



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

**YARIM V-ŞEKİLLİ KUANTUM KUYUSUNUN  
OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SİBEL ALİM  
(20169251004)**

**OPTİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Tez Danışmanı: Prof.Dr.Fatih UNGAN**

**SIVAS  
2019**

Bu tez, 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.



Bütün hakları saklıdır.  
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Sibel ALİM, 2019

Bu tezimi sevgili annem ve babam Hanife DENKTAŞ ve Seyfettin DENKTAŞ'a ve canım kızlarım Zeynep Azra ALİM ve Ayşe Neva ALİM'e ithaf ediyorum.

## 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 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi ya da başka bir üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

01.08.2019

Sibel ALİM

## KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecinde bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen ve bana yol gösterici olan çok değerli danışman hocam Pof. Dr. Fatih UNGAN'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Aynı zamanda yüksek lisans sürecini beraber geçirmiş olduğum, benden yardımlarını esirgemeyen hiç bitmesini istemeyeceğim dostluğunu kazandığım arkadaşım Arife BİLGİN'e çok teşekkür ediyorum. Yüksek lisans sürecim boyunca hep yanımda olan, aldığım tüm kararlara koşulsuz saygı duyan sevgili eşim Dt. Akif ALİM'e ve bu süreç boyunca beni hep destekleyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

## ÖZET

### YARIM V-ŞEKİLLİ KUANTUM KUYUSUNUN OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ

Sibel ALİM

Yüksek Lisans Tezi

Optik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih UNGAN

2019,62+xvi sayfa

Bu tez çalışmasında GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As yarı-V-şekilli tek kuantum kuyusunun doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özellikleri, sistemin ayarlanabilir fiziksel parametreleri ve dışarıdan uygulanan elektrik ve manyetik alanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Sistemin elektronik bant yapısı etkin kütle yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu altbant enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonlarından yararlanarak sistemin doğrusal olmayan optiksel özellikleri kompakt yoğunluk matris yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar foton enerjisinin fonksiyonu olarak sunulup yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kuantum Kuyusu, Bant içi Geçişler, Elektrik ve Manyetik Alan

**ABSTRACT**  
**THE OPTICAL PROPERTIES OF SEMI-V-SHAPED**  
**QUANTUM WELL**

**Sibel ALİM**

**Master of Science Thesis**

**Department of Optics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. FATİH UNGAN**

**2019,62+xvi pages**

In this thesis, the linear and nonlinear optical properties of the GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As semi-V-shaped single quantum well were investigated as a function of the system's adjustable physical parameters and the applied external electric and magnetic field. The electronic band structure of the system was obtained by using the effective mass approximation. The nonlinear optical properties of the system have been calculated by using compact density matrix approach by taking advantage of these subband energy levels and their wave functions. The obtained results are presented and interpreted as a function of photon energy.

**Key Words:** Quantum Well, Intersubband Transitions, Electrical and Magnetic Field.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜRLER.....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2.YARIİLETKENLER.....</b>	<b>3</b>
2.1.Saf (intrinsic) Yarıiletkenler.....	6
2.2.Katkılı Yarıiletkenler.....	6
2.2.1.n-Tipi Yarıiletkenler.....	6
2.2.2.p-tipi Yarıiletkenler.....	8
<b>3.HETEROYAPILAR.....</b>	<b>10</b>
3.1.Düşük Boyutlu Yapılar.....	11
3.1.1Kuantum Kuyuları.....	13
3.1.2 Kuantum Telleri.....	14
3.1.3 Kuantum Noktaları.....	15
<b>4.DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK.....</b>	<b>16</b>
4.1.Kuantum Mekaniğinin Yoğunluk Matris Formalizasyonu.....	16
4.2.Doğrusal ve Üçüncü Dereceden Doğrusal Olmayan Soğurma Katsayıları.....	20
4.3. Doğrusal ve Üçüncü Dereceden Doğrusal Olmayan Kırılma İndis Değişimi.....	21
<b>5. ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARI-V-ŞEKİLLİ</b> <b>GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As TEK KUANTUM KUYUSUNUN ELEKTRONİK</b> <b>ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>23</b>
<b>6.ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARIM V- ŞEKİLLİ</b> <b>GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As TEK KUANTUM KUYUSUNUN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL</b> <b>OLMAYAN OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>37</b>
<b>7.SONUÇ.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>

## ÖZGEÇMİŞ

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Enerji Bant Diyagramları [20].....	3
Şekil 2.2 Mutlak sıfırda saf bir yarıiletkenin elektronik bant yapısı[20].....	4
Şekil 2.3 Saf yarıiletkenlerde yüklerin hareketi ve elektriksel iletim[20].....	5
Şekil 2.4. Si kristalinin P atomu ile katkılanmasının şematik gösterimi[20] .....	7
Şekil 2.5.Donör katkılı yarıiletkenin enerji-bant diyagramı[20] .....	7
Şekil 2.6 Silisyumdaki akseptör katkı atomunun şematik gösterimi[20] .....	8
Şekil 2.7 Akseptör katkılı yarıiletkenin enerji-bant diyagramı[20].....	9
Şekil 3.1Heteroyapının oluşmasının şematik gösterimi .....	10
Şekil 3.2 Düşük boyutlu yapıların şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.3 Yarıiletken bir malzemenin bant yapısı(Manasreh 2015) .....	12
Şekil 3.4 Sonlu kuantum kuyusunun bant yapısı şematik gösterimi[35] .....	13
Şekil 3.5 Kuantum telinin şematik gösterimi[36].....	14
Şekil 3.6 Kuantum nokta yapının şematik gösterimi[36] .....	11
5. ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARI-V-ŞEKİLLİ GaAs/Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As TEK KUANTUM KUYUSUNUN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ.....	23
Şekil 5.1 Yarı-V- şekilli kuantum kuyusunun şematik gösterimi .....	24
Şekil 5.3 Yarım V-şekilli GaAs/Ga <sub>0.7</sub> Al <sub>0.3</sub> As tek kuantum kuyusunun taban durum enerji seviyesi ( <b>E1</b> ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( <b>E2</b> ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının( $\Delta E$ ) kuantum kuyu genişliğine göre değişimi. ....	29
Dış elektrik ve manyetik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga <sub>0.7</sub> Al <sub>0.3</sub> As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, altbant enerji seviyeleri ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesinin kuantum kuyu genişliğine göre değişimi şekil 5.2(a-c) ve 5.3'de gösterilmiştir. Bu şekilden de açıkça görüldüğü üzere kuantum kuyu genişliğinin artması ile birlikte taban durum ve birinci uyarılmış durum enerjileri daha düşük enerji seviyelerine doğru kaymıştır. Bu enerji kaymasının sonucu olarak en düşük iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı da azalmıştır. Ayrıca dar kuantum kuyularındaki taban ve birinci uyarılmış durum dalga fonksiyonlarının bariyer malzemesine doğru sızmaları, geniş kuantum kuyularında tamamen ortadan kalkarak parçacıkların kuantum kuyu malzemesi için de kuşatıldıkları da açıkça bu şekillerden görülmektedir. ....	29
Şekil 5.6 Yarım V şekilli GaAs/Ga <sub>0.7</sub> Al <sub>0.3</sub> As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, en düşük iki altbant enerji seviyesi ve bu enerji değerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesinin yapıya dik doğrultuda uygulanan dört farklı statik manyetik alan değerine [(a)B=0 T,(b) B=5T,(c)B=10,(d)B=15T] göre değişimi. ....	34
Şekil 5.7 Yapıya dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alanın bir fonksiyonu olarak ters V-şekilli GaAs/Ga <sub>0.7</sub> Al <sub>0.3</sub> As tek kuantum kuyusunun taban durum enerji seviyesi	

(**E1**), birinci uyarılmış enerji seviyesi (**E2**) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ ) değişimi..... 36

6.ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARIM V- ŞEKİLLİ GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As TEK KUANTUM KUYUSUNUN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ..... 37

Şekil 6.1 Yarım-V –şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As kuantum kuyusunun farklı kuantum kuyu genişlikleri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak toplam optiksel soğurma katsayısının değişimi..... 39

Şekil 6.2 Yarım –V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısının değişimi. .... 42

Şekil 6.2(a,b,c)'de ilk üç grafikte dış bir statik manyetik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam optiksel soğurma katsayısı üzerine yapının büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alanının etkisi gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 6.2(d)'de ise üç farklı statik elektrik alan değerinin toplam optiksel soğurma katsayısı üzerine olan etkisi sunulmuştur. Bu şekillerden de açıkça görüldüğü gibi statik elektrik alanının değerinin artması ile soğurma pikleri çok az da olsa büyük enerji seviyelerine doğru (maviye-kayma) kaymaktadır. Toplam optik soğurma piklerindeki enerji kaymasının ana nedeni; sistemin büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alan yapının kuşatma potansiyelinde bir bükülmeye neden olarak yük taşıyıcılarını alana zıt yönde sürüklenmesine neden olmasıdır. Böylece ilk iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı küçükte olsa bir artış gösterir. Bu enerji farkındaki artış soğurma pikinin büyük enerjilere doğru kaymasına neden olur. Soğurma pikinin maksimum yüksekliğindeki bir miktarda olsa azalış nedeni ise doğrusal, doğrusal olmayan optik özelliklerini hesapladığımız denklemlerdeki dipol matris elemanlarının büyüklüklerinden kaynaklanmaktadır..... 43

Şekil 6.3 Yarı V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı statik manyetik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısının değişimi. .... 45

Şekil 6.4 Yarım V şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun farklı kuyu genişliklerine karşılık gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak kırılma indisinin değişimi..... 48

Şekil 6.5 Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As kuantum kuyusu üzerine büyütme doğrultusunda uygulanan üç farklı statik elektrik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak bağlı kırılma indisinin değişimi..... 51

Şekil 6.6 Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı statik manyetik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimi. .... 54

Şeki 6.6(a,b,c)'deki ilk üç grafik dış bir statik elektrik alan olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik uygulanan üç farklı manyetik alan büyüklüğü (B=0,B=5T,B=10T) için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam bağıl kırılma indisinin değişimleri, şekil 6.6(d)'deki son grafikte ise yapının büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı manyetik alan değeri için toplam bağıl kırılma indisi değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.6(a,b,c)'de görüldüğü gibi yapıya uygulanan statik manyetik alan değeri büyütüldüğünde doğrusal olmayan optiksel kırılma indisinin gittikçe küçüldüğü görülmektedir. Buna bağlı olarak da toplam optiksel kırılma indisiiyle doğrusal optiksel kırılma indisi arasındaki büyüklük farkı azalmaktadır. Şekil 6.6(d)'de ise statik manyetik alan büyüklüğünün artırılması ile toplam optiksel kırılma indisinin genliğinin azaldığı ve tepe pozisyonlarının büyük enerjilere doğru (maviye\_ kayma) kaydığı görülmektedir. Bu pik pozisyonlarındaki genlik küçülmesi ve yüksek enerjilere doğru koymasının fiziksel nedeni optiksel soğurma katsayısının değişiminde açıklanmıştır..... 55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1</b> Bazı yarıiletkenlerin yasak bant aralığı değerleri [18] .....	5
<b>Çizelge 3.1</b> Düşük boyutlu yapıların serbestlik derecesi sınırlama doğrultu sayıları .....	12



## SİMGELER DİZİNİ

<b>N</b>	Azot
<b>Sb</b>	Antimuan
<b>Ar</b>	Arsenik
<b>P</b>	Fosfor
<b>Ge</b>	Germanyum
<b>Si</b>	Silisyum
<b>Be</b>	Berilyum
<b>Ga</b>	Galyum
<b>In</b>	İndiyum
<b>Se</b>	Selenyum
<b>Cu<sub>2</sub>O</b>	Bakır oksit
<b>GaAs</b>	Galyum arsenik
<b>InP</b>	İndiyum fosfor
<b>PbS</b>	Kurşun sülfür
<b>AlAs</b>	Aliminyum Arsenit
<b>GaSb</b>	GalyumAntimon
<b>InAs</b>	İndiyum Arsenit
<b>AlGaAs</b>	Aliminyum Galyum Arsenit
<b>E</b>	Enerji, J
<b>E<sub>d</sub></b>	Donör enerji seviyesi, J
<b>E<sub>a</sub></b>	Akseptör enerji seviyesi, J
<b>E<sub>g</sub></b>	Yasak bant aralığı, J
<b>E<sub>c</sub></b>	İletim bandı sınırındaki enerji değeri, J
<b>E<sub>v</sub></b>	Değerlik bandı sınırındaki enerji değeri, J
<b>ΔE<sub>c</sub></b>	İletim bandı süreksizliği, J
<b>ΔE<sub>v</sub></b>	Değerlik bandı süreksizliği, J
<b>k</b>	Dalga vektörü, $m^{-1}$
<b>ψ<sub>s</sub></b>	Dalga fonksiyonu
<b>ħ</b>	Plank sabiti, J.s
<b>H</b>	Hamiltolyen operatörü, J
<b>V</b>	Kuşatma potansiyeli, J
<b>V<sub>0</sub></b>	Kuşatma potansiyeli büyüklüğü, J
<b>Ĥ<sub>0</sub></b>	Serbest atom hamiltolyeni, J
<b>C<sub>n</sub><sup>s</sup></b>	s seviyesinde olduğu bilinen bir atomun, t zamanında n'inci enerji

	seviyesinde bulunma olasılık genliği
$U_n$	Enerji özdeğer çözümü,J
$\delta_n$	Sonsuz kuantum kuyusunun öz fonksiyonlarındaki tek ve çift özdeğerlere karşılık gelen faz farkı
$\mu$	Malzemenin manyetik geçirgenliği,H.m-1
$\epsilon$	Elektriksel geçirgenlik $m^{-1}$
$\sigma_V$	Taban durum elektron yoğunluğu
$E_{10}$	Birinci enerji özdeğeri ile taban enerji özdeğerinin farkı, J
$n_r$	Reel kırılma indisi
$c$	Işığın boşluktaki hızı ,m/s
$I$	Uygulanan ışığın şiddeti
$\Delta n(w)$	Kırılma indisindeki değişim
$L$	Kuantum kuyu genişliği,m
$\vec{P}$	Momentum operatörü,kg m s <sup>-1</sup>
$\vec{A}$	Manyetik alan vektör potansiyeli, T.m
$m^*$	Elektronun etkin kütlesi, kg
$e$	Elektron yükü,1.60×10-9
$R$	Rydberg sabiti, J
$\varphi_n(\vec{Z})$	Elektronun z yönündeki hareketini tanımlayan dalga fonksiyonu
$F$	Elektrik alanın büyüklüğu
$B$	Manyetik alanın büyüklüğu
$n$	Baş kuantum sayısı
$E_1$	Taban durum enerji seviyesi,J
$E_2$	Birinci uyarılmış enerji seviyesi, J
$\Delta E$	Enerji farkı,J
$\chi^{(1)}$	Doğrusal alınganlık
$\chi^{(2)}$	İkinci dereceden optiksel alınganlık
$\chi^{(3)}$	Üçüncü dereceden optiksel alınganlık
$P^{(1)}(t)$	Doğrudan polarizasyon yoğunluğu
$P^{(2)}(t)$	İkinci dereceden doğrusal olmayan polarizasyon yoğunluğu
$P^{(3)}(t)$	Üçüncü dereceden doğrusal olmayan polarizasyon yoğunluğu
$\epsilon_0$	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği F m-1
$\rho$	Yoğunluk matris elemanı
$\langle A \rangle$	A operatörünün beklenen değeri
$A_{mn}$	A operatörünün matris elemanları
$P(s)$	Sistemin s seviyesinde bulunma olasılığı
$\Gamma_{nm}$	$ n\rangle$ ve $ m\rangle$ seviyeleri arasındaki düşüş oranı
$\alpha(w)$	Soğurma katsayısı

## KISALTMALAR

<b>0D</b>	:	Sıfır boyut
<b>1D</b>	:	Bir boyut
<b>2D</b>	:	İki boyut
<b>3D</b>	:	Üç boyut
<b>MOCVD</b>	:	Metal organik kimyasal buhar biriktirme
<b>MBE</b>	:	Moleküler ışın epitaksi (Moleküler ışınla kristal büyütme tekniği)



## 1.GİRİŞ

Son yıllarda moleküler ışık epitaksi (MBE), sıvı faz epitaksi, buhar faz epitaksi, moleküler kimyasal buhar depolama (MOCVD) gibi yapay kristal büyütme teknolojisindeki gelişmeler; bize parabolik, yarı-parabolik, ters parabolik, V-şekilli kuşatma potansiyellerine sahip farklı yarıiletken kuantum kuyu sistemlerini üretme imkânı vermiştir. Bu sistemlerin optik ve elektronik özellikleri külçe yapılarına göre oldukça farklı özellikler sergilemektedir. Bu düşük boyutlu yarıiletken yapılar elektronik ve optoelektronik aygıtlardaki potansiyel uygulamaları ve benzersiz fiziksel özellikleri nedeni ile yoğun bir şekilde çalışılmaktadır [1,8].

Yarıiletken kuantum kuyularının doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özellikleri yeni optoelektronik aygıt uygulamaları açısından potansiyel olması nedeni ile birçok araştırma grubu tarafından yoğun bir şekilde incelenmektedir [9,16]. Doğrusal olmayan optiksel özellikler, malzemenin elektronik seviyelerinin lokalizasyonu ile ilişkilidir. Optoelektronik aygıt uygulamalarında kullanılan düşük boyutlu yarıiletken yapıların elektronik ve optiksel özellikleri, genellikle sistemin ayarlanabilir parametreleri (kuyu genişliği, bariyer genişliği vb.) ve dış alanlar (yüksek frekanslı yoğun lazer alanı, statik elektrik ve manyetik alan vb.) ile istenildiği gibi ayarlanabilir. Bu yapıların doğrusal olmayan optiksel özellikleri, uzak kızıl ötesi lazer yükselticileri, foto detektörler ve yüksek hızlı elektro-optik modülatörler gibi aygıt uygulamaları için oldukça önemlidir. Bu düşük boyutlu sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özelliklerinin bilinmesi elektromanyetik bölgenin kızıl ötesi spektrumunda çalışabilen optoelektronik aygıtların tasarlanması için de önemlidir. Tasarlanan elektronik devre elemanlarının modellenmesi, sistemlerin ayarlanabilir fiziksel özellikleri temel alınarak yapılmaktadır.

Yarıiletkenlerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi sayesinde yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri de belirlenmektedir. Bu nedenle bilim insanları çalışmalarını bu düşük boyutlu yarıiletken malzemelerin elektronik ve optiksel özellikleri üzerine yoğunlaştırmışlardır. Gerek savunma sanayisinde gerekse yüksek teknolojik önemi bakımından, kızıl ötesi spektrumda çalışabilen optoelektronik aygıtların tasarlanması ve üretilmesi ülke ekonomisi bakımından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Özellikle savunma sanayinde yansıyıp gelen kızılötesi ışınların görünür hale getirilmesi ile karanlıktaki cisimler de fark edilebilir hale gelmiştir. Geliştirilen bu hassas filmlerle, ışık vermeyen fakat sıcak cisimlerin fotoğraflarını çekmek mümkün olmuştur. Özellikle bu yöntemin askeri sahada kullanılması gün geçtikçe artmaktadır.

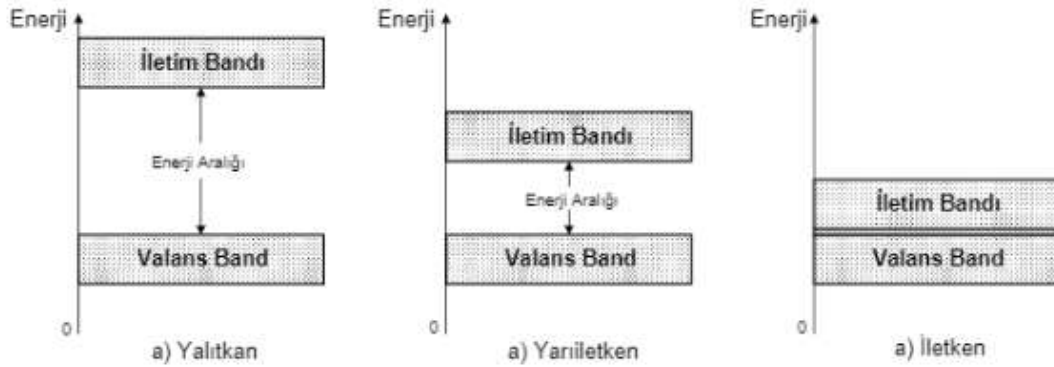
Ayrıca son yıllarda, düşük boyutlu yarı iletken sistemlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerine birçok deneysel ve teorik hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda, yeni geliştirilecek aygıtların tasarlanması için, düşük boyutlu yarıiletken sistemlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerine dış elektromanyetik alanların

etkilerinin de önemli olduğu gör÷lmektedir. Nanoyapılardaki kuşatılmış taşıyıcıların kuantum durumları elektrik, manyetik veya yoğun bir lazer alanı uygulanarak değiştirilebilir. Bu çalışmalar ile yarıiletkendeki enerji bant değişimleri, optik soğurum spektrumunda güçlü bozulma, mikrodalga ışınımı altındaki 2D elektron gazındaki sıfır direnç durumlarının ölç÷lmesi, kuantum kuyularında elektron durum yoğunluğunun değişimi ve buna benzer birçok fiziksel olayın açıklanmasına olanak sağlamıştır.

Yukarıda bahsedilen uygulamalarla alakalı olan bu tez kapsamında GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As yarı-V-şekilli tek kuantum kuyusunun doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özellikleri, ve sistemin ayarlanabilir fiziksel parametreleri dışardan uygulanan statik elektrik ve manyetik alanın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Bu hesaplamalar yapmak için ilk önce statik elektrik ve manyetik alan altındaki GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As yarı-V-şekilli tek kuantum kuyusu için Schrödinger dalga denklemi incelenmiştir. Daha sonra elde edilen bu Schrödinger dalga denklemi etkin kütle yaklaşımı çerçevesinde çözümü yapılarak sistemin enerji özdeğer ve özfonksiyonları hesaplanmıştır. Elde edilen bu enerji özdeğer ve özfonksiyonlarından yararlanılarak, sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar foton enerjisinin fonksiyonu olarak sunulup yorumlanmıştır. Yapılan bu sayısal hesaplamalar için hazır paket programlar ve yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanılmıştır.

## 2.YARIİLETKENLER

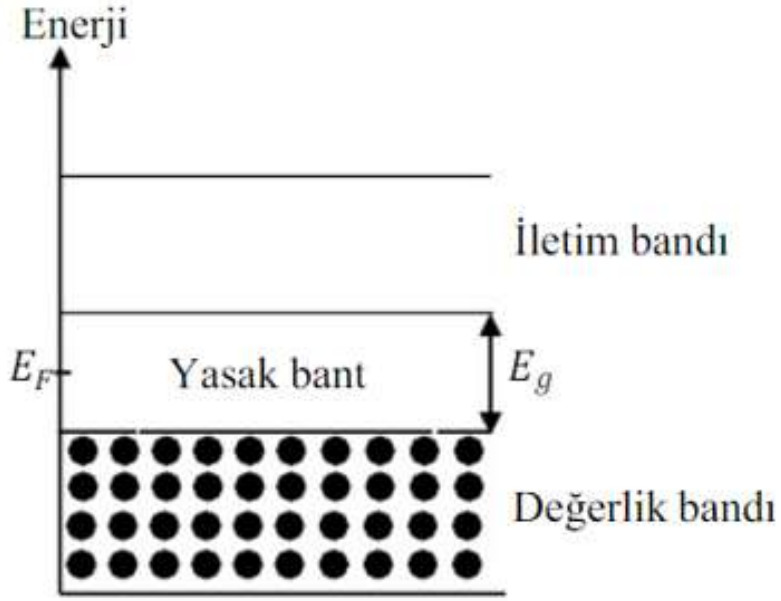
Elektrik akımını bazı özel durumlarda geçiren, bu özel durumlar ortadan kalktığı zaman ise elektrik akımını geçirmeyen malzemelere yarıiletken malzemeler denir. Bunun yanı sıra elektrik akımını geçiren malzemelere iletken, elektrik akımını geçirmeyen malzemeler de yalıtkan malzemeler denilmektedir. Yarıiletken malzemelerin elektriksel iletkenliği (veya yalıtkanlığını) biz kontrol edebilir. Maddelerin elektriksel özellikleri o maddenin elektronik bant yapı ile ilişkilidir.



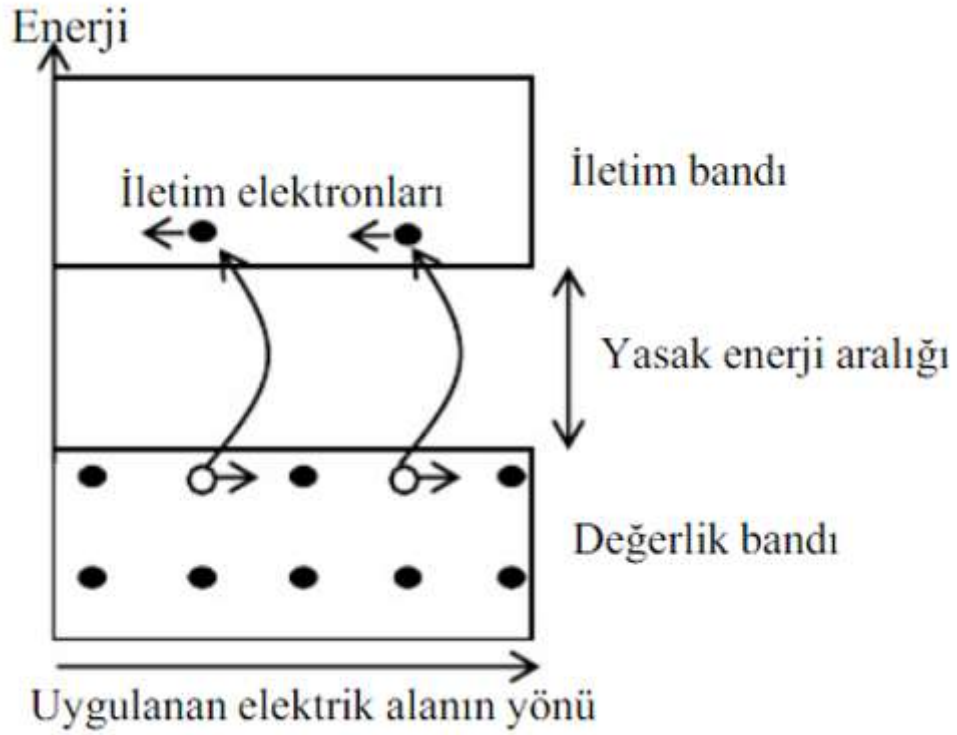
Şekil 2.1 Enerji Bant Diyagramları [20]

Katıların enerji bant yapılarının farklılığı elektrik iletiminde belirleyici bir yer tutar. Mutlak sıfırda şekil 2.2 de görüldüğü üzere yarıiletken malzemenin tüm elektronları değerlik bandındadır. İletim bandında elektron bulunmadığı için yalıtkan gibi davranış sergiler. Ayrıca yarıiletkenlerin en önemli özelliği, elektriksel iletkenliği bakımından iletken ve yalıtkan malzemenin arasında yer alması ve sıcaklığa bağlı olarak elektriksel iletkenliğinin artmasıdır. Şekil 2.3 deki gibi sıcaklığın artması ile değerlik bandındaki elektronlar iletime bandına geçerek geride bıraktıkları boşluklar ile beraber elektriksel iletime katkı sağlarlar. Yarıiletken malzemelere belirli oranlarda safsızlık atomları katılarak taşıma sadece elektron ya da boşluklarla yapılabilir. Yarıiletkenler ile yalıtkanları ayıran en önemli özellik ise yasak enerji bant aralığı değerleridir. Yarıiletkenlerin yasak bant enerji aralıkları genellikle 1-4 eV arasındadır [20]. Bazı yarıiletkenlerin yasak bant aralıkları [18] tablo 2.1 de gösterilmiştir. Yalıtkanların ise yasak enerji bant aralığı değeri bu değerden çok büyüktür. Yalıtkanların yasak bant aralığının çok büyük olması nedeni ile değerlik bandından iletime bandına hiç elektron

geçişini sağlamaktadır. Yarıiletkenlere dışarıdan yapılan bir takım etkilerle (ısı, ışık vb.) değerlilik bandından iletim bandına elektron geçişi mümkün olmaktadır [20].



Şekil 2.2 Mutlak sıfırda saf bir yarıiletkenin elektronik bant yapısı[20]



Şekil 2.3 Saf yarıiletkenlerde yüklerin hareketi ve elektriksel iletim[20]

Çizelge 2.1 Bazı yarıiletkenlerin yasak bant aralığı değerleri [18]

Kristal	$E_g$ (eV)	
	0 K	300 K
Si	1,17	1,14
Ge	0,744	0,67
InP	1,42	1,35
GaP	2,32	2,26
GaAs	1,52	1,43
CdS	2,582	2,42
CdTe	1,607	1,45
ZnO	3,436	3,2
ZnS	3,91	3,6

Yarıiletken yapıları iki temel grupta inceleyebiliriz. Bunlar;

- Saf (intrinsic) yarıiletkenler
- Katkılı yarıiletkenler

### **2.1.Saf (intrinsic) Yarıiletkenler**

Yarıiletkenlerde olması gereken tüm özellikleri taşıyan ideallikteki bir yarıiletkende, örgü kusurları ve yabancı atomlardan oluşan safsızlıklar yoktur. Bu ideallikteki yarıiletkenler saf ya da katkısız yarıiletkendir. Elektron ve boşluk yoğunlukları birbirlerine eşittir [20]. Bu özellikleri taşıyan saf yarıiletkenler elektrik akımı iletimine dâhil olan elektron ve boşluk yoğunluğu az olduğundan elektronik ve optoelektronik aygıt yapımında kullanılması çok tercih edilmez.

### **2.2.Katkılı Yarıiletkenler**

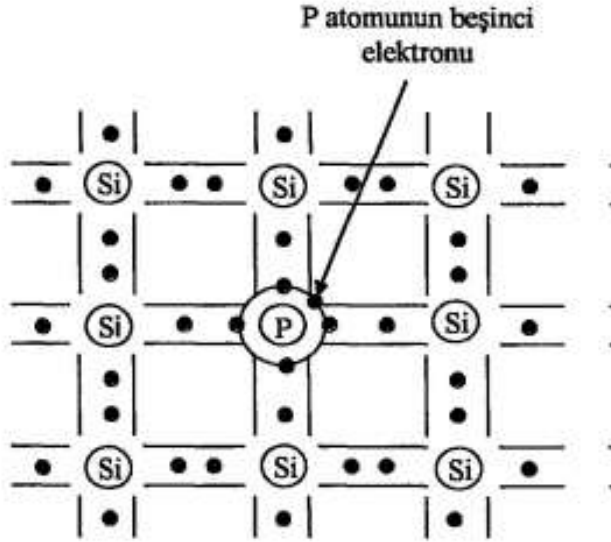
Yarıiletkenlerde elektronlar ve boşluklar olmak üzere iki tip yük taşıyıcısı bulunur. Saf bir yarıiletkenin elektron ve boşluk konsantrasyonları birbirlerine eşittir. Çünkü bir elektron valans bandından iletim bandına herhangi bir uyarılma ile çıkarken geride hep bir boşluk bırakır. Saf yarıiletkenlerin yük taşıyıcı yoğunluğunu artırmak için kullanılan en yaygın yöntem yarıiletken içine ölçülü bir şekilde ayarlanmış safsızlık maddesi katmaktır. Safsızlıkları katma işlemine katkılama denir. Bu katkılama, yarıiletkenlerin elektriksel özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. [22]. Katkılama işlemi yapılırken kullanılan katkı maddeleri verici (donor) veya alıcı (akseptör) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Bu katkı maddeleri ortama bir elektron veriyorsa donor, alıyorsa akseptör adını alır.Katkılı yarıiletkenler, saf yarıiletkenlere bu tür katkılar yapılarak elde edilirler ve eklenen katkı maddesine göre n-tipi ve p-tipi olarak sınıflandırılırlar [21,24]. Katkılama, yarıiletkenlerin yük taşıyıcı yoğunluğunu artırırken aynı zamanda çeşitli elektronik ve optoelektronik devre elemanlarının yapımına da olanak sağlar [22].

#### **2.2.1. n-Tipi Yarıiletkenler**

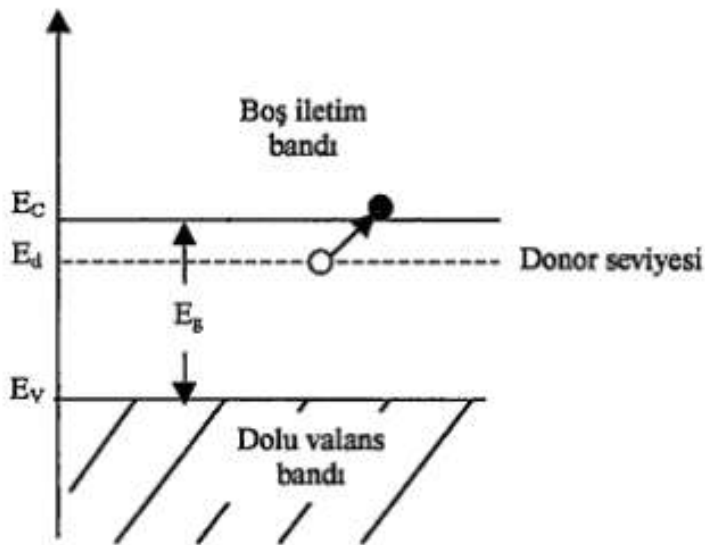
Silisyum (Si) gibi periyodik cetvelin IV-A grubunda yer alan elementlerin değerlilik elektron sayısı dördtür ve her atom kendine komşu dört atomla kovalent bağlıdır. Fosfor (P), arsenik (As) gibi bir katkı atomu örgüdeki normal bir atom ile yer değiştirirse, dört kovalent bağ oluştuktan sonra geriye bir valans elektronu kalır ve böylelikle katkı atomu örgüyü en az bozacak şekilde konmuş olur [22].

Şekil 2.4 te görüldüğü gibi P atomu silisyum kristaline katkılanırsa, Si atomunun dört elektronu ile kovalent bağ oluşturur. P atomu beş elektronu olduğu için bir elektronu boşta kalır. Bu beşinci elektron, P atomuna çokta kuvvetli olmayan bir bağ ile bağlıdır ve kolaylıkla P atomundan ayrılabilir. Sonuç olarak serbest bir elektron gibi davranır ve

oda sıcaklığında iletim bandında yük taşıyıcısı olarak bulunur. Boşta kalan katkı atomlarına donör (verici) adı verilir ve bulunduğu seviyeye de donör enerji seviyesi adı verilir. Bu şekilde oluşan katkı yarıiletkenlere de n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde boşluk yoğunluğu elektron yoğunluğundan daha düşük olur [26].



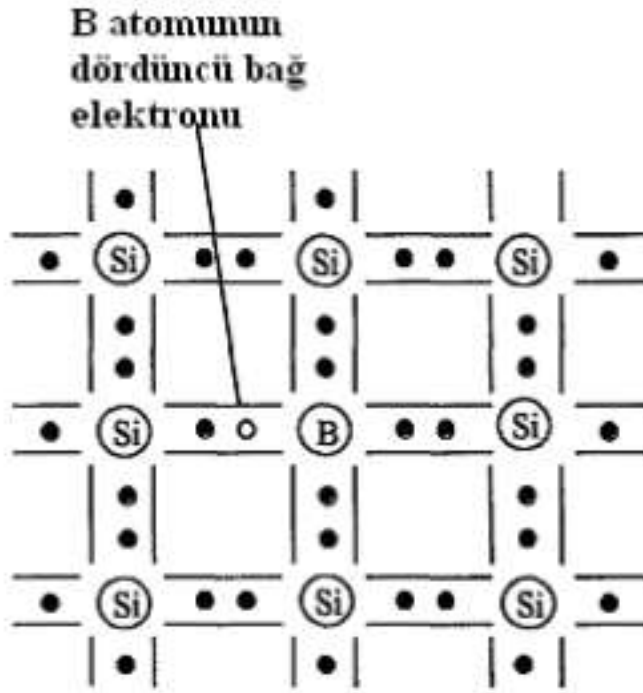
Şekil 2.4. Si kristalinin P atomu ile katılanmasının şematik gösterimi[20]



Şekil:2.5.Donor katkı yarıiletkenin enerji-bant diyagramı[20]

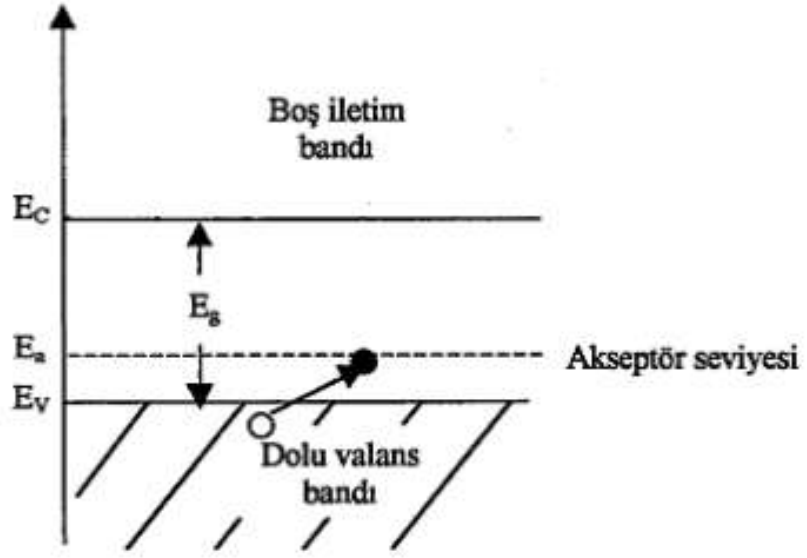
### 2.2.2.p-tipi Yarıiletkenler

Silisyum kristali içinde şekil 2.6 da ki gibi bor (B) atomu katkılanırsa, üç elektrona komşu atomlarla kovalent bağ oluşturur ve son bağda bir elektron eksik kalır. Dörtlü bağı tamamlayabilmek için eksik kalan bu elektron, başka bir atomdan elektron alınarak tamamlanır ve valans bandında bir boşluk (hol) oluşur. Bu boşluk Coulomb potansiyelinin etkisinde safsızlık atomu çevresinde hareket eder ve Coulomb etkileşmesi zayıf olduğu için serbest parçacık gibi davranır. Bor atomu kovalent bağı tamamlayabilmek için bir elektron alır ve bu nedenden bor atomuna alıcı (akseptör) denir ve bulunduğu seviyeye de akseptör enerji seviyesi denir. Bu şekilde oluşan yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir. Bu tip yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan azdır [25].



Şekil:2.6 Silisyumdaki akseptör katkı atomunun şematik gösterimi[20]

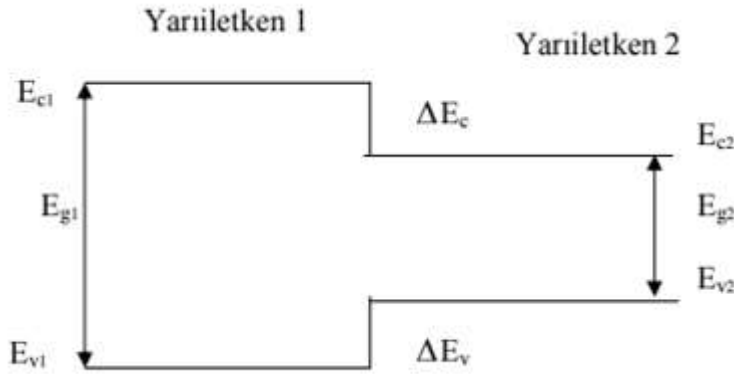




Şekil:2.7 Akseptör katkılı yarıiletkenin enerji-bant diyagramı[20]

### 3.HETEROYAPILAR

MOCVD ve MBE [28] gibi değişik yapay kristal büyütme yöntemleri ile birbirinden farklı iki yarıiletken malzemenin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya heteroyapı denir. Bu heteroyapıyı oluşturan malzemeler hemen hemen benzer özellikler gösterirler. Heteroyapılar, geniş bant aralığına sahip olan yarıiletken malzeme yapı üzerine, dar bant aralığına sahip yarıiletken yapının büyütülmesi ile iletkenlik ve değerlik bantlarındaki taşıyıcılar için potansiyel kuyusu oluştururlar. İki yarıiletken malzemenin ara yüzüne heteroeklem denmektedir [19]. Heteroeklemler heteroyapıların elektronik özelliklerini belirlemede önemli rol oynarlar ve istenilen elektronik ve optik özelliklere sahip cihaz tasarımına olanak sağlar [27]. Heteroyapıyı oluşturan malzemeler benzer özellikleri taşımaları gerekir ve örgü sabitleri arasındaki fark minimum olmalıdır [20]. Örneğin  $Al_{1-x}Ga_xAs$ , içinde barındırdığı  $AlAs$  ve  $GaAs$  yüzdelere bağlı olarak bant aralığı ayarlanabilir [30]. Örgü sabitleri birbirine benzer olan yarıiletkenlerin oluşturduğu heteroyapı sisteminde, eğer temel bant aralığı direkt ise bant süreksizlik profili, kuantum kuyusunu ifade eder. Tek boyutlu potansiyel içinde z-doğrultusu boyunca kuşatılan elektron ve hol, kuşatma doğrultusundaki dik (x-y) düzleminde serbest parçacık durumunda bulunup iki boyutta hareket ediyormuş gibi davranır [17]. Heteroyapı malzemeyi elde etmek için iki yarıiletken malzeme bir araya getirildiğinde Şekil 3.1 deki gibi iletim ve valans bandındaki  $\Delta E_c$  ve  $\Delta E_v$  süreksizlikleri oluşur.



Şekil:3.1.Heteroyapının oluşmasının şematik gösterimi

Bu süreksizlikler:

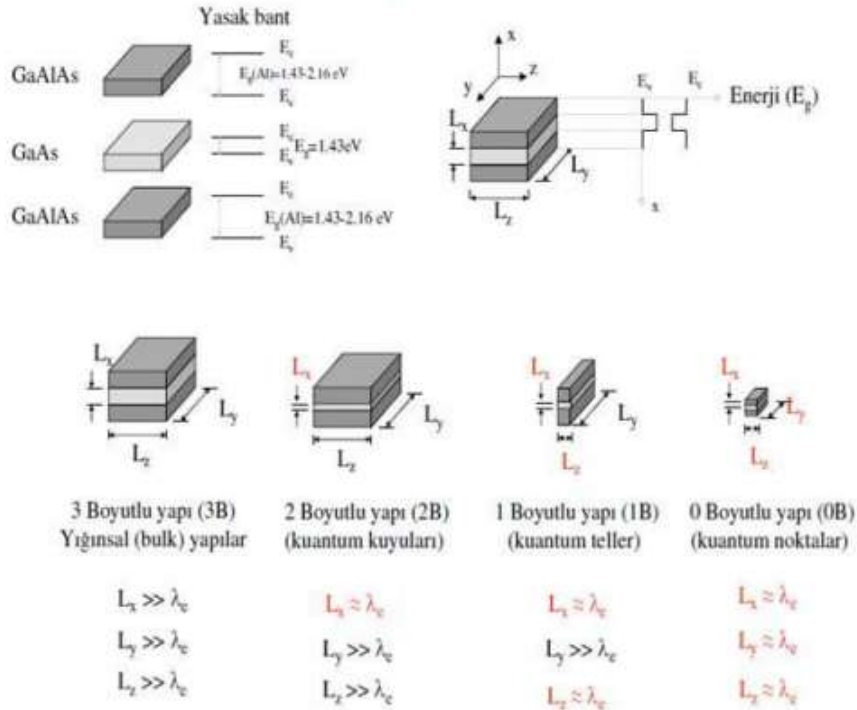
$$\Delta E_c = |E_{g1}^f - E_{g2}^f| - |\Delta E_v| \quad [2.1]$$

$$\Delta E_v = \frac{E_{g1} - E_{g2}}{2} \quad [2.2]$$

şeklinde ifade edilir.  $E_{g1}^f$  ve  $E_{g2}^f$  külçe malzemelerin yasak bant aralıklarıdır. Heteroyapıyı oluşturan yarıiletkenler direkt bant aralıklı ise iletim ve valans bandındaki süreksizlikler yukarıdaki bağıntılar ile hesaplanır. Fakat her iki yarıiletkende indirek bant aralığına sahip ise, iletim bandındaki kesiklik hesaplanırken aynı iletim bandının minimum değerlerinin farkının alınması gerekmektedir. Yani heteroyapıdaki süreklilik koşulunun sağlanması için  $\vec{k}$  dalga vektörleri, külçe bant diyagramlarında aynı olmalıdır [17].

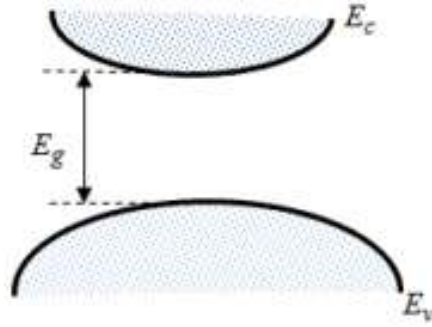
### 3.1. Düşük Boyutlu Yapılar

Günümüzde kullanılan teknolojik aygıtların temelinde düşük boyutlu yapılar yatmaktadır. Bu aygıtlar yarıiletken malzemelerden üretilmektedir. Yarıiletken malzeme kullanılmasındaki en büyük neden ise yük taşıyıcıların ‘elektron ve boşlukların’ kolay kontrol edilebiliyor olmasıdır. Bunun yanı sıra yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluklarının katkılama ile artırılabilmesi yarıiletken malzeme kullanımına avantaj sağlamaktadır [32].



Şekil 3.2 Düşük boyutlu yapıların şematik gösterimi

Ayrıca düşük boyutlu yapılar farklı yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerin üst üste büyütülmesi ile oluşur. Böylece yeni oluşan sistemde elektronların serbestlik hareketini engelleyen potansiyel çukurları oluşur. Oluşan bu potansiyel çukurları taşıyıcıların hareketinin sınırlandırılmasına neden olur. Bu taşıyıcıların bulunduğu tabaka genişliği elektronda de Broglie dalga boyu mertebesinde olduğu için kuantum etkiler gösterir [32].



**Şekil:3.3** Yarıiletken bir malzemenin bant yapısı

Serbestlik derece sayısı  $D_f$ , sınırlama doğrultularının sayısı  $D_s$  ise tüm katıhal sistemleri için

$$D_f + D_s = 3 \quad [2.3]$$

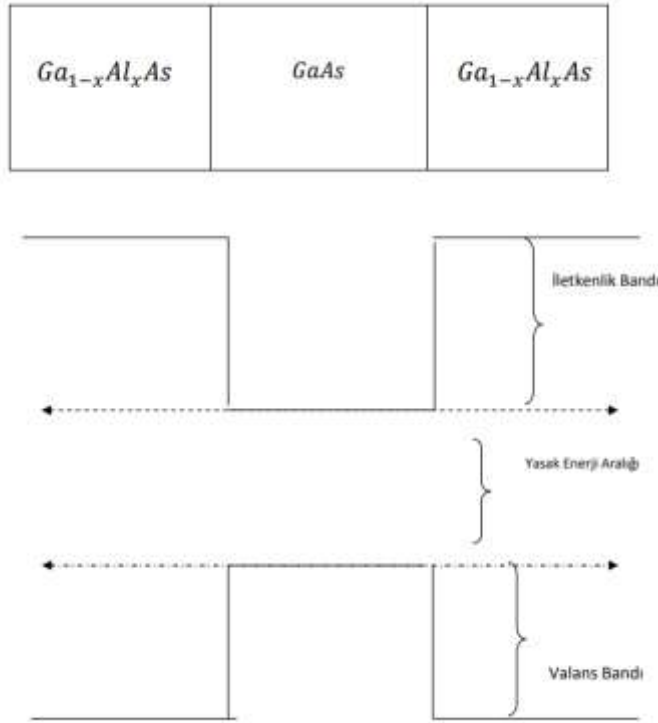
dür. Düşük boyutlu sistemler hareket serbestliği derecesine göre sınıflandırılırlar. Kuantum kuyuları iki boyutlu (2D), Kuantum telleri bir boyutlu (1D) ve kuantum noktaları sıfır boyutlu (0D) dur. Kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları sırası ile iki boyutta, tek boyutta ve sıfır boyutta serbesttirler [32].

**Çizelge 3.1** Düşük boyutlu yapıların serbestlik derecesi sınırlama doğrultu sayıları

Yapılar	$D_c$	$D_f$
Hacimsel (Bulk)	0	3
Kuantum Kuyuları (Well)	1	2
Kuantum Telleri (Wire)	2	1
Kuantum Noktaları (Dot)	3	0

### 3.1.1 Kuantum Kuyuları

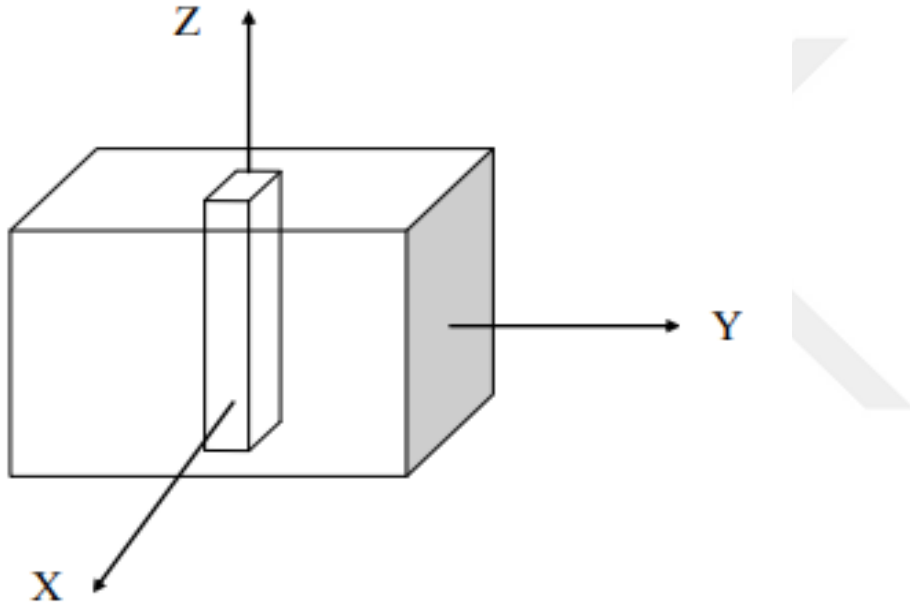
Yük taşıyıcısının bir boyutta sınırlandırılması ile oluşturulan düşük boyutlu yapılar kuantum kuyuları olarak adlandırılır. Bu yapıya GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As örnek gösterilebilir. Bu yapılar yasak enerji bant aralığı büyük olan bir yarıiletken malzemenin içine yasak enerji bant aralığı küçük olan başka bir yarıiletken malzemenin ince bir tabaka halinde yerleştirilip büyütülmesi ile elde edilir. Böylece iki yasak enerji aralığındaki enerji farklarından doğan bir potansiyel kuyusu oluşur. Potansiyel kuyusunda hapsedilen yük taşıyıcıları yapının büyütme doğrultusunda kuantum etkileri altında iken diğer yönlerde serbest hareket ederler. Örnek verilen GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As sisteminde kuantum kuyu malzemesi GaAs'tır. Bu sistemde potansiyel engeli olarak ta Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As kullanılmıştır. Bu yapıdaki 'x' mol kesri olarak adlandırılır ve malzemedeki Al miktarını belirler.(yani potansiyel duvarı yüksekliğini belirler.) [34]



Şekil 3.4 Sonlu kuantum kuyusunun bant yapısının şematik gösterimi [35]

### 3.1.2 Kuantum Telleri

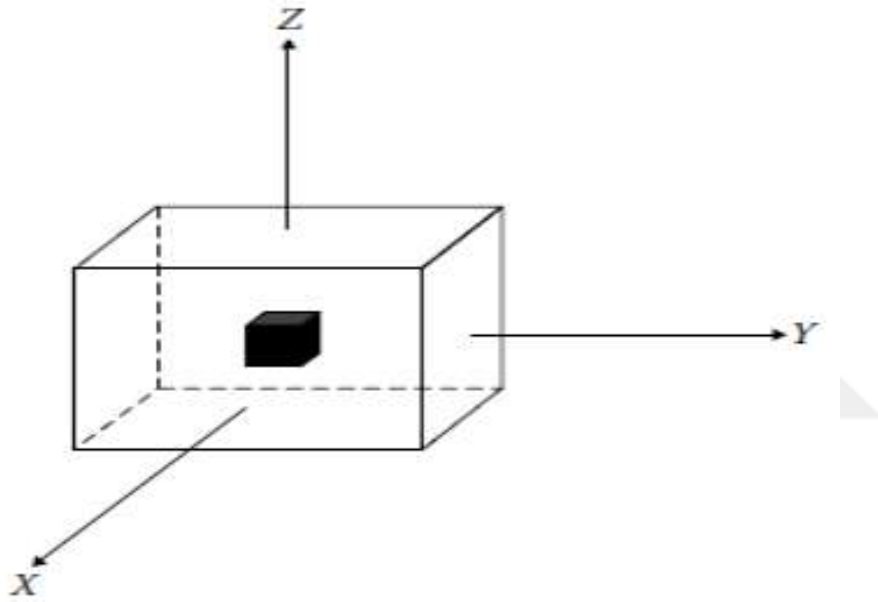
Kuantum tellerindeki serbest yük taşıyıcıların hareketi, iki boyutta kısıtlı ve diğer yönde serbesttir. Elektron iki doğrultuda da potansiyel duvarı ile karşılaşır [36]. Kuantum teli yapısının kuşatılmış enerji seviyelerini hesaplamak için iletim bant diyagramından yararlanır. Kuantum tellerinde taşıyıcılar bir boyutta serbestçe hareket ettikleri ve iki boyutta sınırlandırıldıkları için yapı artık bir boyutlu hale gelmiştir



Şekil3.5 Kuantum telinin şematik gösterimi[36]

### 3.1.3 Kuantum Noktaları

Kuantum nokta yapılar,yük taşıyıcılarının hareketlerinin tüm doğrultularda sınırlı olduğu, hareket serbestliklerinin olmadığı heteroyapılardır. Sistemde her doğrultuda kuantum etkisi vardır [37].



Şekil3.6 Kuantum nokta yapının şematik gösterimi[36]

#### 4. DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK

Bu bölümde optiksel kırılma indisi değişimleri ve soğurma katsayıları formalizasyonu incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken ise kuantum mekaniğinin yoğunluk matris yaklaşımı kullanılmıştır. [20]. Doğrusal olmayan optik, ışığın varlığı ile kullanılan malzemenin optiksel özelliklerinin değişikliği sonucunda meydana gelen sonuçtur [38]. Doğrusal olmayan optik lazerin icadından bu yana ışığın doğasını anlayabilmek adına önemli bir alandır [39]. Doğrusal olmayan optikteki, doğrusal olmaktan uzaklık kavramı, malzemenin uygulanan optiksel alana tepkisinden kaynaklanır. Elektromanyetik alan altındaki bir malzemenin polarizasyon yoğunluğu  $P(t)$  , elektromanyetik tepki cinsinden  $E(t)$

$$P(t) = \chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}(t) \dots \quad [4.1]$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\chi^{(1)}$  doğrusal alınganlık,  $\chi^{(2)}$  ve  $\chi^{(3)}$  ikinci ve üçüncü derecede doğrusal olmayan optiksel alınganlıklardır. Elektromanyetik alan ifadesi

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) = \tilde{E}e^{i\omega t} + \tilde{E}e^{-i\omega t} \quad [4.2]$$

şeklinde zamana bağlı olarak ifade edilirse [32] polarizasyon yoğunluğu şu şekilde olur,

$$\begin{aligned} P(t) &= \epsilon_0 \chi(\omega) \tilde{E}e^{i\omega t} + \epsilon_0 \chi(-\omega) \tilde{E}e^{-i\omega t} \\ &= \frac{1}{V} \text{trace}(\rho M) \end{aligned} \quad [4.3]$$

Burada  $\omega$  gelen dalga'nın frekansı,  $\rho$  yoğunluk matrisi,  $V$  hacim,  $\epsilon_0$  boş uzaydaki elektriksel geçirgenlik, trace ise matrisin diyagonal elementi üzerinden toplamı ifade eden terimdir [41].

##### 4.1. Kuantum Mekaniğinin Yoğunluk Matris Formalizasyonu

Yoğunluk matrisi eşitliğini kullanarak alınganlıklar için farklı hesaplamalar yapılabilir. Kuantum mekaniğindeki bir sistemin bütün fiziksel özellikleri  $\Psi_s(r, t)$  dalga fonksiyonunu içinde barındırır ve Schödinger dalga denklemini sağlar.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_s(r, t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi_s(r, t) \quad [4.4]$$

Denklemden  $\Psi_s(r, t)$  dalga fonksiyonu  $\hat{H}$  ise hamiltonyen operatörüdür.



$$\Psi_s(r, t) = \sum_n C_n^s(t) U_n(r) \quad [4.5]$$

Dalga fonksiyonunun bulunma olasılığına bağlılığı bu şekilde ifade edilebilir.  $C_n^s(t)$  açılım katsayısı olmak üzere

$$i\hbar \sum_n \frac{dC_n^s(t)}{dt} U_n(r) = \sum_n C_n^s(t) \hat{H} U_n(r) \quad [4.6]$$

n. enerji düzeyinde bulunma olasılığı yukarıdaki şekilde yazılabilir.

$$\int U_m^*(r) U_n(r) d^3r = \delta_{mn} \quad [4.7]$$

diklik koşulu olmak üzere;

$$H_{mn} = \int U_m^*(r) \hat{H} U_n(r) d^3r \quad [4.8]$$

olacak şekilde;

$$i\hbar \frac{d}{dt} C_m^s(t) = \sum_n H_{mn} C_n^s(t) \quad [4.9]$$

bulunur.  $\Psi_s(r, t)$  dalga fonksiyonu kullanılarak kuantum mekaniğinden gözlenebilir bir niceliğin beklenen değeri bulunabilir. Sıradan bir gözlenebilir niceliğe A denilirse kuantum mekaniğine göre, buna karşılık gelen bir Hermityen  $\hat{A}$  operatörü yazabilmek gerekmektedir. Bu durumda ise A'nın beklenen değeri:

$$\langle A \rangle = \langle \Psi_s | \hat{A} | \Psi_s \rangle \quad [4.10]$$

olur. Bu ifade ise  $C_n^s(t)$  açılım katsayısına ve A operatörünün matris elemanları ifadesine bağlı olarak

$$A_{mn} = \langle U_m | \hat{A} | U_n \rangle \quad [4.11]$$

$$\langle A \rangle = \sum_{mn} C_m^{s*} C_n^s A_{mn} \quad [4.12]$$

şeklinde tanımlanır. Sistemin başlangıç seviyesinden itibaren durumun gözlenebilirliğinin zamanla değişimi tam olarak bilinebilir. Fakat sistemin tam durumunun bilinmediği zamanlarda olabilir. Bu durumlarda yoğunluk matris formülü kullanılarak istatistiksel tahmini veriler elde edilebilir.

$p(s)$  bir sistemin s durumunda bulunma olasılığını ifade eder.  $p(s)$  bulunma olasılığı klasik mekaniksel varsayım olarak ele alırsak sistemin yoğunluk matris ifadesi şöyle olur:

$$\rho_{nm} = \sum_s p(s) C_m^{s*} C_n^s = \overline{C_m^* C_n} \quad [4.13]$$

istatistiksel olarak durumların ortalaması ise

$$\rho_{nm} = \sum_s p(s) C_m^{s*} C_n^s \quad [4.14]$$

biçiminde yazılır. Yoğunluk matrisi sistemin tam durumunun bilinmediği hallerde beklenen değer kullanılarak istatistiksel olarak olası tüm durumlar üzerinden ortalama alınarak elde edilmektedir.

$$\overline{\langle A \rangle} = \sum_s p(s) \sum_{nm} C_m^{s*} C_n^s A_{mn} \quad [4.15]$$

Bu yukarıdaki denklemden yola çıkılarak [4.14] denklemini de göz önüne alınarak kuantum mekaniksel beklenen değerlerin toplam ortalamasının hesaplandığını gösterir.

Yoğunluk matrisi cinsinden ifade edilecek olursa;

$$\overline{\langle A \rangle} = \sum_{nm} \rho_{nm} A_{mn} = \text{tr}(\hat{\rho} \hat{A}) \quad [4.16]$$

$$\rho_{nm} = \sum_s p(s) C_m^{s*} \quad [4.17]$$

ifadesi elde edilir. Denkleminin zamana göre bir defa türevi alınırsa;

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{nm} = \sum_s \frac{dp(s)}{dt} C_m^{s*} C_n^s \\ + \sum_s p(s) \left[ C_m^{s*} \frac{dC_n^s}{dt} + \frac{dC_m^{s*}}{dt} C_n^s \right] \end{aligned} \quad [4.18]$$

elde edilir. Buradaki

$$\langle \hat{A} \rangle = \text{tr}(\hat{\rho} \hat{A}) \quad [4.19]$$

A'nın beklenen değeridir. Trace operatörü ise

$$\text{tr} \hat{A} = \sum_n A_{nn} \quad [4.20]$$

şeklinde ifade edilir.  $p(s)$  nin zamanla değişmediği düşünülürse denklemdeki birinci ifade kaybolur ve [4.9] denklemindeki olasılık genliğinin zamanla değişimi aşağıdaki denklemde olduğu gibi yazılır.

$$C_m^{s*} \frac{dC_n^s}{dt} = \frac{-i}{\hbar} C_m^{s*} \sum_v H_{nv} C_v^s \quad [4.21]$$

$$C_n^s = \frac{dC_m^{s*}}{dt} = \frac{i}{\hbar} C_n^s \sum_v H_{mv}^* C_v^s = \frac{i}{\hbar} C_n^s \sum_v H_{vm} C_v^{s*} \quad [4.22]$$

Schrödinger denkleminin;

$$\dot{\rho}_{nm} = \sum_s p(s) \frac{i}{\hbar} \sum_v (C_n^s C_v^{s*} H_{vm} - C_m^{s*} C_v^s H_{nv}) \rho \quad [4.23]$$

ifade elde edilir.

Dirac notasyonundan;

$$\langle A \rangle = \langle \psi_s | \hat{A} | \psi_s \rangle = \langle s | \hat{A} | s \rangle \quad [4.24]$$

düzenlemeye gidilirse:

$$\dot{\rho}_{nm} = \frac{i}{\hbar} \sum_v (\rho_{nv} H_{vm} - H_{nv} \rho_{vm}) \quad [4.25]$$

sonucuna varılır. Son bir düzenleme ile;

$$\dot{\rho}_{nm} = \frac{i}{\hbar} (\hat{\rho} \hat{H} - \hat{H} \hat{\rho})_{nm} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}]_{nm} \quad [4.26]$$

halini alır ve

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{\hbar} [\hat{H}_O + \hat{H}_{int}, \hat{\rho}]_{nm} \quad [4.27]$$

Lioville denklemi isminde olan hareket denklemini sağladığı görünür [42,43].

Elde edilen bu denklemle var olan yoğunluk matrisinin zamanla nasıl değiştiğini açıklar. Bunun yanı sıra [4.27] denkleminde dâhil edilemeyen bazı etkileşimlerde vardır. Bu etkileşimler sistemin öz durumlarında bir takım değişimlere sebep olur. Bu değişim ise  $dp(s)/dt \neq 0$  olacak şekilde olup sistemi nasıl etkilediğini göstermek için,

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{\hbar} [\hat{H}_O + \hat{H}_{int}, \hat{\rho}]_{nm} \quad [4.28]$$

denkleminde direkt bir sönüm terimi eklenebilir. Böylece hareket denkleminin son hali ise;

$$\frac{\partial \rho_{nm}}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}_O + \hat{H}_{int}, \hat{\rho}]_{nm} - \Gamma_{nm} (\rho_{nm} - \rho_{nm}^{(eq)}) \quad [4.29]$$

şeklinde olur. Bu denklemde  $\Gamma_{nm}, |n\rangle$   $\Gamma_{nm}, |n\rangle$  ve  $|m\rangle$  seviye farkı (bozulma hızı) olup

$$\Gamma_{nm} = \Gamma_{mn} \quad [4.30]$$

şeklini almıştır. Burada  $\rho_{nm}^{(eq)}$  termal dengedeki değerdir [42,43].

#### 4.2. Doğrusal ve Üçüncü Dereceden Doğrusal Olmayan Soğurma Katsayıları

Doğrusal ve doğrusal olmayan soğurma katsayılarının toplamı toplam soğurma katsayısını vermektedir. Az seviyedeki ışık şiddetlerinin kontrolü doğrusal soğurma katsayısı, yüksek seviyedeki ışık şiddetlerinin kontrolünde (lazer gibi) ki malzemelerin ışığı ise doğrusal olmayan soğurma katsayıları ile açıklanır.

Soğurma katsayısı ile alınganlık arasında

$$\alpha(w) = w \left(\frac{\mu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \text{Im}(\varepsilon_0 \chi(w)) \quad [4.31]$$

denklemdaki gibi bir ilişki vardır. Denklemdaki  $\varepsilon$ , elektriksel geçirgenliğin reel kısmı iken  $\mu$ 'de kullanılan malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade eder. Doğrusal ve üçüncü dereceden doğrusal olmayan alınganlık ifadeleri;

$$\chi^{(1)}(w) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\sigma_v |M_{12}|^2}{(E_{21} - \hbar w - i\hbar\Gamma_{12})} \quad [4.32]$$

$$\chi^{(3)} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\sigma_v |M_{12}|^2 |E|^2}{(E_{21} - \hbar w - i\hbar\Gamma_{12})} \times \left[ \frac{4|M_{12}|^2}{(E_{12} - \hbar w)^2 + (\hbar\Gamma_{12})^2} - \frac{(M_{22} - M_{11})}{(E_{21} - i\hbar\Gamma_{12})(E_{21} - \hbar w - i\hbar\Gamma_{12})} \right] \quad [4.33]$$

biçiminde verilir. İlk uyarılmış enerji özdeğeri ile taban durum enerji özdeğeri arasındaki enerji farkı  $E_{21} = E_2 - E_1$  şeklinde verilir.  $\varepsilon_0$  boşluğun elektriksel geçirgenliğini  $\sigma_v$  ise taban durum elektrik yoğunluğunu ifade eder.

$$M_{ij} = \langle \psi_i | z | \psi_j \rangle (i, j = 1, 2) \quad [4.34]$$

ifadesinden de dipol matris elemanları hesaplanmaktadır.  $\Gamma$  ve  $w$  sırasıyla elektron-fonon etkileşmesi sonucu doğan düşüş oranı ve kullanılan ışığın frekansını ifade eder.

Yukarıdaki denklemler düzenlenip soğurma ifadesinde yerine yazıldığında

$$\alpha^{(1)}(w) = w \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{|M_{12}|^2 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{(E_{21} - \hbar w)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \quad [4.35]$$

ve

$$\begin{aligned} \alpha^{(3)}(w, I) = & -2w \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left( \frac{I}{\varepsilon_0 n_r c} \right) \frac{|M_{12}|^4 \sigma_v \hbar \Gamma_{12}}{[(E_{21} - \hbar w)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2]^2} \\ & \times \left( 1 - \frac{|M_{22} - M_{11}|^2}{4|M_{12}|^2} \right) \\ & \times \frac{\{(E_{21} - \hbar w)^2 (\hbar \Gamma_{12})^2 + 2(E_{21})(E_{21} - \hbar w)\}}{(E_{21})^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \end{aligned} \quad [4.36]$$

ifadeleri elde edilir. Böylelikle doğrusal  $\alpha^{(1)}(w)$  ve üçüncü dereceden doğrusal olmayan  $\alpha^{(3)}(w, I)$  optik soğurma katsayıları elde edilmiş olunur. Bu denklemlerdeki  $I$  uygulanan ışığın şiddeti,  $n_r$  reel kırılma indisidir,  $c$  ışığın boşluktaki hızını ifade etmektedir. Sonuç olarak toplam soğurma katsayısı doğrusal ve doğrusal olmayan terimlerin toplamı ile elde edilir.

$$\alpha(w, I) = \alpha^{(1)} + \alpha^{(2)}(w, I) \quad [4.37]$$

### 4.3. Doğrusal ve Üçüncü Dereceden Doğrusal Olmayan Kırılma İndis Değişimi

Genel olarak optik malzemenin  $n_r$  kırılma indisi, malzemeyi gönderilen ışığın şiddetine bağlıdır. Bu sonuca bağlı olarak (ışığın kendi kendisini odaklaması (self focusing of light), optiksel anahtarlama (optical switching), optiksel çift kararlılık (optical bistability)) [42] gibi farklı doğrusal olmayan optiksel süreçler ortaya çıkar. Kırılma indisindeki değişim ile alınganlık arasındaki ilişki,

$$\frac{\Delta n(w)}{n_r} = Re \left( \frac{\chi(w)}{2n_r^2} \right) \quad [4.38]$$

şeklindedir. Burada  $\Delta n(w)$  frekansa bağlı kırılma indisindeki değişim,  $n_r$  malzemenin kırılma indisidir. Alınganlık ifadesi yukarıdaki denklemde yerine yazıldığında;

$$\frac{\Delta n^1(w)}{n_r} = \frac{\sigma_v |M_{12}|^2}{2n_r^2 \varepsilon_0} \left[ \frac{E_{21} - \hbar w}{(E_{21} - \hbar w)^2 - (\hbar \Gamma_{12})^2} \right] \quad [4.39]$$

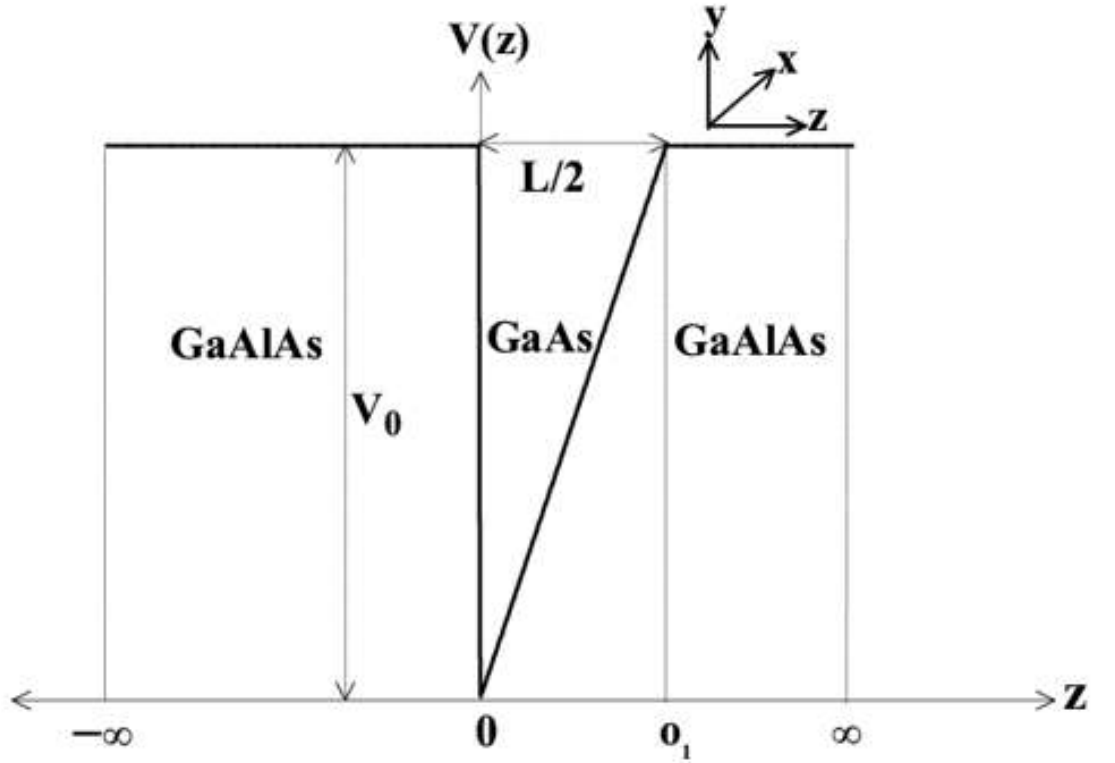
$$\begin{aligned}
\frac{\Delta n^3(w, I)}{n_r} = & -\frac{\mu c}{4n_r^3 \varepsilon_0} |M_{12}|^2 \frac{\sigma_v I}{[(E_{21} - \hbar w)^2]^2} \\
& \times \left[ 4 \left( E_{21} - \hbar w |M_{12}|^2 \right. \right. \\
& - \frac{(M_{22} - MF_{11})^2}{(E_{21})^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \{ (E_{21} - \hbar w) \times [E_{21}(E_{21} - \hbar w) - (\hbar \Gamma_{12})^2] \\
& \left. \left. - (\hbar \Gamma_{12})^2 (2E_{21} - \hbar W) \right\} \right] \quad [4.40]
\end{aligned}$$

Doğrusal ve doğrusal olmayan kırılma indisi değişim ifadelerini elde edilmiş olunur. Bu ifadeler toplanarak toplam kırılma indisi değişimi elde edilmiş olunur.

$$\frac{\Delta n(w, I)}{n_r} = \frac{\Delta n^1(w)}{n_r} + \frac{\Delta n^3(w, I)}{n_r} \quad [4.41]$$

## **5. ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARI-V-ŞEKİLLİ GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As TEK KUANTUM KUYUSUNUN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ**

Bu bölümde Şekil 5.1 de şematik olarak gösterilen yarı- V-şekilli tek kuantum kuyusunun elektronik özellikleri, üzerine kuantum kuyu genişliği (L) ve yapının büyütme doğrultusuna (z-doğrultusu) paralel uygulanan statik elektrik alan ve büyütme doğrultusuna dik yönde (x-doğrultusu) uygulanan statik manyetik alanın etkisi, etkin kütle yaklaşımı çerçevesinde tam set çözüm yöntemi kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 5.1 Yarı-V- şekilli kuantum kuyusunun şematik gösterimi.

Etkin kütle yaklaşımı çerçevesinde statik elektrik ve manyetik alan altındaki kuşatılmış bir elektron için sistemin toplam Hamiltonyeni

$$H = \frac{(\vec{p} + \frac{e\vec{A}}{c})^2}{2m^*} + V(z) + |e|Fz \quad [5.1]$$

biçimde yazılır. Burada  $e$  elektron yükü,  $c$  ışık hızı,  $\vec{p}$  elektronun momentum operatörü,  $m^*$  elektronun etkin kütlesi,  $\vec{A} = (0, Bz, 0)$  olacak şekilde manyetik vektör potansiyeli ve  $F$  büyütme doğrultusunda uygulanan statik elektrik alanının büyüklüğüdür.  $V(z)$  kuşatma kuşatma potansiyelinin fonksiyonel formu

$$V(z) = \begin{cases} V_0 & ; 0 \leq z \\ \left(\frac{V_0}{O_1}\right)z & ; 0 < z < O_1 \\ V_0 & ; O_1 \leq z \end{cases} \quad [5.2]$$



ile ifade edilir.  $\vec{p}$  momentum operatörü ve A manyetik vektör potansiyelinin açık halleri yukarıdaki 5.1 denkleminde yerine yazılırsa, sistemin toplam Hamiltonyen'i şöyle elde edilir;

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + \frac{e^2 B^2}{2m^* c^2} z^2 + V(z) + |e|Fz. \quad [5.3]$$

Sistemin boyutsuz Hamiltonyen denklemini elde etmek için ise, tüm uzunluk ifadeleri etkin Bohr yarıçapı  $a_B = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{m^* e^2}$  ve tüm enerji değerleri Rydberg  $R = \frac{m^* e^4}{2\epsilon_0^2 \hbar^2}$  cinsinden ifade edilirse, sistemin boyutsuz Hamiltonian'ı;

$$\tilde{H} = \frac{d^2}{d\tilde{z}^2} + \frac{B e^2 \hbar^2}{4m^* R^2} \tilde{z}^2 + \tilde{V}(\tilde{z}) + \tilde{F}(\tilde{z}) \quad [5.4]$$

şeklinde elde edilir.

Yarı V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusundaki kuşatılmış tek elektron için zamandan bağımsız Schrödinger denklemini;

$$\tilde{H}\Psi(\tilde{z}) = \tilde{E}\Psi(\tilde{z}) \quad [5.5]$$

biçimindedir. Burada,  $\Psi(\tilde{z})$  elektron dalga fonksiyonunun z- doğrultusundaki hareketini tanımlar ve bu dalga fonksiyonu genişliği L olan sonsuz potansiyel kuyusunun çözümlerinden faydalanılarak oluşturulur. Bu çözümler ise;

$$\varphi_n(\tilde{z}) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos \left[ \frac{n\pi}{L} \tilde{z} \delta_n \right] \quad [5.6]$$

biçimindedir. Buradaki  $\delta_n$ , genişliği L olan sonsuz kuantum kuyusunun tek ve çift özdeğerlerine karşılık gelen özfonksiyonlarındaki faz farkıdır ve

$$\delta_n = \begin{cases} 0; n \text{ tek ise} \\ \frac{\pi}{2}; n: \text{ çift ise} \end{cases} \quad [5.7]$$

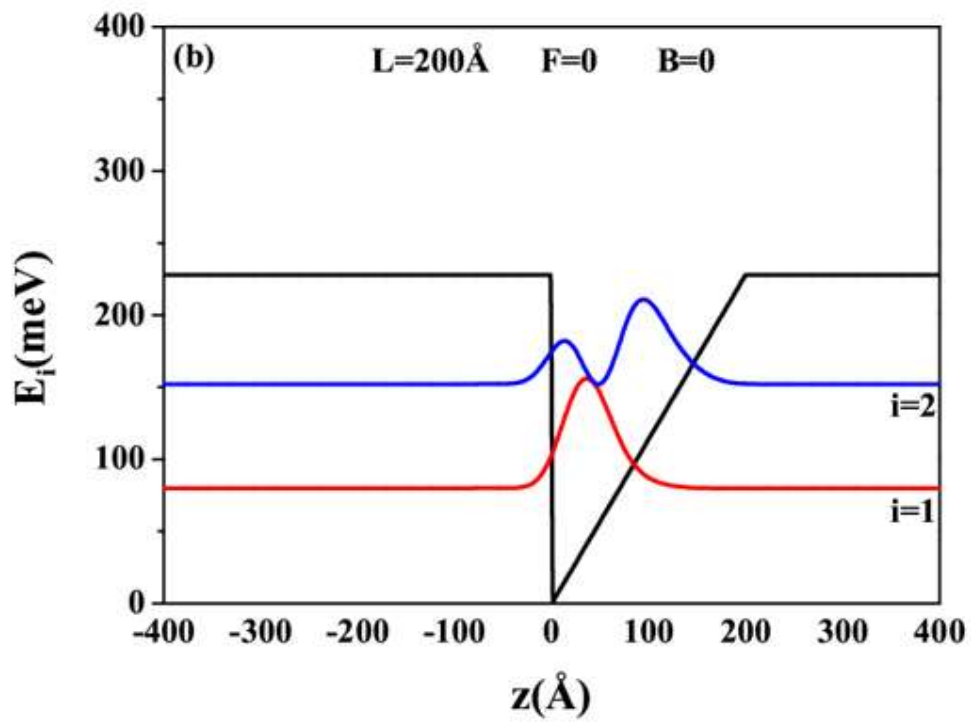
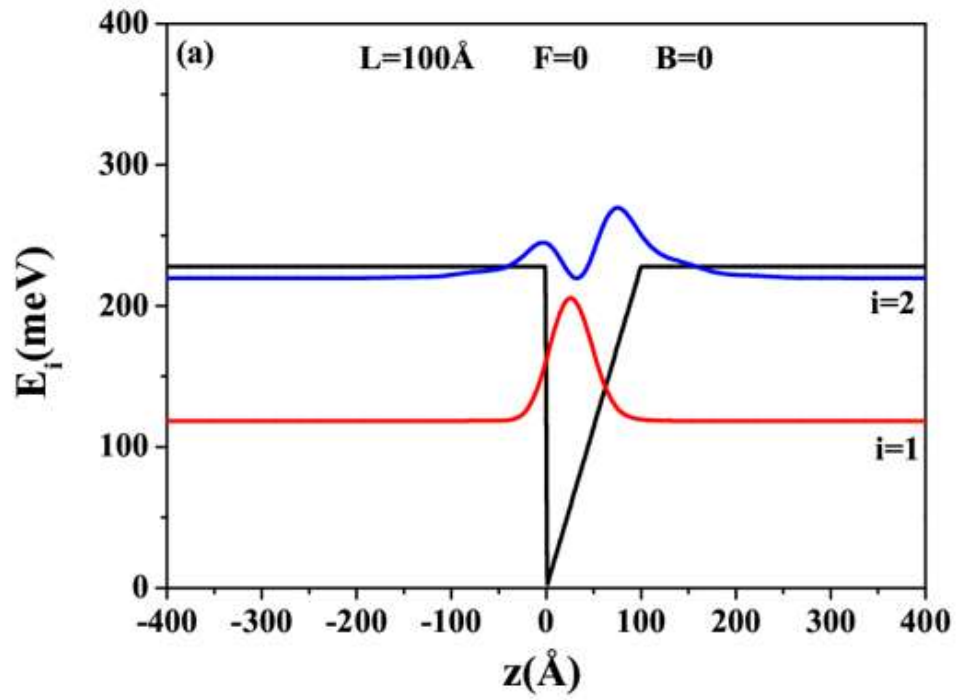
şeklinde değerler alır. Bu veriler eşliğinde sistemi tanımlayan dalga fonksiyonu ise

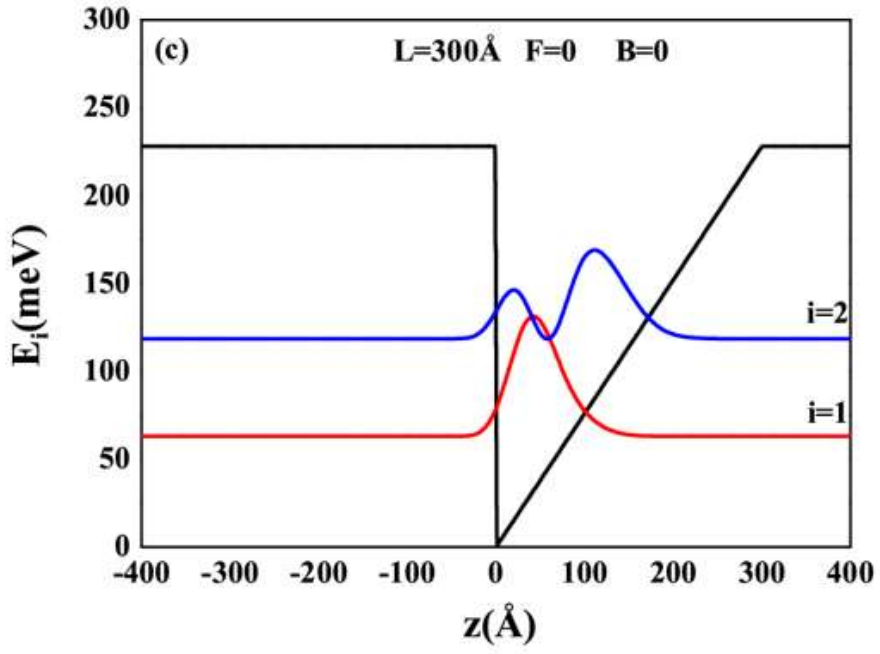
$$\Psi(\tilde{z}) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(\tilde{z}) \quad [5.8]$$

biçiminde yazılır. Boyutsuz Hamiltonyen'in beklenen değeri de aşağıdaki gibi elde edilir.

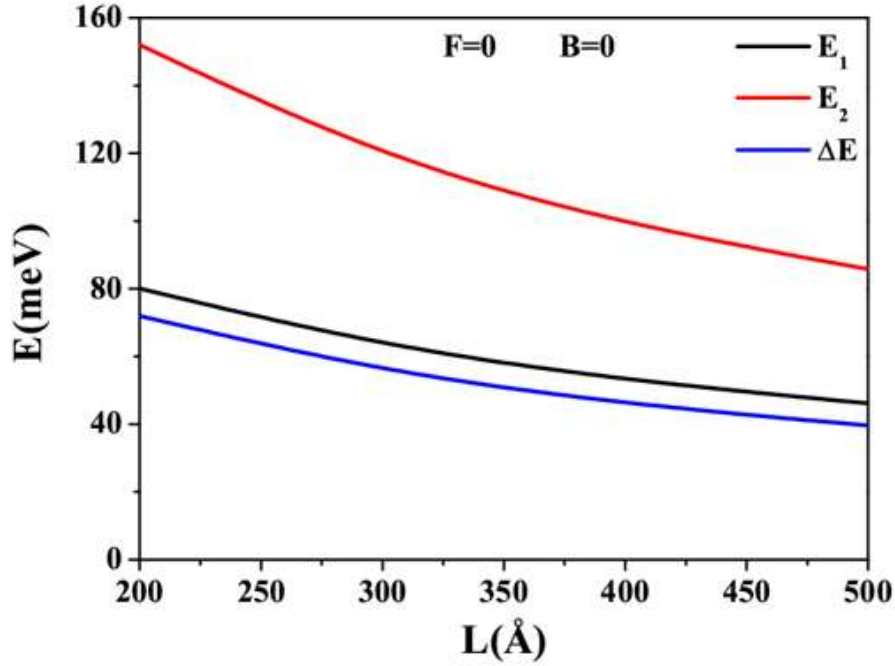
$$\tilde{E} = \left\langle \Psi \left| -\frac{d^2}{d\tilde{z}^2} + \tilde{V}(\tilde{z}) + \tilde{F}\tilde{z} + \gamma^2\tilde{z}^2 \right| \Psi \right\rangle \quad [5.9]$$

Elde edilen bu boyutsuz Hamiltoniyen denklemin çözümleri yüksek kapasiteli bilgisayarlar yardımı ile Mathematica programında yazılan kodlar kullanılarak nümerik olarak hesaplanmıştır. Çalışmamızın ilk aşamasında herhangi bir dış alan yokken GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As yarı-V şekilli tek kuantum kuyu sisteminin etkin kuyu genişliği değiştirilerek sistemin kuşatma potansiyelleri, alt-bant enerji değerleri ve bu enerji değerlerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının kareleri elde edilmiştir. Sonrasında ise ikinci aşama olarak büyütme doğrultusuna paralel uygulanan elektrik alan ve aynı şekilde büyütme doğrusuna dik uygulanan manyetik alanın sistemin elektronik yapısını nasıl etkilediği incelenmiş ve yorumlanmıştır.



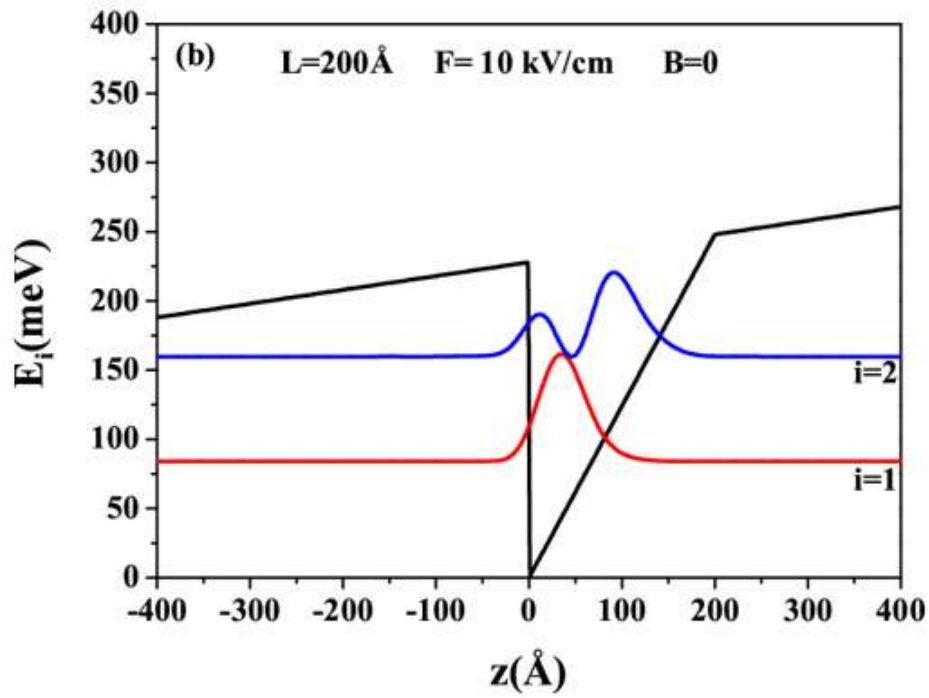
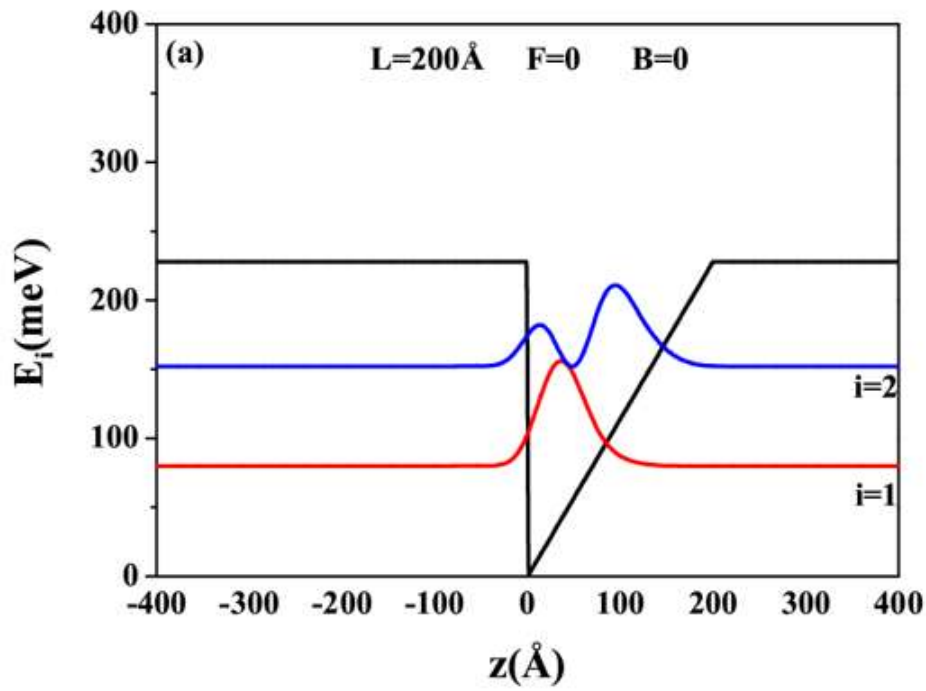


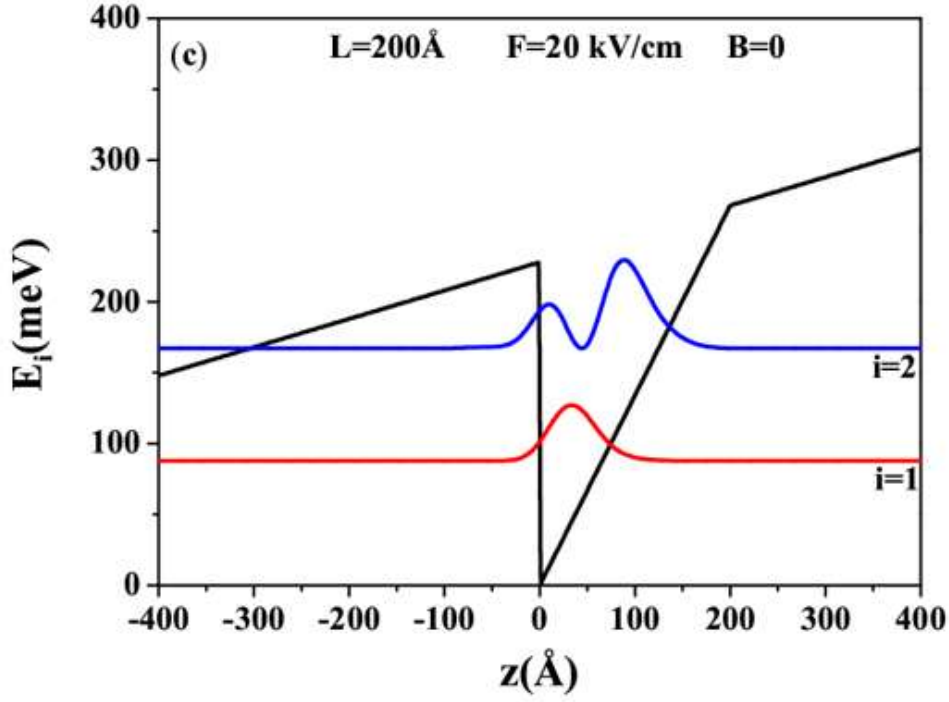
**Şekil 5.2.** Yarı-V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, alt bant enerji değerleri ve bu enerji değerlerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının kareleri üzerine kuantum kuyu genişliğinin (L) etkisi



**Şekil 5.3** Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun taban durum enerjisi ( $E_1$ ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( $E_2$ ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ ) kuantum kuyu genişliğine göre değişimi.

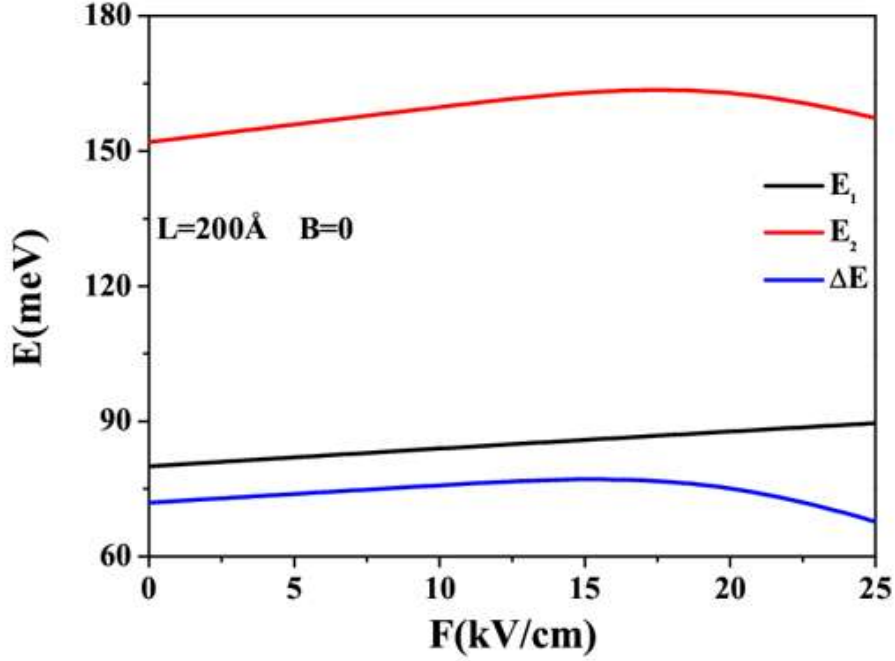
Dış elektrik ve manyetik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, altbant enerji seviyeleri ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesinin kuantum kuyu genişliğine göre değişimi şekil 5.2(a-c) ve 5.3'de gösterilmiştir. Bu şekilden de açıkça görüldüğü üzere kuantum kuyu genişliğinin artması ile birlikte taban durum ve birinci uyarılmış durum enerjileri daha düşük enerji seviyelerine doğru kaymıştır. Bu enerji kaymasının sonucu olarak en düşük iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı da azalmıştır. Ayrıca dar kuantum kuyularındaki taban ve birinci uyarılmış durum dalga fonksiyonlarının bariyer malzemesine doğru sızmaları, geniş kuantum kuyularında tamamen ortadan kalkarak parçacıkların kuantum kuyu malzemesi için de kuşatıldıkları da açıkça bu şekillerden görülmektedir.





**Şekil 5.4** Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, en düşük iki alt bant enerji seviyesi ve bu enerji değerlerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesi üzerine büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alan değerinin etkisi [(a) F=0, (b) F=10 kV/cm, (c) F=20 kV/cm].

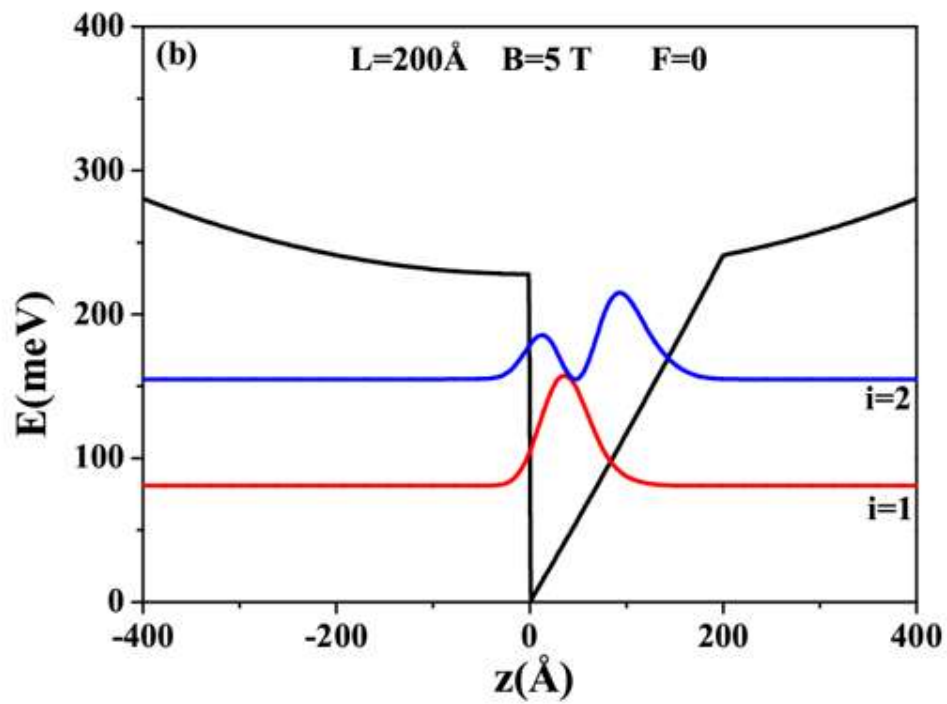
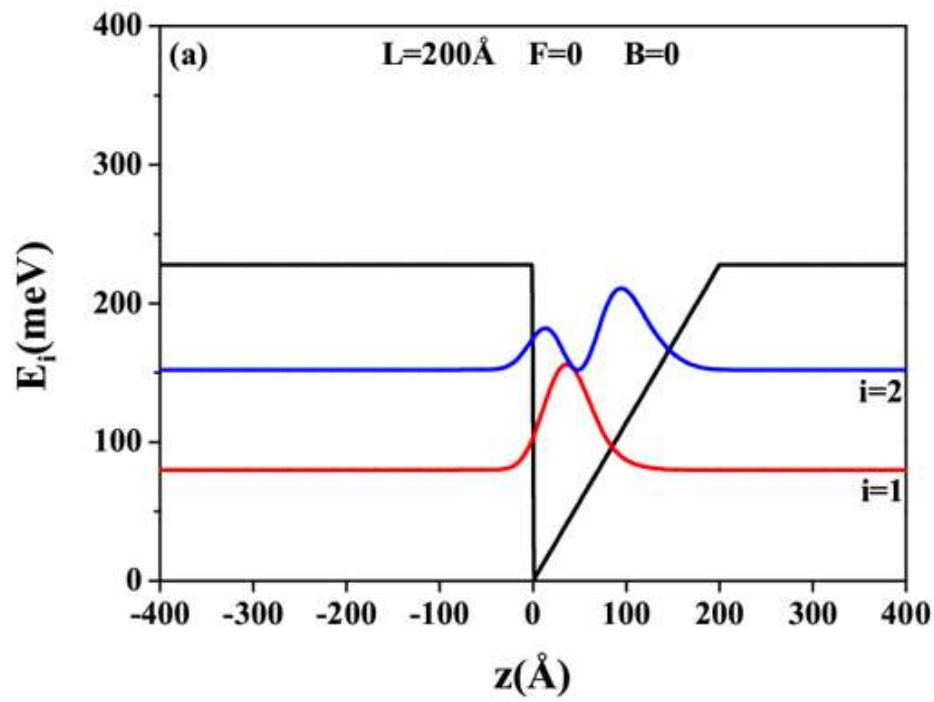
Herhangi bir dış manyetik alan etkisi olmaksızın, yapının büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı (F=0, F=10kV/cm, F=20kV/cm) statik elektrik alan değeri için yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, en düşük iki altbant enerji seviyesi ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesinin değişimi şekil 5.4(a-c) de gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere sistemin üzerine uygulanan statik elektrik alan değerinin artırılması ile kuantum kuyusunda kuşatılmış olan elektronlar üzerine etkileyen elektriksel kuvvet artmıştır. Artan bu elektriksel kuvvetin etkisi ile kuantum kuyusunda kuşatılmış taşıyıcılar uygulanan elektrik alana zıt yönde sürüklenerek (sola doğru) kuantum kuyusunun kuşatma potansiyelinin bükülmesine neden olmuştur.

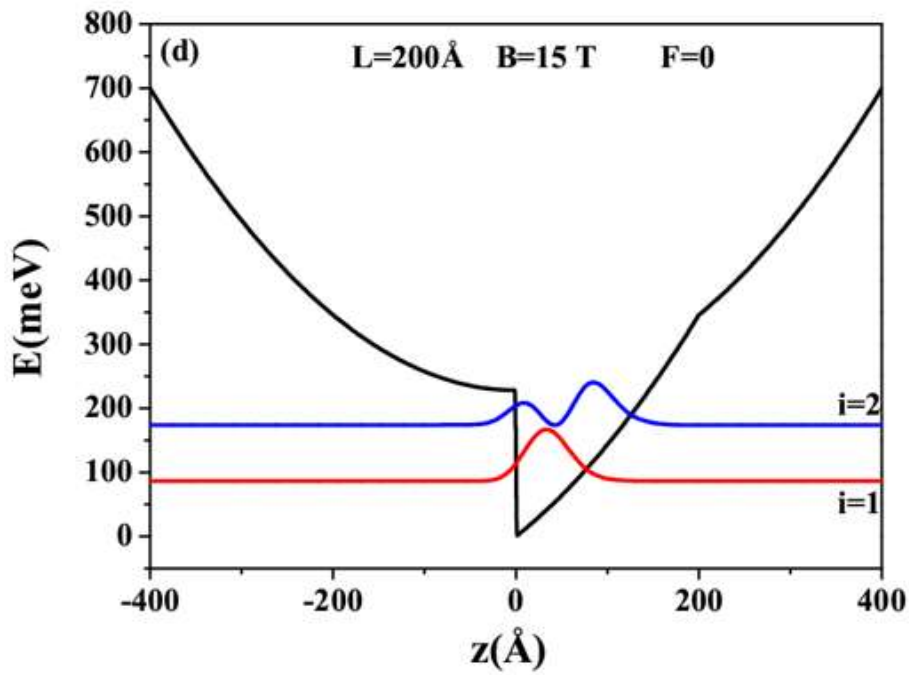
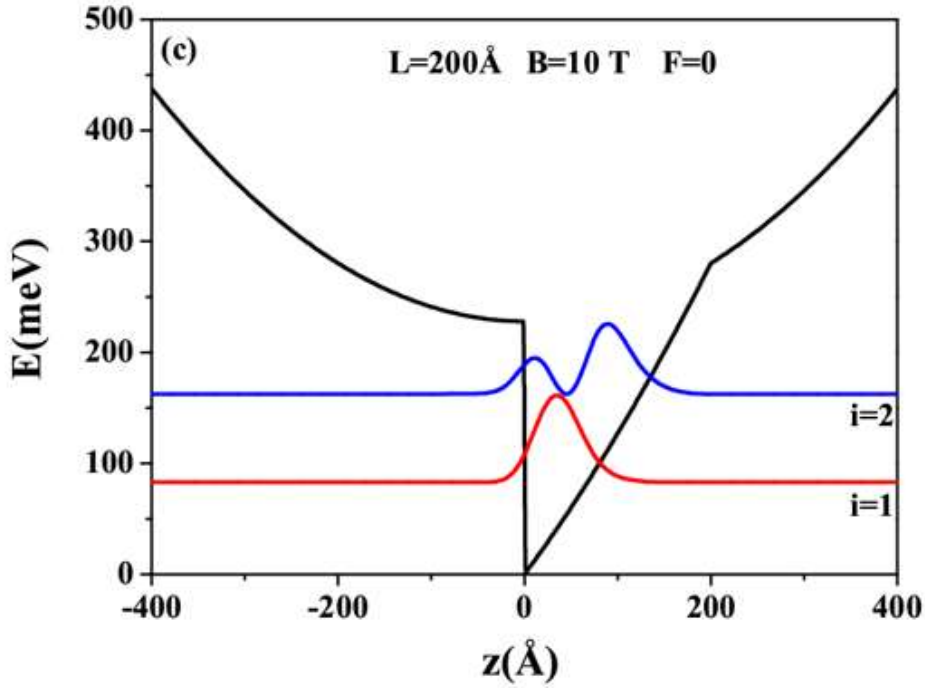


**Şekil 5.5** Büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alanın fonksiyonu olarak yarım V- şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun taban durum enerji seviyesi ( $E_1$ ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( $E_2$ ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ )değişimi.

Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>As<sub>0.3</sub>Al tek kuantum kuyusunun taban durum enerji seviyesi ( $E_1$ ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( $E_2$ ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ ) yapının büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alan ile değişimi şekil 5.5 de gösterilmiştir. Bu şekillerden ve şekil 5.4 den açıkça görüldüğü üzere artan elektrik alan değeri ile kuşatma potansiyelindeki bant bükülmesi artarak daha dar bir kuantum kuyu sisteminin oluşmasına neden olmuştur. Bu kuantum kuyusunun etkin genişliğinin daralması sonucu ile en düşük iki enerji seviyesi daha büyük enerji seviyelerine doğru kayarak bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının artmasına neden olmuştur. Elektrik alan değerinin daha da büyütülmesi ile bant bükülmesinin daha da arttığı ve ikinci uyarılmış enerji durumunun artık kuantum kuyusunun içinde kuşatılmadığı görülmüştür.



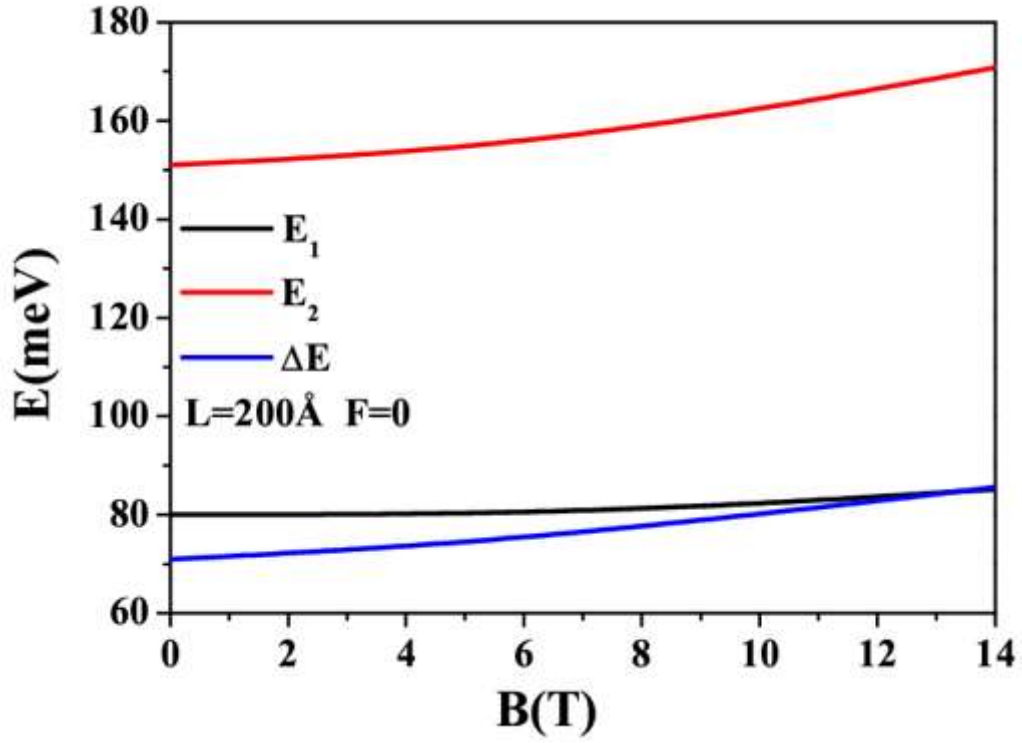




**Şekil 5.6** Yarım V şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, en düşük iki altbant enerji seviyesi ve bu enerji değerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesinin yapıya dik doğrultuda uygulanan dört farklı statik manyetik alan değerine [(a)B=0 T,(b) B=5T,(c)B=10,(d)B=15T] göre değişimi.

Dışarıdan herhangi bir statik elektrik alan etkisi olmaksızın, yapının büyütme doğrultusuna dik doğrultuda ( $x$ -ekseni) uygulanan dört farklı ( $B=0, 5T, 10T, 15T$ ) statik manyetik alanın sistemin kuşatma potansiyeli, en düşük iki alt bant enerji seviyesi ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesi üzerine etkisi şekil 5.6(a,b,c,d) de gösterilmiştir. Bu şekillerden de açıkça görüldüğü üzere sisteme uygulanan statik manyetik alan yapıya ek bir geometrik kuşatma sağlamaktadır. Statik manyetik alanın değeri arttıkça yapı üzerindeki bu ek geometrik kuşatmanın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu ek geometrik kuşatma etkisi ile birlikte kuantum kuyusunda kuşatılmış elektronlar, yapı içinde daha iyi lokalize oldukları görülmektedir.



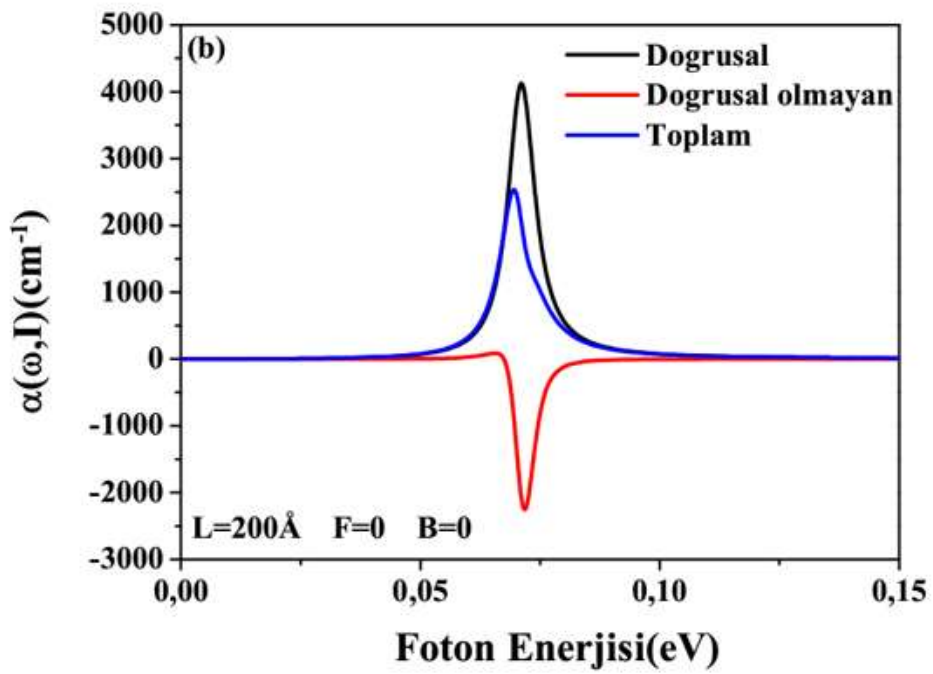
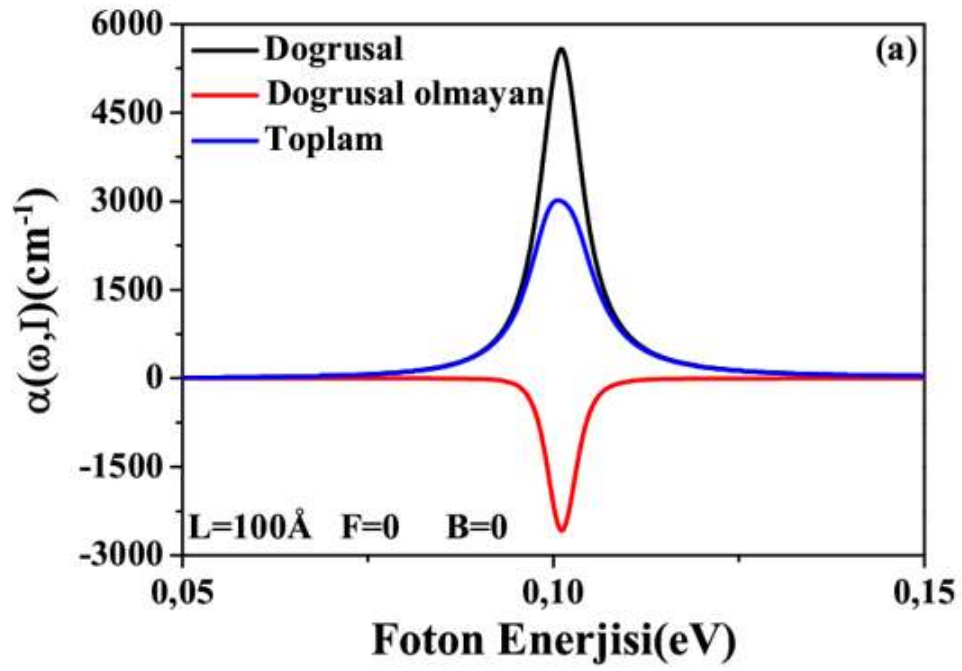


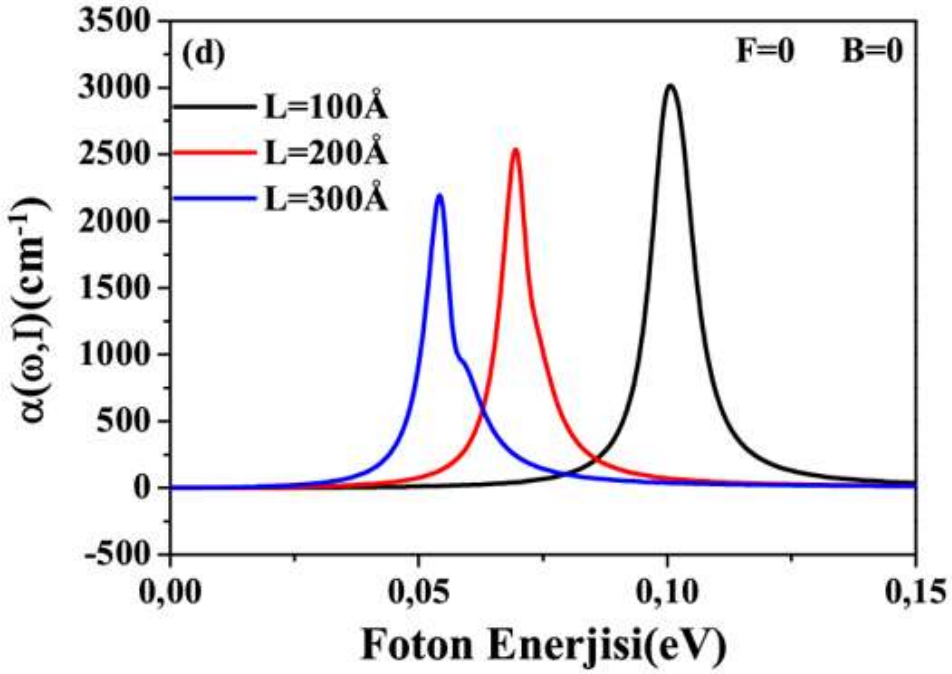
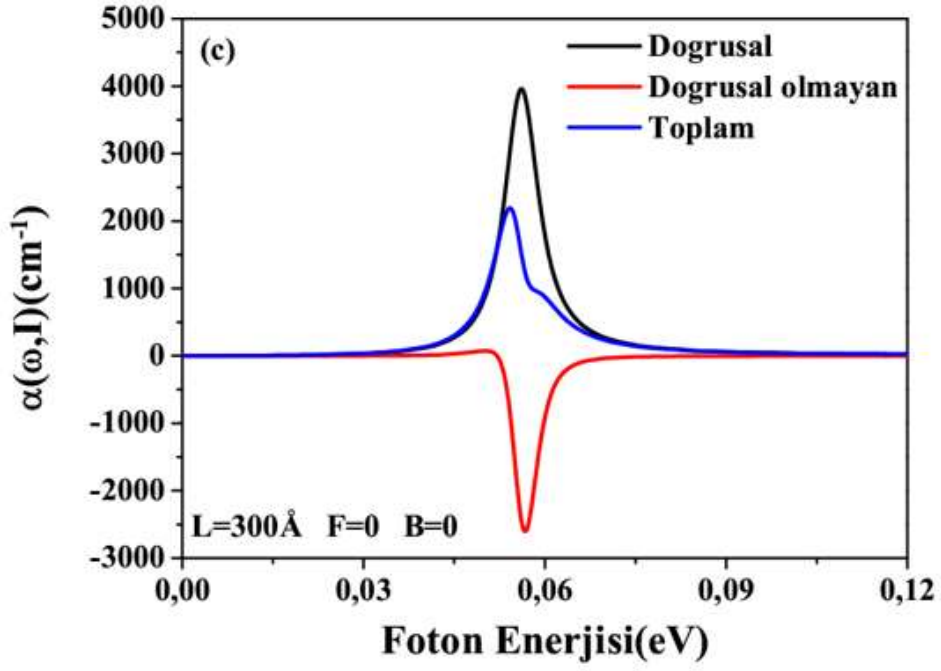
**Şekil 5.7** Yapıya dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alanın bir fonksiyonu olarak ters V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun taban durum enerji seviyesi ( $E_1$ ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( $E_2$ ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ ) değişimi.

Dışarıdan herhangi bir statik elektrik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun kuşatma potansiyeli, en düşük iki altbant enerji seviyesi ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesi üzerine yapıya dik doğrultuda uygulanan dört farklı manyetik alan değerinin etkisi ( $B=0, 5\text{T}, 10\text{T}, 15\text{T}$ ) şekil 5.7 de gösterilmiştir. Bu şekilden görülüyor ki; statik manyetik alanın artışı ile taban durum ve birinci uyarılmış enerji seviyesi artmaktadır. Bu artışa paralel olarak en düşük iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı da artan manyetik alan değeri ile artmaktadır.

## 6.ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ALTINDAKİ YARIM V- ŞEKİLLİ GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As TEK KUANTUM KUYUSUNUN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde elde edilen yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun enerji özdeğer ve özfonksiyonlarını kullanarak ve dördüncü bölümde elde edilen optiksel soğurma ve kırılma indisi değişimi denklemlerinden faydalanarak sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan optiksel özellikleri incelenmiştir. İlk olarak sistemin yapı parametresi olan kuantum kuyu genişliğinin değişiminin sistemin optiksel özelliklerini nasıl etkilediği hesaplanarak yorumlanmıştır. Daha sonra ise yapıya dışarıdan uygulanan statik elektrik ve manyetik alanın sistemin optiksel özellikleri üzerine etkisi numerik olarak hesaplanıp yorumlanmıştır. Bu bölümde numerik hesaplamalar için kullanılan fiziksel büyüklükler ise şu şekildedirler:  $m_e^* = 0.067 m_0$  ( $m_0$  serbest elektron kütesidir),  $n_r = 3.2$ , (reel kırılma indisi). Alüminyum konsantrasyonu  $x=0.3$ ,  $V_0=228$  meV,  $\sigma_v = 1 \times 10^{23} \text{m}^{-3}$ ,  $I=0.1 \text{MW/cm}^2$ ,  $\Gamma=1/\tau$  ve  $\tau = 0.2$  ps olarak alınmıştır.

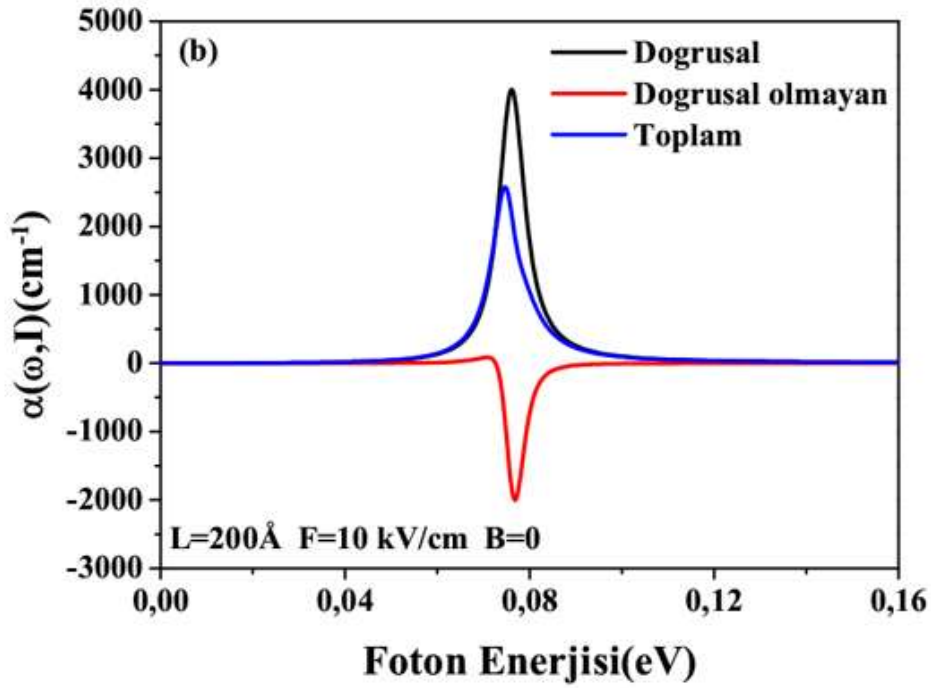
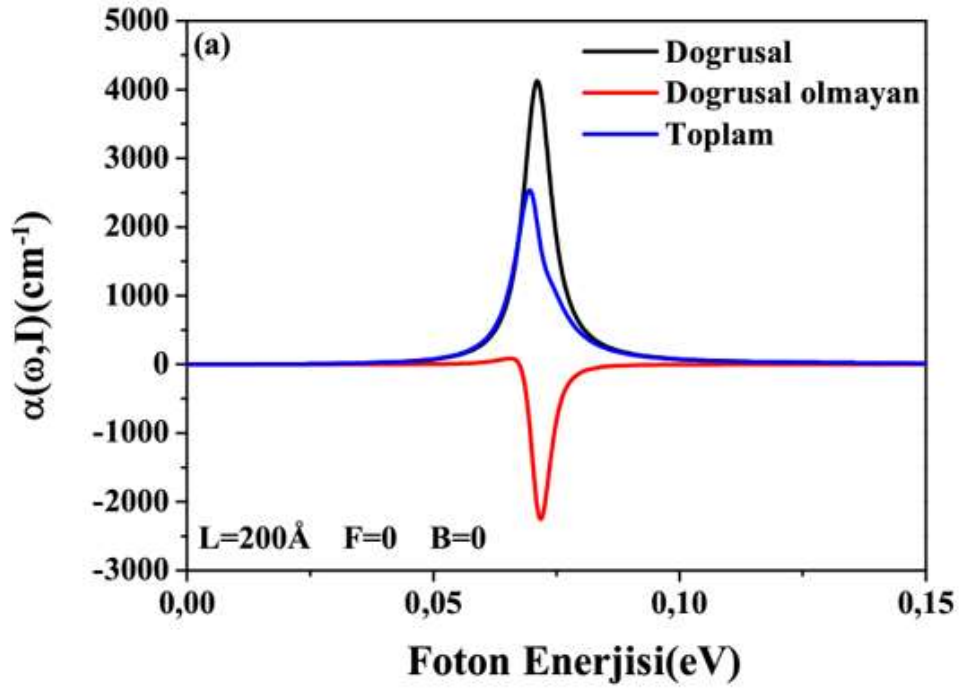


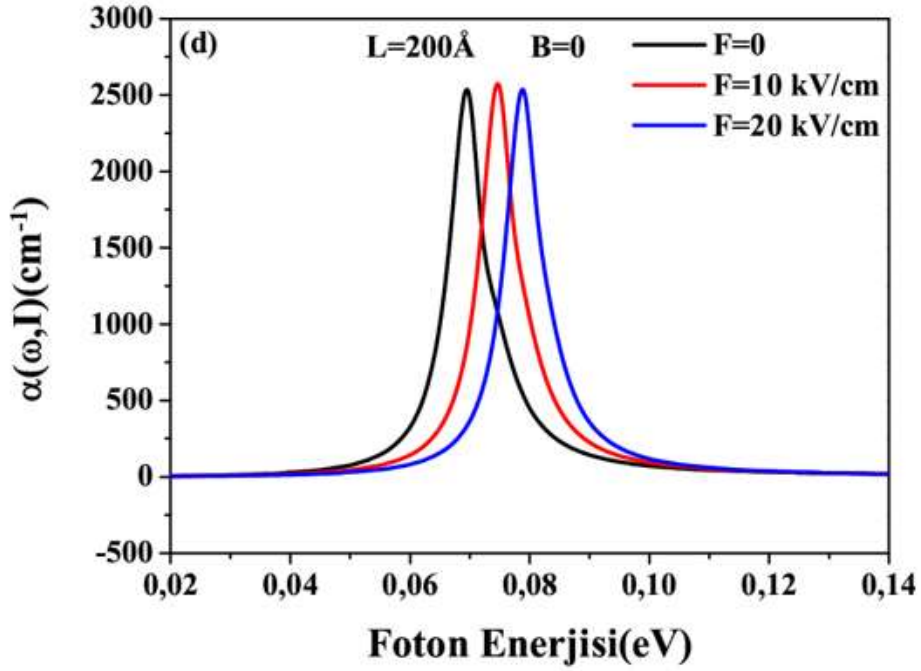
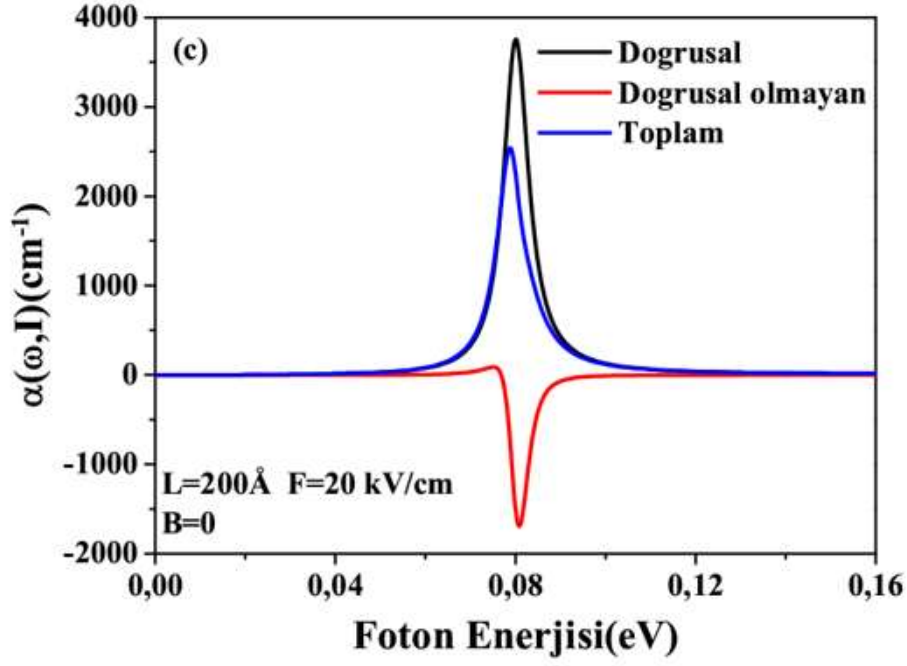


**Şekil 6.1** Yarım-V –şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As kuantum kuyusunun farklı kuantum kuyu genişlikleri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak toplam optiksel soğurma katsayısının değişimi.

Dışarıdan uygulanan statik elektrik ve manyetik alan olmaksızın, yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam optiksel soğurma katsayısının üç farklı kuantum kuyu genişliği değeri için değişimi gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak şekil 6.1(a,b,c)'de gösterilmiştir. Şekil 6.1(d)'de ise birbirinden farklı üç kuantum kuyu genişliği için toplam optiksel soğurma katsayısının değişimi gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu şekillerden kuantum kuyusunun genişliği arttıkça soğurma pikinin genliğinin azaldığı ve maksimum pik pozisyonunun daha düşük enerji seviyelerine doğru (kırmızıya kayma) kaydığı görülmektedir. Bu kırmızıya kaymanın fiziksel nedeni, izinli optik bir geçişin gerçekleştiği ardışık enerji seviyeleri ( $E_{21}$ ) arasındaki enerji farkının kuantum kuyu genişliği ile azalmasından kaynaklanmaktadır. Toplam pik genliğinin azalması ise dipol matris elemanının artan kuantum kuyu genişliği ile azalmasından kaynaklanmaktadır.

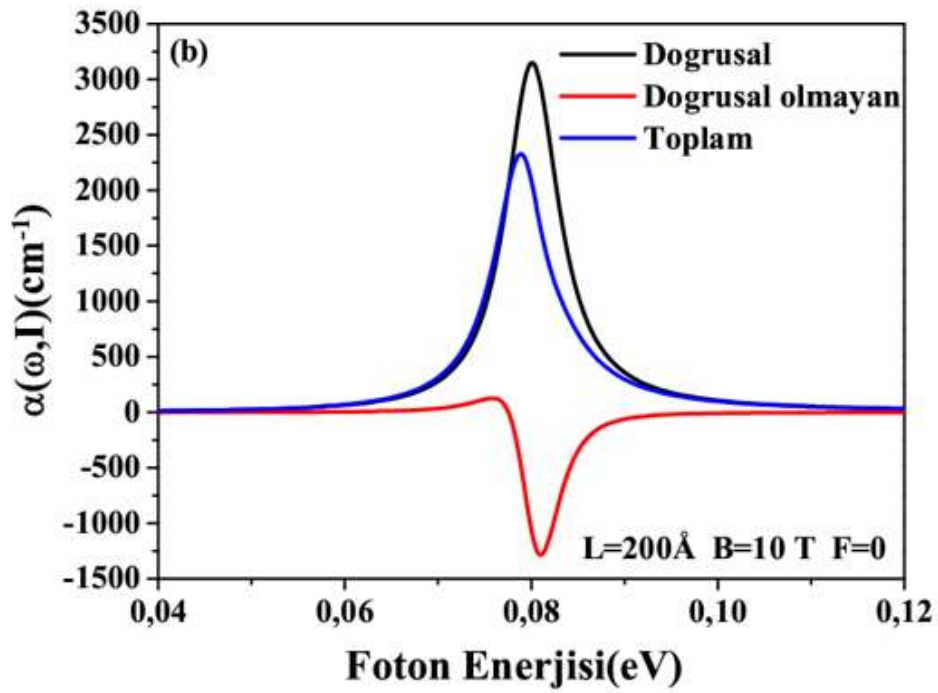
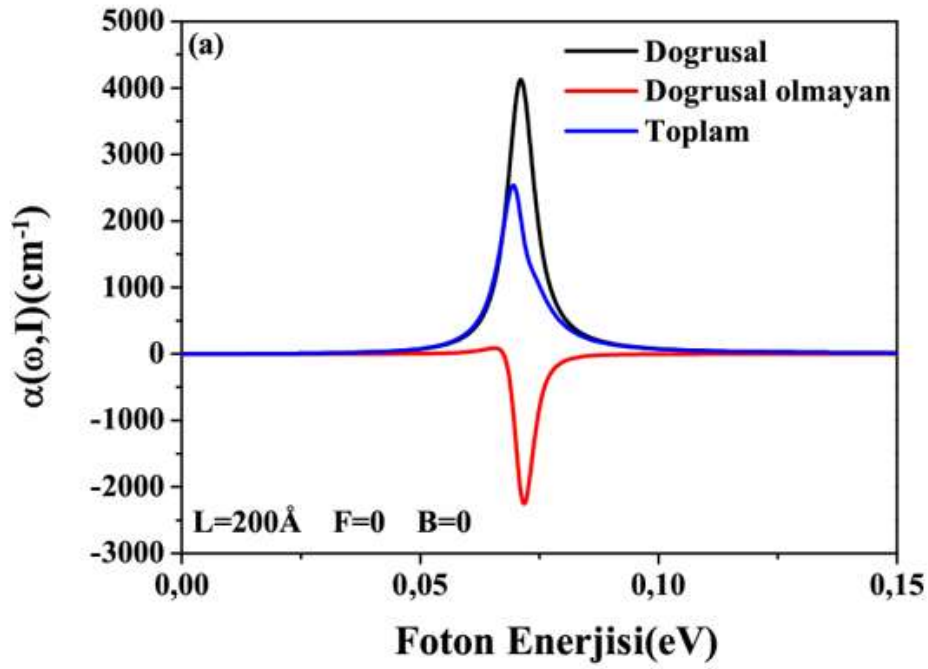


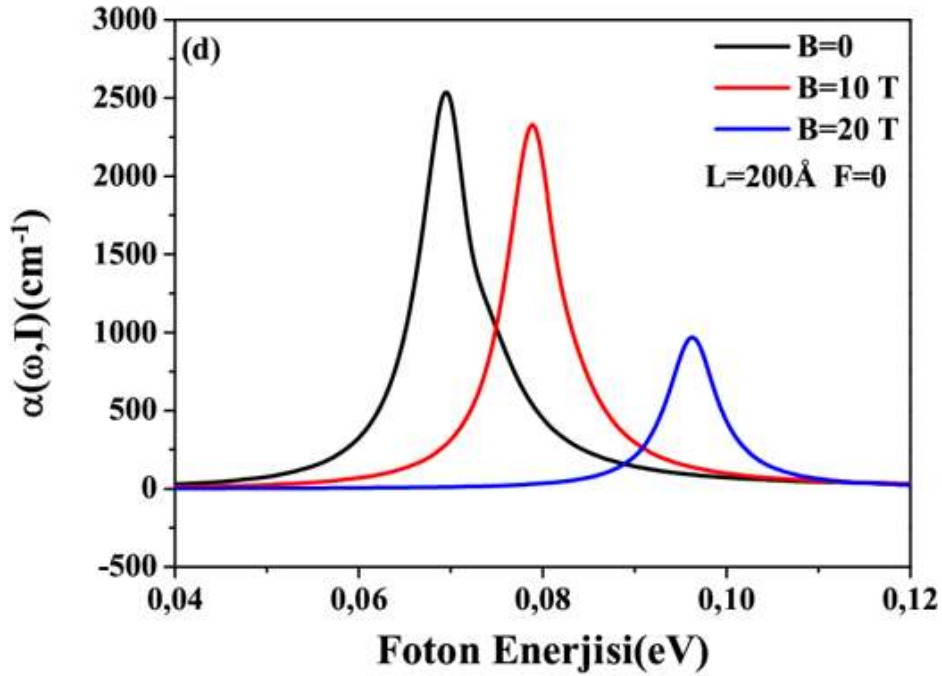
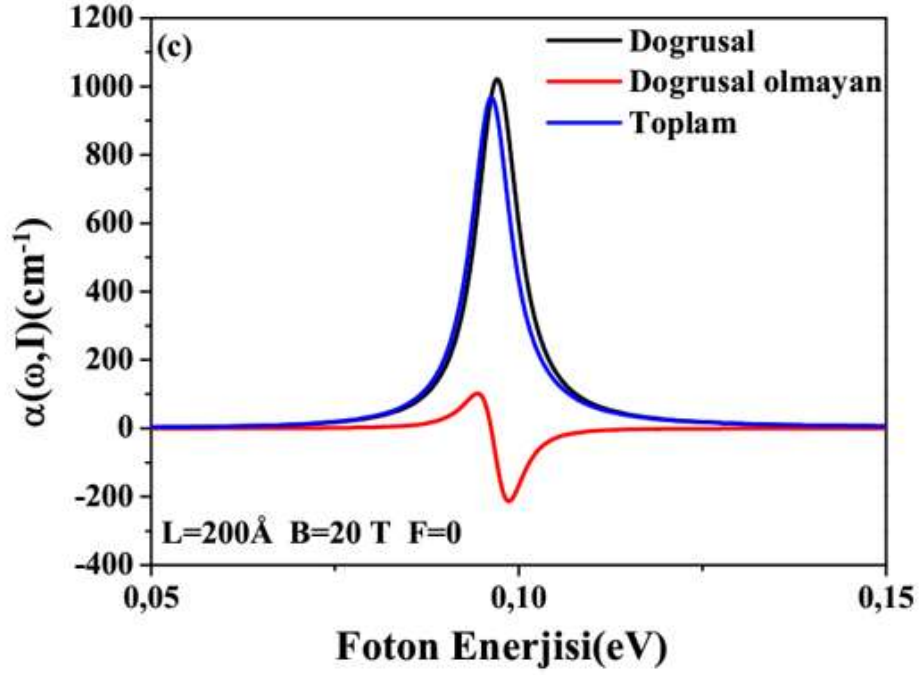




**Şekil 6.2** Yarıym  $-V$ -şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısının değişimi.

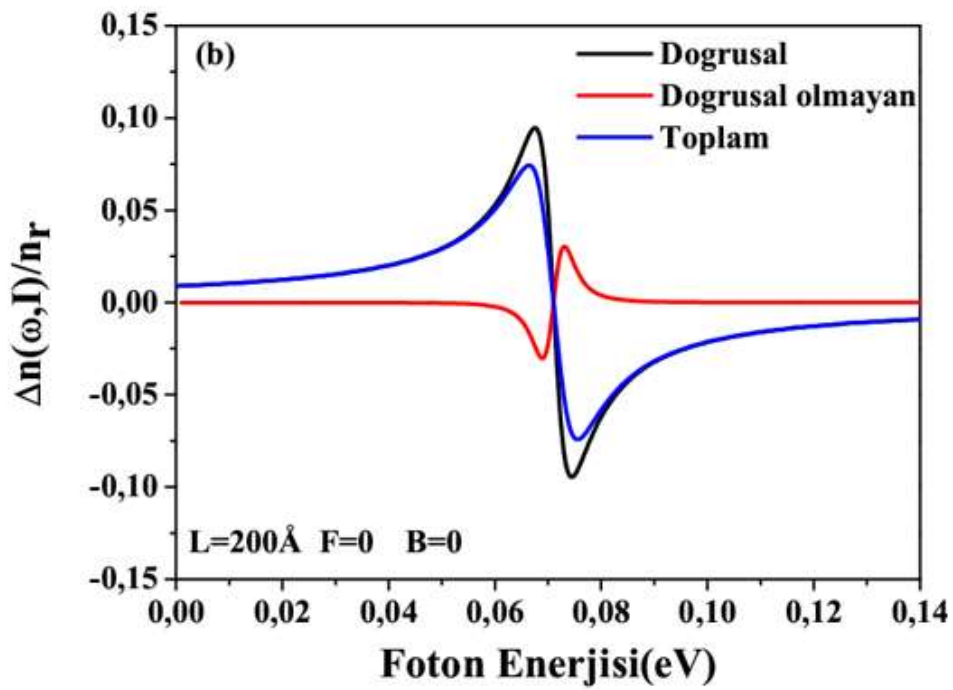
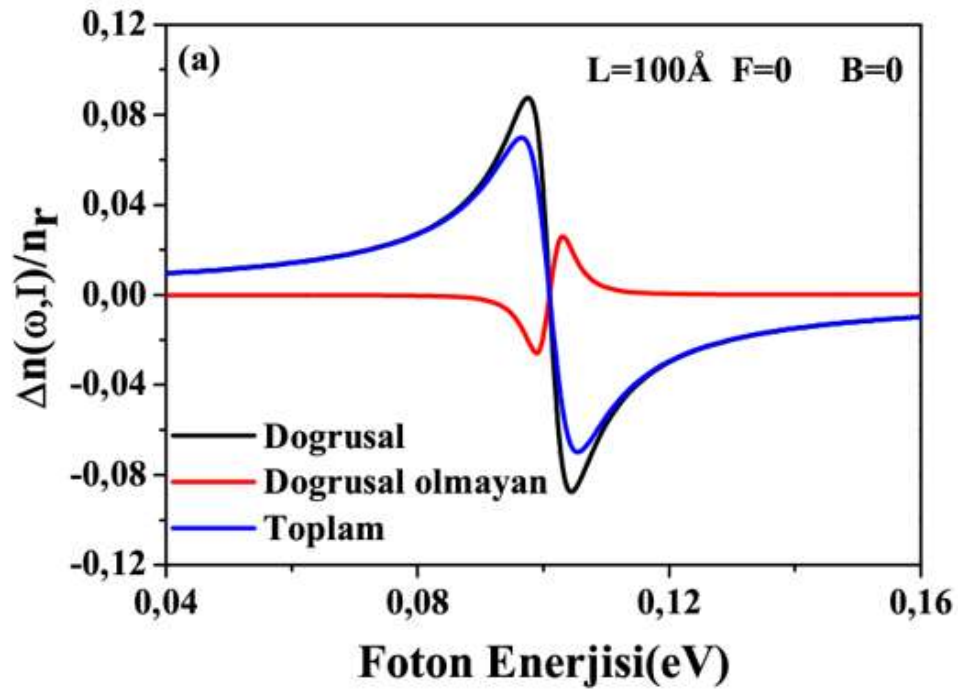
Şekil 6.2(a,b,c)'de ilk üç grafikte dış bir statik manyetik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam optiksel soğurma katsayısı üzerine yapının büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alanının etkisi gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 6.2(d)'de ise üç farklı statik elektrik alan değerinin toplam optiksel soğurma katsayısı üzerine olan etkisi sunulmuştur. Bu şekillerden de açıkça görüldüğü gibi statik elektrik alanının değerinin artması ile soğurma pikleri çok az da olsa büyük enerji seviyelerine doğru (maviye-kayma) kaymaktadır. Toplam optik soğurma piklerindeki enerji kaymasının ana nedeni; sistemin büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alan yapının kuşatma potansiyelinde bir bükülmeye neden olarak yük taşıyıcılarını alana zıt yönde sürüklenmesine neden olmasıdır. Böylece ilk iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkı küçükte olsa bir artış gösterir. Bu enerji farkındaki artış soğurma pikinin büyük enerjilere doğru kaymasına neden olur. Soğurma pikinin maksimum yüksekliğindeki bir miktarda olsa azalış nedeni ise doğrusal, doğrusal olmayan optik özelliklerini hesapladığımız denklemlerdeki dipol matris elemanlarının büyüklüklerinden kaynaklanmaktadır.

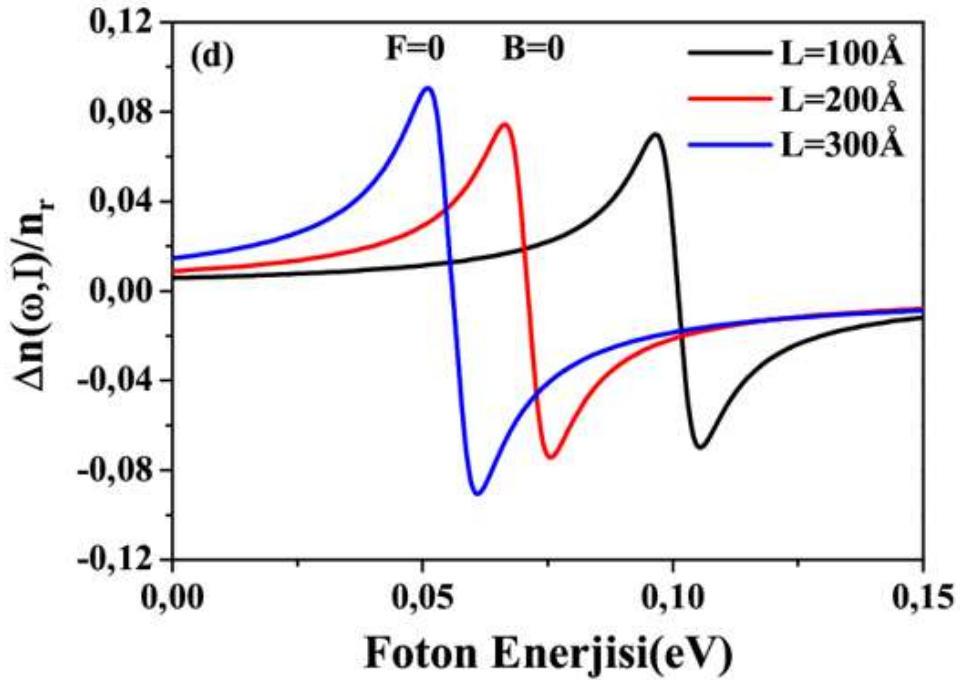
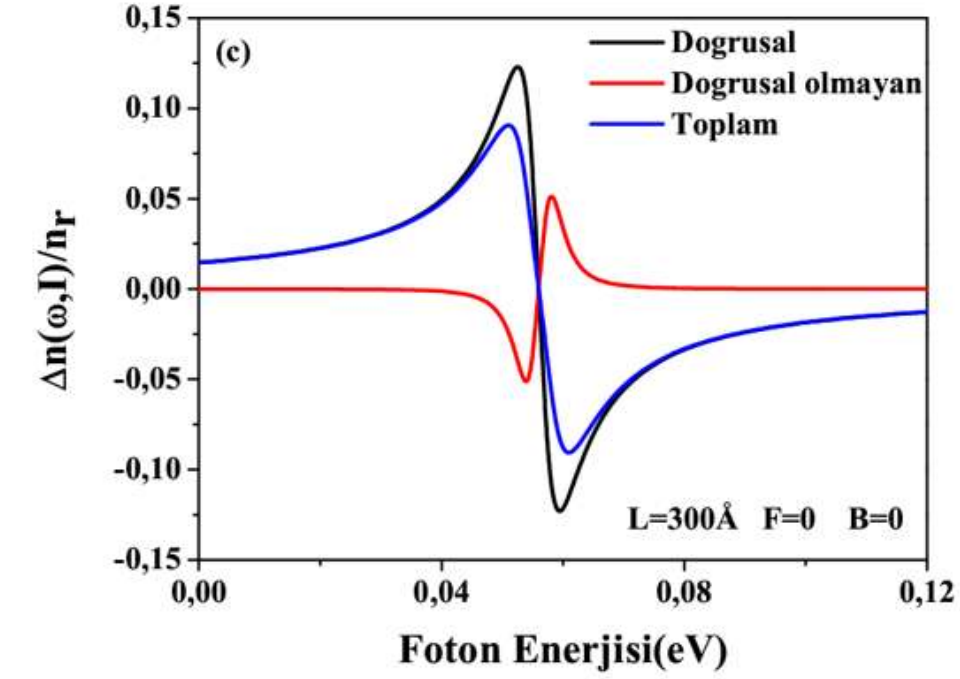




**Şekil 6.3** Yarı V-şekilli GaAs/Ga<sub>0,7</sub>Al<sub>0,3</sub>As kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı statik manyetik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısının değişimi.

Dış bir statik elektrik alan etkisi olmaksızın, yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusu yapısına büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alanının üç farklı (B=0, B=10T, B=20T) değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam soğurma katsayısının değişimi şekil 6.3 (a,b,c) de gösterilmiştir. Şekil 6.3(d) de ise sistemin büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı statik manyetik alan değeri için toplam soğurma katsayısının değişimi gösterilmiştir. Be şekillerden de görüldüğü gibi statik manyetik alan değeri arttıkça sistemin toplam soğurma piki daha büyük enerji (maviye-kayma) seviyelerine doğru kaydığı ve maksimum pik yüksekliğinin ise azaldığı görülmektedir. Soğurma pikinin yüksek enerjilere doğru kaymasının ana nedeni optik geçişlerin gerçekleştiği en düşük iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının manyetik alan ile artmasıdır. Bu enerji artışının ana nedeni bir önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Soğurma pikinin maksimum yüksekliğindeki artış ise dipol moment matris elemanındaki azalıştan kaynaklanmaktadır.

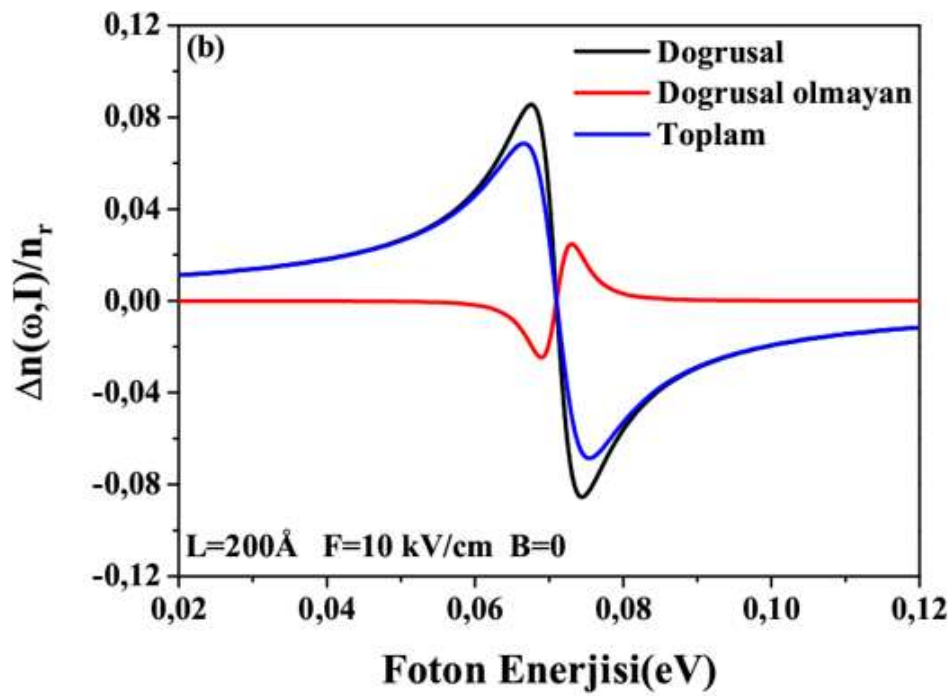
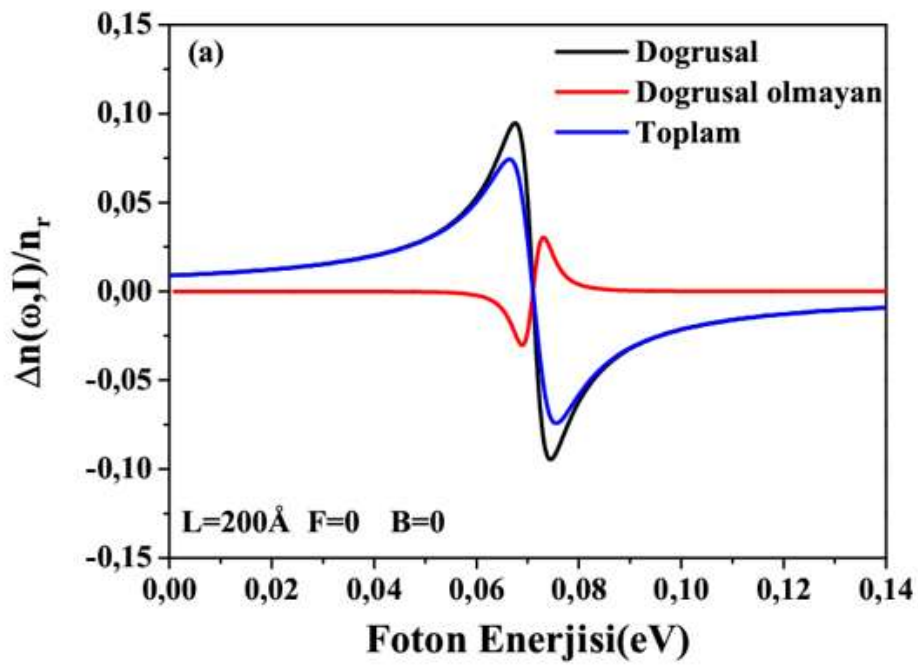


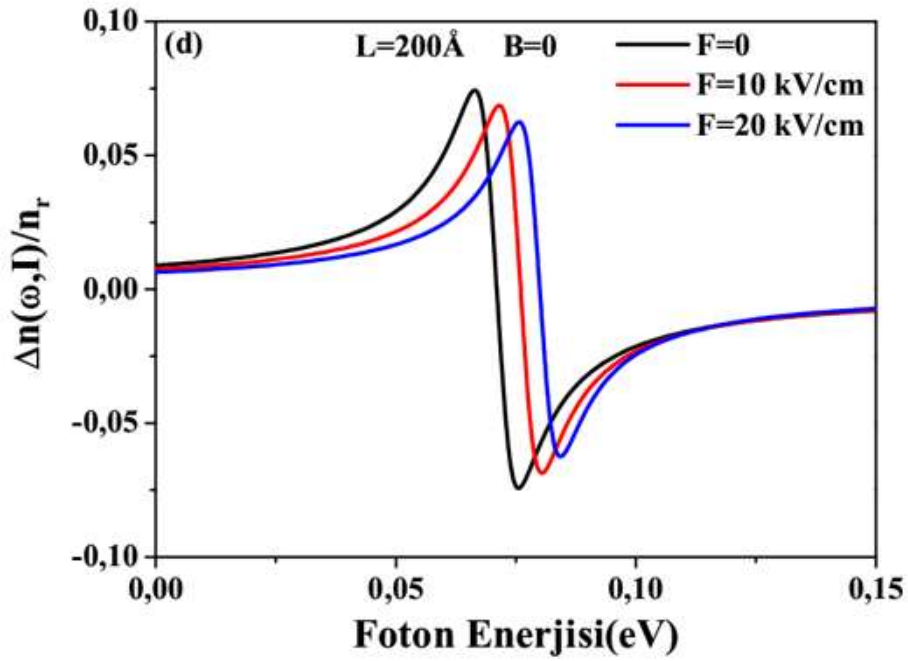
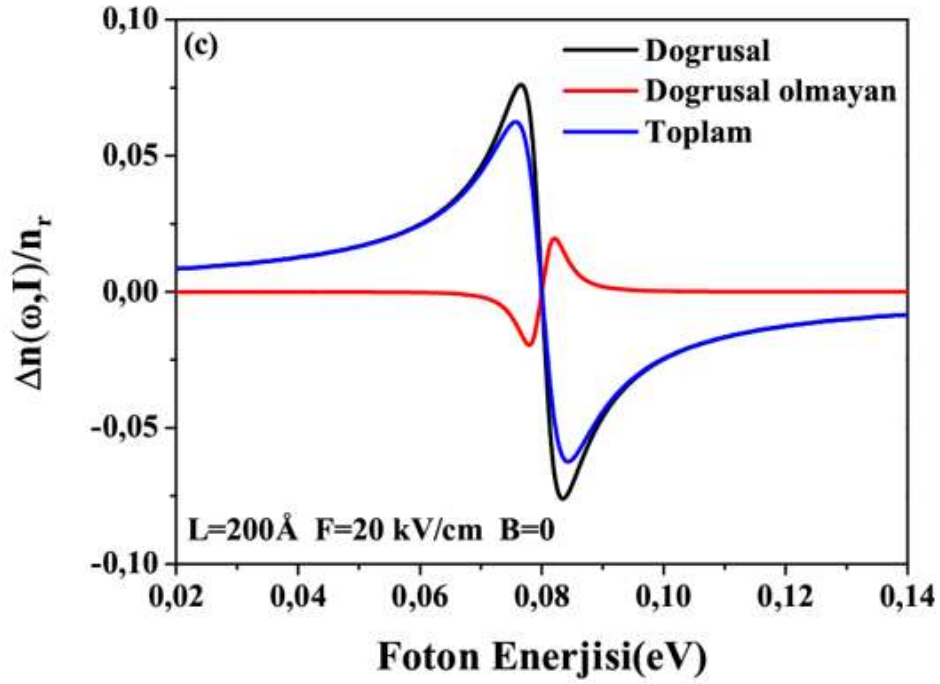


**Şekil 6.4** Yarım V şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>As<sub>0.3</sub>Al tek kuantum kuyusunun farklı kuyu genişliklerine karşılık gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak kırılma indisinin değişimi.



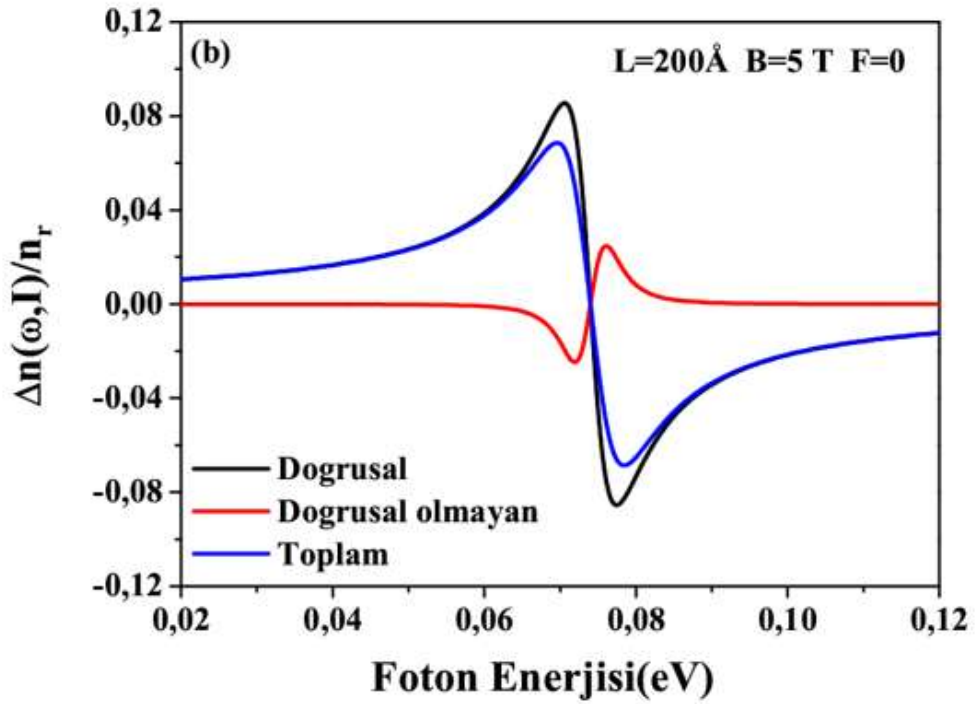
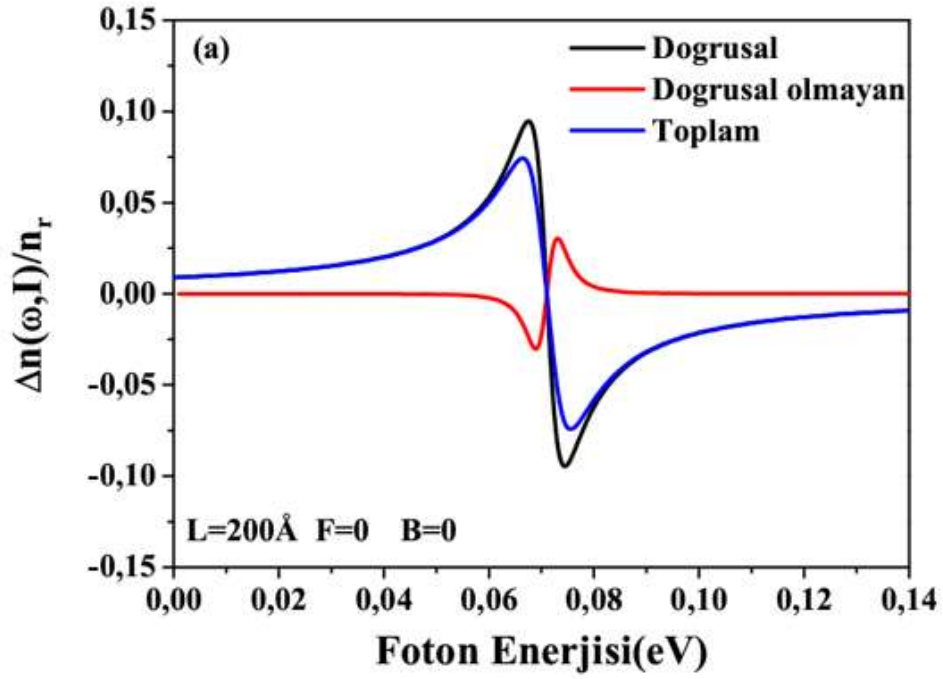
Herhangi bir elektromanyetik alan etkisi olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>Al tek kuantum kuyu sisteminin bağıl kırılma indisi değişimi üzerine etkin kuantum kuyu genişliğinin etkisi şekil 6.4(a,b,c,d) de gösterilmiştir. Bu şekillerden de açıkça görüldüğü üzere kuantum kuyu genişliği arttıkça toplam bağıl kırılma indisi değişimi düşük enerjilere doğru kaymaktadır. Bu enerji kaymasının fiziksel nedeni şöyledir; etkin kuantum kuyu genişliği artırıldığı zaman optik geçişlerin gerçekleştiği ilk iki enerji seviye kuantum kuyusunun tabanına doğru yaklaşmakta ve aralarındaki enerji farkı azalmaktadır. Optik geçişlerin olduğu enerji düzeyleri arasındaki enerji farkının azalması toplam bağıl kırılma indisini düşük enerjilere doğru kaydırmaktadır. Ayrıca bu şekillerden toplam bağıl kırılma indisinin genliğinin de artan kuantum kuyu genişliği ile arttığı açıkça görülmektedir. Bu genlik artışı ise dipol matris elemanlarındaki değişimden kaynaklanmaktadır.

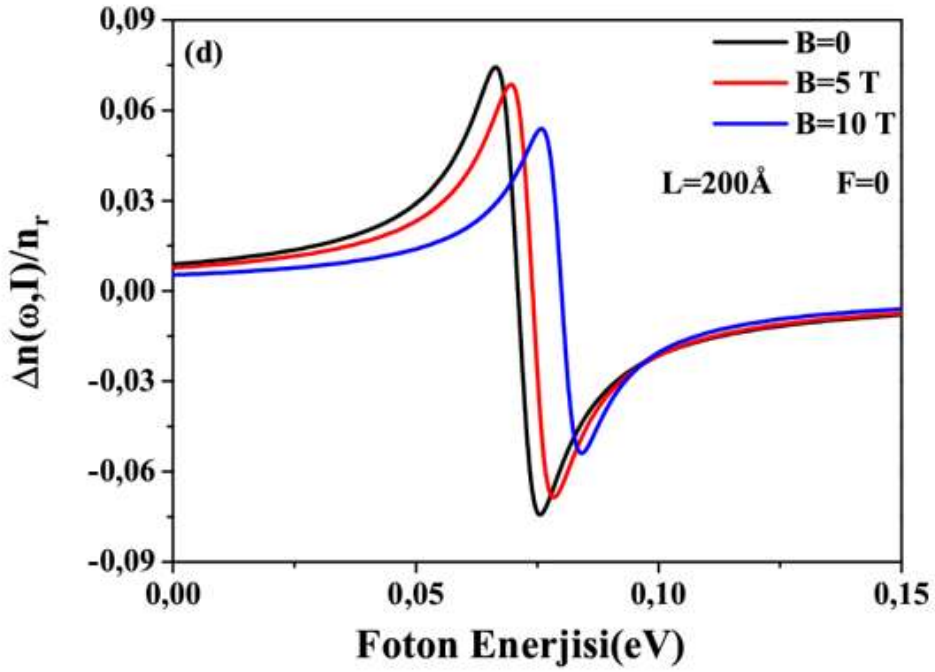
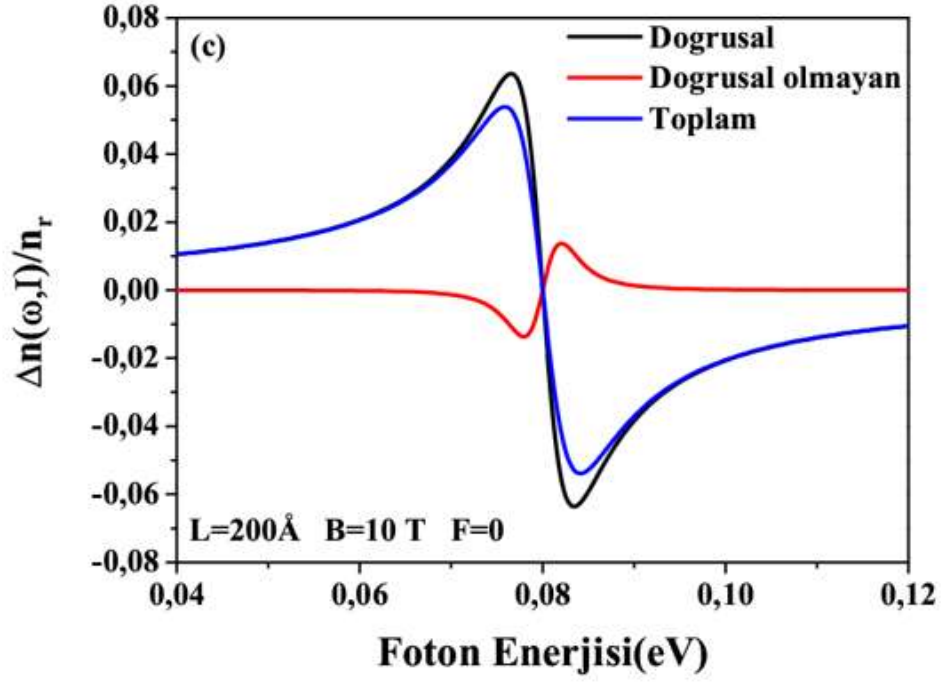




**Şekil 6.5** Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As kuantum kuyusu üzerine büyütme doğrultusunda uygulanan üç farklı statik elektrik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak bağıl kırılma indisinin değişimi.

Şekil 6.5(a,b,c)'deki ilk üç grafikte manyetik alan olmadan yarım V şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı elektrik alan büyüklüğü ( $F=0, F=10\text{kV/cm}, F=20\text{kV/cm}$ ) için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam bağıl kırılma indisinin değişimleri, şekil 6.5(d)'deki son grafikte ise yapının büyütme doğrultusuna paralel uygulanan üç farklı statik elektrik alan değeri için toplam kırılma indisi değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.5(d)'de görüldüğü gibi yarım V-şekilli kuantum kuyusuna etki eden elektrik alan şiddeti arttıkça kırılma küçük enerji değerlerine doğru kaymaktadır. Ayrıca toplam kırılma pikinin maksimum yüksekliği de çok az miktarda azaldığı gözlenmiştir. Optik kırılma piklerindeki enerji kaymasının temel sebebi; sistemin büyütme doğrultusunda uygulanan statik elektrik alanın, yapının kuşatma potansiyelinde bir bükülmeye neden olarak yük taşıyıcılarını alana zıt yönde sürüklenmesine neden olması sonucundaki optik geçişlerin gerçekleştiği en düşük iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının azalmasıdır.





**Şekil 6.6** Yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı statik manyetik alan değeri için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimi.

Şeki 6.6(a,b,c)'deki ilk üç grafik dış bir statik elektrik alan olmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0,7</sub>Al<sub>0,3</sub>As tek kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna dik uygulanan üç farklı manyetik alan büyüklüğü (B=0,B=5T,B=10T) için gelen foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak doğrusal, doğrusal olmayan ve toplam bağıl kırılma indisinin değişimleri, şekil 6.6(d)'deki son grafikte ise yapının büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan üç farklı manyetik alan değeri için toplam bağıl kırılma indisi değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.6(a,b,c)'de görüldüğü gibi yapıya uygulanan statik manyetik alan değeri büyütüldüğünde doğrusal olmayan optiksel kırılma indisinin gittikçe küçüldüğü görülmektedir. Buna bağlı olarak da toplam optiksel kırılma indisiiyle doğrusal optiksel kırılma indisii arasındaki büyüklük farkı azalmaktadır. Şekil 6.6(d)'de ise statik manyetik alan büyüklüğünün artırılması ile toplam optiksel kırılma indisinin genliğinin azaldığı ve tepe pozisyonlarının büyük enerjilere doğru (maviye\_ kayma) kaydığı görülmektedir. Bu pik pozisyonlarındaki genlik küçülmesi ve yüksek enerjilere doğru koymasının fiziksel nedeni optiksel soğurma katsayısının değişiminde açıklanmıştır.

## 7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, ilk olarak dışardan herhangi bir dış elektromanyetik alan uygulanmaksızın yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyu sisteminin yapı parametreleri (kuantum kuyu genişliği gibi) değiştirilerek kuşatma potansiyelleri, altbant enerji değerleri ve bu enerji seviyelerine karşılık gelen dalga fonksiyonlarının karesi incelenmiştir. Daha sonra ise, büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alan ve büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alanın sistemin elektronik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Böylece yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyusunun taban durum ( $E_1$ ), birinci uyarılmış enerji seviyesi ( $E_2$ ) ve bu iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $\Delta E$ ) yine yapı parametrelerine, büyütme yönünde uygulanan statik elektrik alan değerine ve büyütme yönüne dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alan değerlerine göre değişimi incelenmiş ve yorumlanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda şu sonuçlar elde edilmiştir:

(i) Dış statik elektrik ve manyetik alanın etkisi olmadan yapıda kuantum kuyu genişliği artırıldığında, kuantum kuyusunda kuşatılmış olan taşıyıcıların taban durum ve birinci uyarılmış durum enerjileri daha düşük enerji seviyelerine doğru kaydığı görülmüştür. Sistemin altbant enerji farklarına baktığımızda ise taban ve birinci uyarılmış durum enerji seviyeleri arasındaki enerji farkının büyük kuantum kuyu değerlerinde birbirine tamamen yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca dar kuantum kuyularındaki taban ve birinci uyarılmış durum dalga fonksiyonlarının bariyer malzemesine doğru sızmaları, geniş kuantum kuyularında tamamen ortadan kalkarak parçacıkların kuantum kuyu malzemesi için de kuşatıldıkları da açıkça görülmüştür.

(ii) Dışardan herhangi bir statik manyetik alan etkisi olmadan, büyütme doğrultusuna paralel uygulanan statik elektrik alan etkisi ile sistemde kuşatılmış elektronlar alana zıt yönde sürüklenerek kuşatma potansiyelinin bükülmesine ve kuşatılmış taşıyıcılar artasındaki enerji farkının artmasına neden olmuştur.

(iii) Dışardan herhangi bir statik elektrik alan etkisi olmadan büyütme doğrultusuna dik doğrultuda uygulanan statik manyetik alan sisteme ek bir kuşatma sağlayarak taşıyıcıların tamamen kuantum kuyusu içinde kuşatılmasına neden olduğu görülmüştür. Bu ek geometrik kuşatma etkisi ile en düşük ilk iki altbant enerji seviyelerinin daha büyük enerjilere doğru kaydığı ve bu enerji seviyeleri arasındaki enerji farkının arttığı görülmüştür.

Tezimizin ikinci kısmında ise, dördüncü bölümde elde edilen optiksel soğurma katsayısı ve bağlı kırılma indisi değişimi denklemlerini kullanarak ve beşinci bölümde hesaplanan yapının enerji özdeğer ve özfonksiyonlardan yararlanarak yarım V-şekilli



GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> sisteminin doğrusal olmayan optiksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar şu şekildedir:

(iv) Dışarıdan herhangi bir elektrik ve manyetik alan etkisi olmaksızın yarım V- şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As tek kuantum kuyu sisteminin farklı kuantum kuyu genişlikleri için toplam soğurma katsayısına (bağıl kırılma indisi değişimlerine) baktığımızda kuantum kuyu genişliğini artırdığımızda toplam soğurma pikinin (bağıl kırılma indisi değişim pikinin) tepe noktası daha düşük enerji seviyelerine doğru kayarak (kırmızıya kayma) toplam genliğin azaldığı görülmüştür. Bu kırmızıya kaymanın fiziksel nedeni, izinli optik bir geçişin gerçekleştiği ardışık enerji seviyeleri ( $E_{21}$ ) arasındaki enerji farkının kuantum kuyu genişliği ile azalmasından kaynaklandığı görülmüştür.

(v) Dış bir statik manyetik alan olmadan büyütme doğrultusunda uygulanan üç farklı statik elektrik alan değerinin toplam soğurma ve kırılma indisi değişimi üzerine olan etkisini incelediğimizde, statik elektrik alan değerini artırdığımızda soğurma pikleri ve kırılma piklerinin çok az da olsa küçük enerji seviyelerine doğru kaydığı görülmüştür. Bu piklerdeki enerji kaymasının ana nedeni, sistemin büyütme doğrultusunda uygulanan statik elektrik alan yapının kuşatma potansiyelinde bir bükülmeye neden olarak yük taşıyıcılarını alana zıt yönde sürüklenmesine neden olmasıdır. Soğurma katsayısı ve kırılma indisi pikinin maksimum yüksekliğindeki azalışın nedeni ise doğrusal, doğrusal olmayan optik özelliklerini hesapladığımız denklemlerdeki matris elemanlarının büyüklüklerinden kaynaklandığı görülmüştür.

(vi) Dış bir statik elektrik alan olmadan büyütme doğrultusuna dik yönde uygulanan üç farklı manyetik alan değerinin toplam soğurma katsayısı ve kırılma indisi değişimi üzerine olan etkisini incelediğimizde, statik manyetik alan büyüklüğünün artırılması ile toplam optiksel soğurma katsayısının ve kırılma indisinin genliğinin arttığı ve tepe pozisyonlarının düşük enerjilere (kırmızı\_ kayma) doğru kaydığı görülmüştür. Statik manyetik alan değeri büyütüldüğünde doğrusal olmayan optiksel kırılma indisinin gittikçe küçüldüğü görülmektedir. Buna bağlı olarak da toplam optiksel kırılma indisiyle doğrusal optiksel kırılma indisi arasındaki büyüklük farkı azaldığı görülmüştür. Statik manyetik alan büyüklüğünün artırılması ile toplam optiksel kırılma indisinin genliğinin arttığı ve tepe pozisyonlarının büyük enerjilere doğru (maviye kayma) kaydığı görülmektedir. Bu kaymanın nedeni, manyetik alan değerinin artması ile taban ve birinci uyarılmış enerji seviyesi arasındaki enerji farkının ( $E_{21}$ ) artmasından kaynaklanmaktadır. Soğurma katsayısının ve kırılma indisinin genliğinin artması ise ( $M_{12}$ ) dipol moment matris elemanının büyüklüğünün artmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Sonuç olarak yapı parametrelerinin ve dış alanların ( elektrik ve manyetik alan) sistemin optiksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemiş olduğu görülmüştür. Bu etkiler sayesinde yarım V-şekilli GaAs/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub> tek kuantum kuyu sisteminin daha geniş bir optiksel davranış skalası içinde olacağı görülmüştür. Elde edilen bu sayısal sonuçların bu konuda yapılmış deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılması ve opto-elektronik aygıtların (dedektör) tasarımları için önemli ölçüde literatüre katkıda bulunacağı beklenmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] R. L. Greene ,K.K. Bajaj, D.E. Phelps. Phys. Rev. B,29 (1984),p. 1807.
- [2] N. E. Kaputkina,Yu.E.Lozonek Physica E,12(2002),p.323.
- [3] C. L. Beltran Rios,N.Porras-Mantenegro Phys. Rev. B,68(2003), p. 155316.
- [4] T. Yoshioka, K.Asamo Phys.Rev. B, 86 (2012), P. 115314.
- [5] M. Dvorak, S.H.Wei.Z. Wu Phys. Rev. Lett., 110 (2013),pç 016402
- [6] E.C. Niculescu, L. M. Burileanu, A. Radu, Seperlatt. Microstruc.44 (2008) 173.
- [7] A.Radu, E.C.Niculescu, M. Cristea, J. Optoelectron.Adv.Mater. 10(2008)2555
- [8] L.M. Burileanu, E.C.Niculescu,N.Eseanu,A.Radu,Physica E 41 (2009) 856.
- [9] E.Ozturk,I.Sokmen,Journal of Luminescence 134 (2013) 42-48.
- [10] İ.Karabulut,H.Şafak,M.Tomak *Solid State Commun.*, 135 (2005),p.735.
- [11]R.-Z.Wang,K.-X.Guo,Z.-L.Liu,B.Chen,Y.-B.Zheng,Phys.Lett.A,373(2009),p.795.
- [12] S.Shao,K.-X.Guo,Z.-H.Zhang,N.Li,C.Peng *Solid State Commun.*, 151 (2011),p.289.
- [13] H.Yıldırım,M.Tomak *Phys.Stat.Sol.(B)*, 243 (2006),p.4057.
- [14] İ.Karabulut,M.E.Mora-Ramos,C.A.Duque,J.Lumin. 131 (2011) 1502.
- [15] J.C.Martinez-Orozco,M.E.Mora-Ramos,C.A.Duque,J.Lumin. 132 (2012) 449.
- [16] E.Ozturk,I.Sokmen,*Optics Commun.* 285 (2012) 5223.
- [17]Köksal,F.,Altunbaş,M.,Başaran,E., *Katıhal Fiziği, Literatür Yayıncılık*, İstanbul,ISBN 975-7860-93.
- [18]Aydın,F. (2012). Yarı Parabolik Kuantum Kuyusunda Safsızlık Düzeyleri ve Özkutuplanma.*Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,(Yüksek Lisans Tezi)*.Sivas
- [19]Jhon,W., ve oğl.(1976).Intraduction to solid state physica .5th ed.,New York
- [20]Aydınoğlu,H.S.(2018) Asimetrik Çift Eğimli Kuantum Kuyusunun Optik Özellikleri .*Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,(Yüksek Lisans Tezi)*.Sivas.
- [21]AL, E. B. (2014). GaInNas/GaAs Kuantum Kuyularında Hidrojenik Düzeyler Arasında Kızılötesi Geçişler.*Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,(Yüksek Lisans Tezi)*.Sivas.
- [22]Kittel.C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş* Omar,M.A., (1993). Elementary Solid State Physics,Addison-Wesley
- [23]Yıldız,Y.E.(2015). Safsızlık Düzeyleri Arındaki Kızılötesi Geçişler Üzerine Elektrik Alan Etkisi.*Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,(Yüksek Lisans Tezi)*.Sivas

- [24]**Smith,W.T.**,Principles of Materials Science and Engineering ,**McGraww-Hill**,(1990) .Inc.,USA
- [25]**Dikici,M.**,(1993).Katihal Fiziğine Giriş.*Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları*.Samsun.Türkiye
- [26] **Smith,W.T.**,Principles of Materials Science and Engineering ,**McGraww-Hill**, (1993). Inc.,USA
- [27]**Akçay,N.**(2008). Kuantum Nokta Temelli Bellek Aygıtlar. *İstanbul Üniversitesi* ,(Doktora Tezi).İstanbul.
- [28]**Üstün,T.**(2011). Kuantum Nokta Temelli Bellek Yapılarda Kuantum Noktalarının Elektronik Yapısının Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi ile Belirlenmesi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,(Yüksek Lisans Tezi).Ankara.
- [29]**Kızılet,A.**(2012). Düşük Boyutlu Yarıiletken Yapılara Manyetik Alanın Etkisi.*Trakya Üniversitesi ,Fen BilimleriEnstitüsü* ,(Yüksek Lisans Tezi).Edirne.
- [30]**Atasever,K.**(2007).Silindirik Kuantum Kuyusunda Dilektrik Sabiti Uyuşmazlığının Hidrojenik Safsızlık Bağlanma Enerjisine Etkileri.*Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* ,(Yüksek Lisans Tezi).Sivas.
- [31]**Kılıçoğlu,Ö.**(2008). Kuantum Noktalarının Elektrik Ve Manyetik Alan Altında Elektronik Özellikleri.*Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,(Yüksek Lisans Tezi).Edirne.
- [32]**Çakıcı,M.S.**(2013). Elektrik Alan Etkisi Altında Çoklu Kuantum Kuyu Yapılarının Optiksel Özellikleri.*Selçuk Üniversitesi.Fen Bilimleri Enstitüsü*,(Yüksek Lisans Tezi).28s,Konya.
- [33]**Jaros,M.**(1989). Physics and Applications of Semiconductor Heterostructures *Oxford University Press*.New York.
- [34]**AdiyamaN,R.**(2013). GaAs/GaAlAs Kuantum Kuyusu ,*Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (Yüksek Lisans Tezi),Edirne
- [35]**Boz,F.K.**(2005). Düşük Boyutlu Yapılarda Yabancı Atom Problemi ve Eksitonlar,*Trakya Üniversitesi,Doktora Tezi* ,Edirne.
- [36]**Koç,F.**(2013).Tip-II Yarıiletken Kuantum Nokta Nanokristallerinde Eksitonlar,(Yüksek Lisans Tezi),Konya
- [37]**Doğan,E.**,(2014).Disk Biçimli Kuantum Nokta Yapıların Elektronik Özellikleri,(Yüksek Lisans Tezi),Konya(2014).
- [38]**Boyd,R.W.** (1992).Nonlinear Optics, *Academic Press,Inc.*,Boston
- [39]**Carney,H.**, (2001).Characterization of on Ultrafast Optical Parametric Amplifier System,Class of 2001 Seni or Thesis
- [40]**Zhang, J. Y., Huaq , J.Y. and Shen, Y. R.**, (1995).Optical Paramtric Generation and Amplification,Laser Science and Teknology an İnternational Hand book,*Harwod Academic Publishers* 19

- [41]**Ungan,F.**(2011).Intensity-dependent nonlinear optical properties in a modulation-doped single quantum well.*Journal of Luminescence* 131 (2011) 2237-2243
- [42]**Karabulut,İ.**(2008).Asimetrik Kuantum Kuyu Yapılarının Lineer Olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi.*Selçuk Üniversitesi.Fen Bilimleri Enstitüsü,(Doktora Tezi).*17s,Konya.
- [43]**Boyd,R.W.**(2003).Nonlinear Optics.*Akademic Press,San Diego.*
- [44]**Küçük,S.**(2013).Yarı Parabolik Kuantum Kuyusunda Lineer ve Lineer Olmayan Optik Özelliklerin İncelenmesi.*Harran Üniversitesi.Fen Bilimleri Enstitüsü,(Yüksek Lisans Tezi).*20s,Şanlıurfa.



## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Sibel ALİM
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas/Şarkışla 07.02.1983
Medeni Hali	Evli
İletişim Adresi	Kümbet Mah. 20.sok Mercan 22 apt. K:2 D:3 SİVAS
E-Posta Adresi	<a href="mailto:sblazzraakf@gmail.com">sblazzraakf@gmail.com</a>

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Şarkışla Lisesi, 2000
Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2017
Pedagojik Formasyon	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2016
Yüksek Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2019