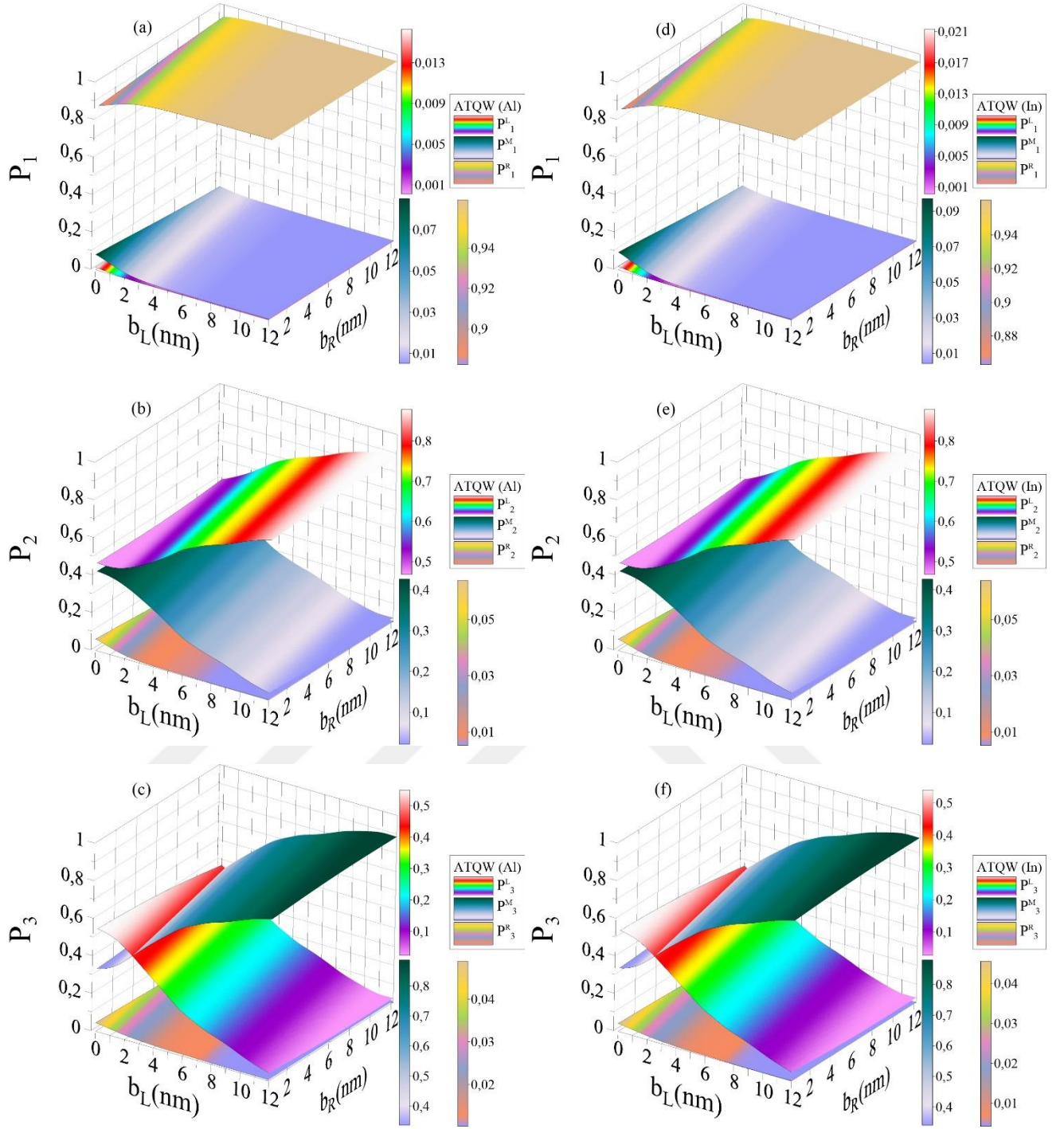
Yapı	$b_L = 0$						$b_L = 3\text{nm}$					
	$b_R = 0$			$b_R = 3\text{nm}$			$b_R = 0$			$b_R = 3\text{nm}$		
	$E_{21}$	$E_{32}$	$E_{31}$	$E_{21}$	$E_{32}$	$E_{31}$	$E_{21}$	$E_{32}$	$E_{31}$	$E_{21}$	$E_{32}$	$E_{31}$
<b>GaAlAs/GaAs</b>	5.49	26.6	32.1	3.44	26.8	30.3	19.3	8.16	27.5	18.3	7.88	26.2
<b>GaInAs/GaAs</b>	6.76	33.4	40.1	3.82	33.8	37.6	23.4	10.9	34.3	21.9	10.5	32.4

İki yapı karşılaştırılırsa, GaAlAs/GaAs yapısının taban durum enerji seviyesindeki elektronun sağ kuyuda bulunma olasılığı, GaInAs/GaAs yapısınınkinden daha fazla olduğu renk skalasından da görülebilir.

Hem GaAlAs/GaAs hem de GaInAs/GaAs yapısı için  $b_L = 0$  ve  $b_L = 3\text{ nm}$  ile  $b_R = 0$  ve  $b_R = 3\text{ nm}$  değerlerinde asimetrik üçlü kuantum kuyuları için ilk üç seviye arasındaki enerji farkları Çizelge 5.1’de verilmektedir. Bu çizelgeden de görüldüğü gibi, her iki yapıda da  $b_L = 0$  ve  $b_R = 0$  için  $E_{21}$  değeri  $b_L = 3\text{ nm}$  ve  $b_R = 3\text{ nm}$  kalınlıklarına göre daha küçüktür. Oysa aynı engel kalınlıklarında  $E_{32}$  ve  $E_{31}$  değerleri  $E_{21}$ ’in aksine davranış göstermektedir. Engel kalınlığına bağlı olarak GaAlAs/GaAs yapısının enerji seviyeleri arasındaki fark, GaInAs/GaAs yapısına göre daha azdır.

Engel kalınlıklarına sahip enerji spektrumu değişimi, bantlar ve altbantlar arası geçişlere dayanan optik sistemlerde yeni bir serbestlik derecesi verir ve uygulama alanlarında önemli bir avantaj sağlar. Huang ve Manasreh tarafından yapılan ilgi çekici bir uygulama ise, sabit bir ön-gerilimleme ile çalışan ve üçlü kuantum kuyularıyla tasarlanan üç renkli kızılötesi fotodedektörün üretilmesidir [80].

Bu çalışma, “Electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on barrier widths” başlıklı makale haline getirilmiş olup, dergilere gönderilme aşamasındadır.



**Şekil 5.14** x-ekseninde  $b_L$  parametresi ve y-ekseninde  $b_R$  parametresinin değişimine karşılık, GaAlAs/GaAs yapısı için a) taban durum, b) ikinci durum, c) üçüncü durum ve GaInAs/GaAs yapısı için d) taban durum, e) ikinci durum, f) üçüncü durum enerji seviyelerindeki elektronların sol, orta ve sağ kuyuda bulunma olasılıkları



## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Geliştirilen sistemlerde nano boyutlara gidildikçe (yani kuşatma arttıkça) fiziksel özellikleri belirleyen parametreler ayarlanabilir duruma gelmektedir. Düşük boyutlu sistemlerde yük taşıyıcılarının yoğunluğu geniş bir dilimde istenildiği biçimde değiştirilebilir. Bu yapılarda son derece dar ve iyi tanımlanmış kesikli enerji düzeylerini elde etmek ve kontrol etmek mümkündür. Bu sayede özel fonksiyonlara sahip çeşitli elektronik ve opto-elektronik cihazlar tasarlanabilir. Lazer diyotlar, LED'ler (ışık yayan diyotlar), detektörler, FET'ler (alan etkili transistörler), foto-transistörler ve dalga-kılavuzları (frekans yönlendiriciler) bu cihazlara örnek verilebilir.

GaAs, AlAs ve InAs yarıiletkenlerinin bant aralığının birbirinden farklı olması, Ga, Al ve In oranlarını değiştirerek kuantum kuyulu yapılardaki bant aralıklarının artırılıp azaltılabilesine olanak sağlar. Bu özellikleriyle bu sistemler kuantum kuyulu kızıl ötesi algılayıcılar için verimli ve elverişli malzemeler haline getirilebilir. Son yıllarda epitaksiyel büyütme teknolojisindeki gelişmeler, farklı şekillerde yarıiletken kuantum kuyuları üretme imkânı vermiştir.

Son yıllarda, nano boyutlu yarıiletken sistemlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerine birçok deneysel ve teorik hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda, yeni geliştirilecek aygıtların tasarlanması için, düşük boyutlu yarıiletken sistemlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerine dış elektromanyetik alanların etkilerinin önemli olduğu görülmektedir. Nanoyapılardaki kuşatılmış taşıyıcıların kuantum durumları, elektrik, manyetik, lazer alanları, hidrostatik basınç uygulanarak değiştirilebilir.

Yarıiletkenler günümüzde çoğu elektronik devrenin ve çeşitli düzeneklerin temel yapı elemanlarını oluşturarak, yaşantımız içinde önemli bir yer tutarlar. Birçok elektronik yapı tasarımında, hareketli yüklerin kaynağını sağlamak için kullanılırlar ve yüklerin aktığı, denetlendiği ortamı oluştururlar. Yarıiletken teknoloji alanındaki araştırma ve gelişmeler, minyatürleşme limiti, hız ve opto-elektronik devrelerin entegrasyonu, yarıiletkendeki enerji bant değişimleri, optik soğurma spektrumunda güçlü bozulma, kuantum kuyularında elektron durum yoğunluğunun değişimi ve buna benzer birçok fiziksel olayın açıklanmasına olanak sağlamıştır.

Tasarlanan yeni elektronik devre elemanlarının modellenmesi, sistemlerin ayarlanabilir fiziksel özellikleri temel alınarak yapılmaktadır. Yarıiletkenlerin kristal yapılarının incelenmesi sayesinde yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri belirlenebilmektedir. Bu nedenle bilim adamları çalışmalarını düşük boyutlu yarıiletken malzemelerin elektronik ve optiksel özellikleri üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Gerek savunma sanayinde, gerekse teknolojik önemi bakımından, kızıl ötesi spektrumda çalışabilen opto-elektronik aygıtların tasarlanması ve üretilmesi, ülke ekonomisi bakımından oldukça büyük bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada ilk olarak düşük boyutlu sistemler ve yarıiletkenler hakkında bilgi verildikten sonra, GaAs yarıiletkeni üzerinde büyütülen  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  yapılardan oluşan hem simetrik-asimetrik çift kuantum kuyuları hem de asimetrik üçlü kuantum kuyularının elektronik özellikleri (enerji özdeğer ve özfonksiyonları, olasılık yoğunlukları), sistemin ayarlanabilir fiziksel parametrelerine (kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel kalınlığı) bağlı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;  $Ga_{1-x}In_xAs$  /GaAs yapısının yasak enerji bant genişliği daha küçük olduğu için iletkenlik bandındaki süreksizlik (potansiyel yüksekliği) daha büyüktür. Kuşatılmış potansiyelin yüksek olması ve aynı zamanda elektronun etkin kütlelerinin küçük olması nedeniyle enerji seviyeleri,  $Ga_{1-x}Al_xAs$ /GaAs yapısına kıyasla daha yüksektir. Buna bağlı olarak kuyular içerisinde elektronların bulunma olasılığı da daha azdır. Sonuç olarak,  $Ga_{1-x}Al_xAs$ /GaAs yapısının elektronik özellikleri, sistemdeki yapı parametrelerine  $Ga_{1-x}In_xAs$  /GaAs yapısından daha duyarlıdır.

Potansiyel profilinin değişiminden en fazla taban durum enerji seviyesindeki parçacıklar etkilenmektedir. Bu tez çalışmasında teorik olarak hesaplanan farklı potansiyel profillerine sahip asimetrik çift ve üçlü kuyularda, enerji farklarının (özellikle taban ve ikinci durum enerji seviyesi arasındaki) kuyu genişliği, potansiyel yüksekliği ve engel kalınlığına göre değişimlerine bakıldığında, nümerik olarak 5-40 meV arasında enerji farkı elde edilmiştir. Bu değer ise, elektronun oda sıcaklığındaki termal enerjisine ( $\approx 25$  meV) yakındır. Yani bu sıcaklıklarda çalışan elektronik cihazlar için kabul edilebilir bir değerdir. Teorik olarak tasarlanan potansiyel profillerinin deneysel olarak kontrol edilebilmesi ve tam kesinlikle oluşturulabilmesi oldukça zordur. Bu yüzden büyütülen yarıiletkenlerdeki kuantum kuyuları bu beklenmeyen farklı şekilli profillere yakın olabilir ve bu çalışmadaki teorik verilerle karşılaştırma yapılabilir. Ayrıca, deneysel olarak yarıiletken cihazlarda performans

değerlendirmesi yapmak için çok yüksek enerji farklarına gereksinim vardır. Bu yüzden, hesaplamalarda daha büyük enerji farkları elde etmek için, alaşım oranını artırmak veya kuyu genişliklerini ve engel kalınlıklarını azaltmak gerekir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, potansiyel değişimlerinin ve yük taşıyıcılarının kuşatılmalarının istenildiği oranda değiştirilebilmesine olanak sağlar. Altbantlar arası optiksel soğurmanın yapı parametrelerine bağlılığı, foto dedektörlerde, optiksel modülatörlerde, alan etkili transistörlerde ve elektronların altbantlar arası geçişini temel alan infrared cihazlarda potansiyel değişimleri için önemlidir. Çoklu kuantum kuyuları için elde edilen sonuçlar, optiksel filtre olarak kullanılan malzemelerde, kızılötesi detektörler ve lazerlerde kullanıma açıktır. Kızılötesi detektörler, savunma sanayinde ASELSAN, HAVELSAN gibi Türk Silahlı Kuvvetlerini Güçlendirme Vakfı kuruluşlarınca kullanılmaktadır. Lazerler ise, lazer mesafe bulucu ve lazer hedef noktalayıcı gibi kullanımlarıyla savunma sanayinde önemli bir kullanım alanına sahiptir.

Daha sonraki çalışmalarda, GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs yapılarına dış alanlar (elektrik, manyetik, lazer alanları) ve hidrostatik basınç uygulanarak bu sistemlerin hem elektronik hem de optik özellikleri araştırılabilir.

*Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından M-679 nolu proje olarak desteklenen bu tez kapsamındaki makale ve bildirimler:*

- 1- “The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlığıyla 28/06/2017-30/06/2017 tarihleri arasında 4<sup>th</sup> *International Conference on Materials Science and Nanotechnology For Next Generation* (MSNG-2017) Saraybosna, BOSNA-HERSEK’te *sözlü bildiri* olarak sunulmuş olup, Journal of Molecular Structure 1156 (2018) 726-732 dergisinde *makale* olarak yayımlanmıştır.
- 2- “Depending on Al and In concentration of the electronic properties of asymmetric double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlığıyla 02/05/2018-06/05/2018 tarihleri arasında 4<sup>th</sup> *International Conference on Engineering and Natural Sciences* (ICENS-2018) Kiev, UKRAYNA’da *poster bildiri* olarak sunulmuş olup, ilgili konferansın bildiri kitabında tam metin olarak basım aşamasındadır.
- 3- “Electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on barrier widths” başlığıyla *makale* haline getirilmiş olup, dergilere gönderilme aşamasındadır.
- 4- 04/10/2018-06/10/2018 tarihleri arasında 5<sup>th</sup> *International Conference on Materials Science and Advanced-Nanotechnologies For Next Generation* (MSNG-2018) Cappadocia, TÜRKİYE’de yapılacak olan konferansa “Dependence on well widths of the electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” başlıklı çalışma *sözlü bildiri* şeklinde ve “Electronic characteristics of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on Al and In concentration” başlıklı çalışma da *poster bildiri* şeklinde sunulmak üzere, başvurusu yapılmış ve davet mektubu alınmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Leobandung, E., Guo, L., Chou, S.** (1995). Single hole quantum dot transistors in silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 67, 2338–2340.
- [2] **Jiang, X., Li, S.S., Tidrow, M.Z.** (1999). Study of intersubband transition in quantum dots and quantum dot infrared photodetectors. *Phys. E*, 5, 27–35.
- [3] **Ozturk, E.** (2015). Nonlinear intersubband transitions in different shaped quantum wells under intense laser field. *Superlattices and Microstructures*, 82, 303–312.
- [4] **Niculescu, E., Radu, A., Iorga, A.** (2008). Optical Stark effect in semiconductor quantum wells: a comparative study. *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, 70 (3), 51–58.
- [5] **Karabulut, I.** (2010). Laser field effect on the nonlinear optical properties of a square quantum well under the applied electric field. *Appl. Surf. Sci.*, 256, 7570–7574.
- [6] **Phuc, H.V., Tung, L.V.** (2014). Linear and nonlinear phonon-assisted cyclotron resonances in parabolic quantum well under the applied electric field. *Superlatt. Microstruct.*, 71, 124–133.
- [7] **Ozturk, E.** (2014). Simultaneous effects of the intense laser field and the electric field on the nonlinear optical properties in GaAs/GaAlAs quantum well. *Opt. Commun.*, 332, 136–143.
- [8] **Niculescu, E.C., Eseauu N.** (2011). Interband absorption in square and semiparabolic near-surface quantum wells under intense laser field. *Eur. Phys. J. B*, 79, 313–319.
- [9] **Wang, Z.P., Liang, X.X., Wang, X.** (2007). Polaron effects on excitons in parabolic quantum wells: fractional-dimension variational approach. *Eur. Phys. J. B*, 59, 41–46.
- [10] **Ozturk, E., Sokmen, I.** (2014). Nonlinear intersubband transitions in a parabolic and an inverse parabolic quantum well under applied magnetic field. *J. Lumin.*, 145, 387–392.
- [11] **Ozturk, E.** (2016). Electric and intense laser field effect on the electronic properties of Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs and Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As/GaAs semi-parabolic quantum wells. *Laser Physics*, 26, 096102–096110.
- [12] **Zhang, L., Xie, H.J.** (2003). Electric field effect on the second-order nonlinear optical properties of parabolic and semiparabolic quantum wells. *Phys. Rev. B*, 68, 235315.
- [13] **Karimi, M.J., Keshavarz, A.** (2012). Second harmonic generation in asymmetric double semi-parabolic quantum wells: Effects of electric and magnetic fields, hydrostatic pressure and temperature. *Physica E*, 44, 1900–1904.
- [14] **Ozturk, E.** (2010). Nonlinear optical absorption in graded quantum wells modulated by electric field and intense laser field. *Eur. Phys. J. B*, 75, 197–203.
- [15] **Fulco, U.L., Albuquerque, E.L., Mauriz, P.W., Vasconcelos, M.S.** (2013). Optical gain spectra of unstrained graded GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum well laser *Phys. Lett. A*, 377, 582–586.
- [16] **Niculescu, E.C., Radu, A., Stafe, M.** (2009). Laser effects on the donor states in V-shaped and inverse V-shaped quantum wells. *Superlatt. Microstruct.*, 46, 443–450.
- [17] **Chen, W.Q., Wang, S.M., Andersson, T.G., Thordson, J.T.** (1993). Inverse parabolic quantum wells grown by molecular-beam epitaxy using digital and analog techniques. *Phys. Rev. B*, 48, 14264.
- [18] **Kirstaedter, N., Schmidt, O.G., Ledentsov, N.N., Bimberg, D., Ustinov, V.M., Egorov A. Yu., Zhukov, A.E., Maximov, M.V., Kopev, P.S., Alferov, Z.I.** (1996). Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1226.

- [19] **Demir, I., Elagoz, S.** (2017). V/III ratio effects on high quality InAlAs for quantum cascade laser structures. *Superlattice Microst.*, 104, 140-148.
- [20] **Demir, I., Altuntas, I., Bulut, B., Ezzedini, M., Ergun, Y., Elagoz, S.** (2018). Comprehensive growth and characterization study on highly n-doped InGaAs as a contact layer for quantum cascade laser. *Semicond.Sci.Technol.*, 33, 055005.
- [21] **Yuen, S.Y.** (1983). Fast relaxing absorptive nonlinear refraction in superlattices. *Appl. Phys. Lett.*, 43, 813.
- [22] **Santiago, R.B., Guimaraes, L.G.** (2002). Extended eigenfunctions in asymmetric double triangular quantum wells in weak electric fields. *Solid State Electronics*, 46, 89-96.
- [23] **Ahn, H. S., Yamaguchi, M., Kidokoro, T., Sawaki, N., Suzuki, T., Hara, K.** (1997). Optical nonlinearity in a GaAs/AlGaAs asymmetric triple-quantum-well structure. *Semicond.Sci.Technol.*, 12, 722.
- [24] **Betancourt-Riera, R., Rosas, R., Marin-Enriquez, I., Riera, R., Marin, J. L.** (2005). Electron Raman scattering in asymmetrical multiple quantum wells. *J. Phys.: Condens. Matter*, 17, 4451-4461.
- [25] **Liu, D.-F.** (2011). Terahertz lasers based on optically pumped four-level asymmetrical double quantum wells. *Physica E*, 43, 1445-1448.
- [26] **Khurgin, J.B., Sun, G., Friedman, L.R., Soref, R.A.** (1995). Comparative analysis of optically pumped intersubband lasers and intersubband Raman oscillators. *J. Appl. Phys.*, 78, 7398.
- [27] **Liu, A.S., Ning, C.Z.** (1999). Terahertz optical gain based on intersubband transitions in optically pumped semiconductor quantum wells: Coherent pump-probe interactions. *Appl. Phys. Lett.*, 75, 1207.
- [28] **Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D.L., Hutchinson, A.L., Cho, A.Y.** (1995). Continuous wave operation of a vertical transition quantum cascade laser above T=80 K. *Appl. Phys. Lett.*, 67, 3057.
- [29] **Gauthier-Lafaye, O., Boucaud, P., Julien, F.H., Sauvage, S., Cabaret, S., Lourtioz, J.M., Thierry-Mieg, V., Planel, R.** (1997). Long-wavelength ( $\approx 15.5 \mu\text{m}$ ) unipolar semiconductor laser in GaAs quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 71, 3619.
- [30] **Levine, B. F., Choi, K. K., Bethea, C. G., Walker, J., Malik, R. J.** (1987). New  $10 \mu\text{m}$  infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices. *Appl. Phys. Lett.*, 50, 1092.
- [31] **Faist, J., Capasso, F., Sivco, D.L., Sirtori, C., Hutchinson, A.L., Cho, A.Y.** (1994). Quantum Cascade Laser, *Science*, 264, 553-556.
- [32] **Zhao, G. J., Liang, X. X., Ban, S. L.** (2003). Binding energies of donors in quantum wells under hydrostatic pressure. *Phys. Lett. A*, 319, 191-197.
- [33] **Ozturk, E.** (2017). Depending on the electric and magnetic field of the linear optical absorption and rectification coefficient in triple quantum well. *Optical and Quantum Electronics*, 49, 270.
- [34] **Raigoza, N., Morales, A. L., Duque, C. A.** (2005). Effects of hydrostatic pressure on donor states in symmetrical GaAs-Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As double quantum wells. *Physica B*, 363, 262-270.
- [35] **Ozturk, E., Sokmen, I.** (2015). Resonant peaks of the linear optical absorption and rectification coefficients in GaAs/GaAlAs quantum well: combined effects of intense laser, electric and magnetic fields. *Int. J. Mod. Phys. B*, 29, 1550030–1550046.
- [36] **Peter, A. J., Navaneethakrishnan, K.** (2008). Simultaneous effects of pressure and temperature on donors in a GaAlAs/GaAs quantum well. *Superlattice Microst.*, 43, 63-71.

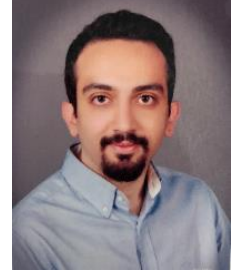
- [37] **Ugan, F., Yesilgul, U., Kasapoglu, E., Sari, H., Sokmen, I.** (2012). The effects of hydrostatic pressure and intense laser field on the linear and nonlinear optical properties of a square quantum well. *Opt. Commun.*, 285, 373–377.
- [38] **Ozturk, E., Sokmen I.** (2013). Nonlinear intersubband absorption and refractive index changes in square and graded quantum well modulated by temperature and hydrostatic pressure. *J. Lumin.*, 134, 42-48.
- [39] **Kasapoglu, E., Duque, C. A., Mora-Ramos, M. E., Restrepo, R. L., Ugan, F., Yesilgul, U., Sari, H., Sokmen I.** (2015). Combined effects of intense laser field, electric and magnetic fields on the nonlinear optical properties of the step-like quantum well. *Materials Chemistry and Physics*, 154, 170-175.
- [40] **Zimmermann, U., Burak, D., Schlaad, K.-H., Klingshirn, C.** (1993). Thermally induced absorptive optical bistability in GaAs/(Al,Ga)As multiple quantum wells. *Semicond. Sci. Technol.*, 8, 1399.
- [41] **Tung, L.V., Vinh, P. T., Phuc, H.V.** (2018). Magneto-optical properties of semi-parabolic plus semi-inverse squared quantum wells. *Physica B*, 539, 117-122.
- [42] **Miller, D.A.B., Chemla, D.S., Damen, T.C., Gossard, A.C., Wiegmann, W., Wood, T.H., Burrus, C.A.** (1984). Band-Edge Electroabsorption in Quantum Well Structures: The Quantum-Confined Stark Effect. *Phys. Rev. Lett.*, 53, 2173.
- [43] **Bhattacharya, P.K.** (1993). Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide. *University of Michigan, USA*, 1-50.
- [44] **Rosenberg, J. J., Benlamri, M., Krircher, P.D., Woodall, J. M. and Petit, G.D.** (1985). An In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As/GaAs pseudomorphic single quantum well HEMT. *IEEE Electron Device Lett*, 6, 491-493.
- [45] **Laidig, W. D., Lin, Y. F. And Caldwell P. J.** (1985). Properties of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-GaAs strained-layer quantum well-heterostructure injection lasers. *J. Appl. Phys.*, 57, 33.
- [46] **Ahn, H.S., Sawaki, N.** (2000). Picosecond response of optical nonlinearity in a GaAs/AlGaAs asymmetric triple quantum well structure, *Solid State Electronics*, 44, 1209-1212.
- [47] **Sari, H., Kasapoglu, E., Sokmen, I.** (2003). Shallow donors in a triple graded quantum well under electric and magnetic field. *Phys. B*, 325, 300–307.
- [48] **Alaydin, B. O., Ozturk, E., Elagoz, S.** (2018). Interband transitions dependent on indium concentration in Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As/GaAs asymmetric triple quantum wells. *International Journal of Modern Physics B*, 32, 1850052.
- [49] **Xiu-Tian, Y., Yongdong. X.** (2010). Chemical Vapour Deposition: An Integrated Engineering Design for Advanced Materials. *Springer*, p.341.
- [50] **Ekinci, H.** (2008). Metal-organik Kimyasal Buharlaştırma Yöntemi ile Kristal Büyütme (MOCVD) Sisteminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [51] **Kınacı, B., Özen, Y., Kızılkaya, K., Asar, T., Çetin, S.Ş., Boyalı, E., Öztürk, M.K., Memmedli, T., Özçelik, S.** (2013). Effect of alloy composition on structural, optical and morphological properties and electrical characteristics of Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P/GaAs structure. *J. Mater. Sci: Mater Electron*, 24, 1375– 1381.
- [52] **Greene, R.L., Bajaj, K.K., Phelps, D.E.** (1984). Energy levels of Wannier excitons in GaAs–Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As quantum-well structures. *Phys. Rev. B*, 29, 1807.
- [53] **Kaputkina, N.E., Lozovik, Yu.E.** (2002). Two-dimensional exciton with spatially-separated carriers in coupled quantum wells in external magnetic field. *Physica E*, 12 323-326.

- [54] **Beltran Rios, C.L., Porrás-Montenegro, N.** (2003). Magnetoexciton states in GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As double quantum wells: The effects of well-width asymmetry. *Phys. Rev. B*, 68, 155316.
- [55] **Yoshioka, T., Asamo, K.** (2012). Classical-quantum crossovers in quasi-one-dimensional electron-hole systems: Exciton-Mott physics and interband optical spectra. *Phys. Rev. B*, 86, 115314.
- [56] **Dvorak, M., Wei, S.H., Wu, Z.** (2013). Origin of the Variation of Exciton Binding Energy in Semiconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 110, 016402.
- [57] **Baser, P., Altuntas, I., Elagöz, S.** (2016). The hydrostatic pressure and temperature effects on hydrogenic impurity binding energies in GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs square quantum well. *Superlattice. Microst.*, 92, 210-216.
- [58] **Radu, A., Niculescu, E.C., Cristea, M.** (2008). Laser dressing effects on the energy spectra in different shaped quantum wells under an applied electric field. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 10, 2555.
- [59] **Karabulut, I., Atav, U., Safak, H., Tomak, M.** (2007). Linear and nonlinear intersubband optical absorptions in an asymmetric rectangular quantum well. *Eur. Phys. J. B*, 55, 283–288.
- [60] **Ungan, F., Mora-Ramos, M.E., Duque, C.A., Kasapoglu, E., Sari, H., Sokmen, I.** (2014). Linear and nonlinear optical properties in a double inverse parabolic quantum well under applied electric and magnetic fields. *Superlatt. Microstruct.*, 66, 129–135.
- [61] **Karimi, M.J., Vafaei, H.** (2014). Intense laser field effects on the linear and nonlinear intersubband optical properties in a strained InGaN/GaN quantum well. *Physica B*, 452, 131–135.
- [62] **Ozturk, E.** (2015). Linear and nonlinear optical absorption coefficients and refractive index changes in double parabolic-square quantum well as dependent on intense laser field. *Eur. Phys. J. Plus*, 130, 67-75.
- [63] **Yesilgul, U., Al, E.B., Martínez-Orozco, J.C., Restrepo, R.L., Mora-Ramos, M.E., Duque, C.A., Ungan, F., Kasapoglu, E.** (2016). Linear and nonlinear optical properties in an asymmetric double quantum well under intense laser field: Effects of applied electric and magnetic fields. *Optical Materials*, 58, 107.
- [64] **Niculescu, E.C., Burileanu, L.M., Radu, A.** (2008). Density of impurity states of shallow donors in a quantum well under intense laser field. *Superlatt. Microstruct.*, 44, 173-182.
- [65] **Semaltianos, N.G.** (2002). Photoluminescence studies of GaAs/GaAlAs multiple quantum well heterostructures. *J. Phys. Chem. Solids*, 63, 273-277.
- [66] **Albe, V., Lewis, L.J.** (2001). Optical properties of InAs/InP ultrathin quantum wells. *Physica B*, 301, 233-238.
- [67] **Ozturk, E.** (2016). Nonlinear intersubband transitions in asymmetric double quantum wells as dependent on intense laser field. *Opt. Quant. Electron.*, 48, 269-282.
- [68] **Chen, B., Guo, K.X., Wang, R.Z., Zhang, Z.H., Liu, Z.L.** (2009). Linear and nonlinear intersubband optical absorption in double triangular quantum wells. *Solid State Commun.*, 149, 310-314.
- [69] **Burileanu, L.M., Niculescu, E.C., Eseau, N., Radu A.** (2009). Polarizabilities of shallow donors in inverse V-shaped quantum wells under laser field. *Physica E*, 41, 856-860.
- [70] **Schroder, D.K.** (2006). Semiconductor Material and Device Characterization. *John Willey&Sons Inc., New York, ABD.*
- [71] **Palmer, D.W.** (2006). [www.semiconductors.co.uk](http://www.semiconductors.co.uk), 02.
- [72] **Rizzi, A.** (2001). Private communications.



- [73] **Ozturk, O., Ozturk, E., Elagoz, S.** (2018). The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells. *Journal of Molecular Structure*, 1156, 726-732.
- [74] **Zorrry, Jr., P.S.** (1993). Quantum well lasers. *Academic Press, Boston*, p.79.
- [75] **Niculescu, E.C., Eseanu, N., Spandonide, A.** (2015). Laser field effects on the interband transitions in differently shaped quantum wells. *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, 77, 281-292.
- [76] **Ochalski, T.J., Zuk, J., Reginski, K., Bugajski, M.** (1998). Photoreflectance studies of InGaAs/GaAs/AlGaAs single quantum well laser structures. *Acta Physica Polonica A*, 94, 463-467.
- [77] **Harrison, P.** (2000). Quantum Wells, Wires and Dots. *Wiley*, p.92.
- [78] **Yesilgul, U.** (2012). Linear and nonlinear intersubband optical absorption coefficients and refractive index changes in symmetric double semi-V-shaped quantum wells. *J. Lumin.*, 132, 765-773.
- [79] **Keshavarz, A., Karimi, M.J.** (2010). Linear and nonlinear intersubband optical absorption in symmetric double semi-parabolic quantum wells. *Physics Letters A*, 374, 2675-2680.
- [80] **Huang, D., Manasreh, M. O.** (1996). Intersubband transitions in triple-coupled quantum wells for three-colors infrared detectors. *J. Appl. Phys.*, 80, 6045-6049.

## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Ozan ÖZTÜRK
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 10.07.1992
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce (YDS: 78,75) (YÖKDİL: 83.75)
İletişim Adresi	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü 58140 Sivas
E-posta Adresi	ozanozturk@cumhuriyet.edu.tr

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Selçuk Anadolu Lisesi, 2010
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (2011-2015) Diploma notu: 3,03 Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü (Çift Anadal Programı) (2012-2016) Diploma notu: 3,15

### İş Tecrübesi

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Görevlisi, 2016

### Yayınlar

Uluslararası **Ozturk, O., Ozturk, E., Elagoz, S.** (2018). The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells. *Journal of Molecular Structure*, 1156, 726-732.

## **Kongreler ve Bildiriler**

Uluslararası *Sözlü Bildiri*

**Ozturk, O., Ozturk, E., Elagoz, S.** “The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” *4<sup>th</sup> International Conference on Materials Science and Nanotechnology For Next Generation* (MSNG-2017) Saraybosna, BOSNA-HERSEK (28/06/2017-30/06/2017)

*Poster Bildiri*

**Ozturk, O., Ozturk, E., Elagoz, S.** “Depending on Al and In concentration of the electronic properties of asymmetric double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells” *4<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Natural Sciences* (ICENS-2018) Kiev, UKRAYNA (02/05/2018-06/05/2018)

## **Projeler**

113G103, LED Çip Prototipi Geliştirilmesi, 1007 - Kamu, Burslu, Yürürlükte, KAMAG - Kamu Araştırmaları Destek Grubu, ARDEB, 02.08.2013 - 01.02.2018 Araştırmacı.

Üçlü GaAlAs/GaAs ve GaInAs/GaAs Nano Yapıların Elektronik Özellikleri, CÜBAP M-679 Araştırmacı.

## **Sertifikalar, Belgeler ve Etkinlikler**

Sertifikalar *KOSGEB Uygulamalı Girişimcilik Sertifikası*

Belgeler *2011-2012 Güz dönemi Onur Belgesi (Elk.Elektronik Müh.)*

*2011-2012 Bahar dönemi Yüksek Onur Belgesi (Elk.Elektronik Müh.)*

Etkinlikler *TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araçlar (Hidromobil Yarışları)*

*Kocaeli (Temmuz 2014)*

*Nikola Tesla Sempozyumu - İzmir (14 Mayıs 2015)*