



T.C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK VE EĞİK MANYETİK ALAN ALTINDA ÇOKLU
GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK VE
OPTİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

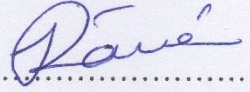
VELİ AKTAŞ
(201592031013)

Fizik Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı:Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

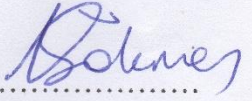
SİVAS
AĞUSTOS 2019

VELİ AKTAŞ' ın hazırladığı ve “ELEKTRİK VE EĞİK MANYETİK ALAN ALTINDA ÇOKLU GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından FİZİK ANA BİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

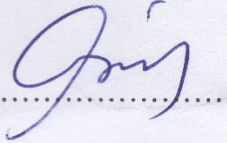
Tez Danışmanı **Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi


.....

Jüri Üyesi **Prof. Dr. İsmail SÖKMEN**
Dokuz Eylül Üniversitesi


.....

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi


.....

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Özlem Pelin CAN
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 F-579 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

©VELİ AKTAŞ, 2019

Şimdi aramızda olsaydı en çok gururlanacak olan canım Babam Kadir AKTAŞ' a

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönergede)'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 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 veya bir başka üniversitede bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

26.08.2019

VELİ AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aŐamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR' a çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan canım annem Fadime AKTAŞ' a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalıŐmam boyunca çok sabır gösteren ve birlikte geçireceğimiz değerli zamanlarından feda eden hayat arkadaŐım eŐim Cennet AKTAŞ' a, çocuklarım İclal F. AKTAŞ' a, Kadir AKTAŞ' a ve Elfin B. AKTAŞ' a sonsuz teşekkür ederim.



ÖZET

ELEKTRİK VE EĞİK MANYETİK ALAN ALTINDA ÇOKLU GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

Veli AKTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

2019, 85+xvii sayfa

Bu çalışmada elektrik ve eğik manyetik alan altında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunun elektronik ve optik özellikleri incelendi. Etkin kütle yaklaşımı kullanılarak sistemi tanımlayan Schrödinger denkleminin analitik çözümü yapıldı. Elektrik ve eğik manyetik alan altındaki sistemin elektronik altbandlararası enerji geçişleri için kompakt yoğunluk matris yaklaşımıyla soğurma katsayıları (lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam) hesaplandı. Sistem üzerine gönderilen ışık şiddetinin büyüklüğü değiştirilerek doyma (saturasyon) yoğunluğu incelendi.

Anahtar Kelimeler: Çoklu (Beş) Kuantum Kuyusu, Eğik Manyetik Alan, Elektrik Alan, Altbandlararası Geçiş, Soğurma Katsayısı, Saturasyon Yoğunluğu.

ABSTRACT

ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF MULTIPLE QUANTUM WELLS GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs UNDER EXTERNAL ELECTRIC AND TILTED MAGNETIC FIELDS

Veli AKTAŞ

Master of Science Thesis

Department of Physics

Supervisor: Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

2019, 85+xvii pages

In this study, the electronic and optical properties of five quantum wells in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs semiconductor heterostructure under external electric and tilted magnetic fields have been investigated. The analytical solution of the Schrödinger equation describing the system has been made by using the effective mass approach. The absorption coefficients (linear, third-order nonlinear and total) for intersubband electronic energy transitions of the system under external electric and tilted magnetic fields have been calculated by using the compact density-matrix approach. The saturation intensity has been investigated by changing the light intensity sent to the system.

Key Words: Multiple (Five) Quantum Wells, Tilted Magnetic Field, Electric Field, Intersubband Transition, Absorption Coefficient, Saturation Intensity.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Yarıiletkenler.....	6
2.2.1. Yarıiletkenlerin band yapısı ve saf yarıiletkenler	7
2.2.2. Katkılı yarıiletkenler	9
2.3. Heteroyapılar ve Kuantum Kuyuları	11
2.3.1.Heteroyapılar	11
2.3.2.Kuantum kuyu yapısı.....	12
2.3.3.Düşük boyutlu yarıiletken yapılarda optik geçişler.....	15
3. HESAPLAMALAR	18
3.1. GaAs/Ga _{1-x} Al _x As Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyunun Schrödinger Denklemine Analitik Çözümü.....	18
3.2. Çoklu Kuantum Kuyularında Geçiş Matrisleri Yöntemi	25
4. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs YARIİLETKEN HETEROYAPIDAKİ BEŞ KUANTUM KUYUSUNUN OPTİK ÖZELLİKLERİ	34
4.1. Elektrik ve Eğik Manyetik Alan Altındaki Kuyu Parametrelerindeki Değişimler	34
4.2. GaAs/Ga _{1-x} Al _x As Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyusu İçin Elektronik Enerji Spektrumu.....	36
4.3. Eğik Manyetik Alan Altında Beş Kuantum Kuyusuna Elektrik Alan Uygulanmasıyla Elektronik Enerji Spektrumunda Oluşan Değişimler.....	48
4.4. Eğik Manyetik Alan ve Elektrik Alan Altındaki GaAs/Ga _{1-x} Al _x As Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyusundaki Altbandlararası Soğurma Katsayıları	53
4.5. Eğik Manyetik Alanın Optik Soğurma Katsayıları Üzerindeki Etkisi.....	54

4.6. Manyetik Alanın Eğiklik Açısının Optik Soğurma Katsayılarına Etkisi	57
4.7. Elektrik Alanın Optik Soğurma Katsayıları Üzerindeki Etkisi	60
5. TEK-TEK VEYA ÇİFT-ÇİFT ENERJİ SEVİYELERİ ARASINDAKİ GEÇİŞLER	68
6. IŞIK ŞİDDETİNE BAĞLI OLARAK TOPLAM SOĞURMA KATSAYISI ÜZERİNDE OLUŞAN SATURASYON DURUMU	74
7. SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	84



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Oda sıcaklığında iletken, yalıtkan ve yarıiletken maddelerin band yapısı.	7
Şekil 2.2	Yarıiletkenlerin öz dirençlerinin (ρ) sıcaklıkla (T) ile değişim grafiği.	8
Şekil 2.3	Elektron ve hollerin elektrik alan altındaki davranışı.	9
Şekil 2.4	n-tipi ve p-tipi katkı yarıiletkenlerin enerji band diyagramı.	11
Şekil 2.5	Elektronun serbestlik derecesine göre kuantum yapıları.	12
Şekil 2.6	Farklı yapıdaki yarıiletkenlerle oluşturulan heteroyapıdaki kuantum kuyusu.	13
Şekil 2.7	GaAs/Ga _{1-x} Al _x As yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusunun band diyagramı ve kesikli enerji düzeylerinin şematik olarak gösterimi.	13
Şekil 2.8	GaAs/Ga _{1-x} Al _x As yarıiletken heteroyapıdaki iki kuantum kuyusunun (a) z-doğrultusunda oluşturulan yapısı (b) şematik olarak gösterimi.	14
Şekil 2.9	Farklı yarıiletkenlerin z- doğrultusunda büyütülmesiyle oluşan süperörgülerin band diyagramı.	15
Şekil 2.10	Yarıiletken malzemelerde bandlar arası geçişlerin şematik gösterimi.	16
Şekil 2.11	Yarıiletken malzemelerde iletim bandında altbandlararası optik geçiş.	17
Şekil 3.1	Eğik manyetik alan ve z- doğrultusunda uygulanan elektrik alan altındaki kuantum kuyusu.	18
Şekil 3.2	L kuyu genişlikli tek kuantum kuyusu ($z_L=0$ ve $z_R=L$).	19
Şekil 3.3	x-y-z düzleminin y- eksenini etrafında θ açısı yaparak döndürülmesi.	20
Şekil 3.4	Yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyulu yapının katsayılar cinsinden gösterimi.	25
Şekil 4.1	GaAs/Ga _{1-x} Al _x As yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunun şematik gösterimi.	34
Şekil 4.2	Farklı manyetik alan değerleri için etkin potansiyel yüksekliğinin açığa bağlı değişimi.	35
Şekil 4.3	Farklı manyetik alan değerleri için etkin kuyu genişliğinin açığa bağlı değişimi.	36
Şekil 4.4	B=10 T manyetik alan, $\theta=45^\circ$ ve elektrik alan değeri F=0 iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	38
Şekil 4.5	B=10 T manyetik alan, $\theta=60^\circ$ ve elektrik alan değeri F=0 iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	38
Şekil 4.6	B=10 T manyetik alan, $\theta=75^\circ$ ve elektrik alan değeri F=0 iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	39
Şekil 4.7	Kuyu merkezi $z_0' = 0$ 'a göre potansiyel profilinin (a) pozitif ve (b) negatif yönde kayması.	41
Şekil 4.8	F=30 kV/cm elektrik alan altında kuyu merkezi potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ ve $z_0' = 1,66$ 'a göre (b) $z_0' = 0$ ve $z_0' = -1,66$ 'a göre kayması. ...	42
Şekil 4.9	F=-30 kV/cm elektrik alan altında kuyu merkezi potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ ve $z_0' = 1,66$ 'a göre (b) $z_0' = 0$ ve $z_0' = -1,66$ 'a göre kayması. ...	43
Şekil 4.10	B=15 T manyetik alan, $\theta=45^\circ$ ve elektrik alan değeri F=0 iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	44

Şekil 4.11	B=15 T manyetik alan, $\theta=60^0$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	45
Şekil 4.12	B=15 T manyetik alan, $\theta=75^0$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	45
Şekil 4.13	B=20 T manyetik alan, $\theta=45^0$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	46
Şekil 4.14	B=20 T manyetik alan, $\theta=60^0$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	46
Şekil 4.15	B=20T manyetik alan, $\theta=75^0$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	47
Şekil 4.16	B=10 T, $\theta=45^0$ ve $F=30$ kV/cm iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	48
Şekil 4.17	B=10 T, $\theta=60^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	49
Şekil 4.18	B=10 T, $\theta=75^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	49
Şekil 4.19	B=15 T, $\theta=45^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	50
Şekil 4.20	B=15 T, $\theta=60^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	50
Şekil 4.21	B=15 T, $\theta=75^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	51
Şekil 4.22	B=20 T, $\theta=45^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	51
Şekil 4.23	B=20 T, $\theta=60^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	52
Şekil 4.24	B=20 T, $\theta=75^0$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.	52
Şekil 4.25	Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik dalgaların sahip olduğu enerjileri ve dalga boylarına göre gösterimi.	54
Şekil 4.26	$F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 45^0 eğiklik açısı için B=10T, 15T ve 20T manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	55
Şekil 4.27	$F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 60^0 eğiklik açısı için B=10T, 15T ve 20T manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	55
Şekil 4.28	$F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 75^0 eğiklik açısı için B=10T, 15T ve 20T manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	56
Şekil 4.29	$F=0$ elektrik alan ile B=10 T manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	58

Şekil 4.30	F=0 elektrik alan ile B=15 T manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	58
Şekil 4.31	F=0 elektrik alan ile B=20 T manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.	59
Şekil 4.32	B=10 T manyetik alan ve 45 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	60
Şekil 4.33	B=10 T manyetik alan ve 60 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	61
Şekil 4.34	B=10 T manyetik alan ve 75 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	61
Şekil 4.35	B=15 T manyetik alan ve 45 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	62
Şekil 4.36	B=15 T manyetik alan ve 60 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	62
Şekil 4.37	B=15 T manyetik alan ve 75 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	63
Şekil 4.38	B=20 T manyetik alan ve 45 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm ² elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	63
Şekil 4.39	B=20 T manyetik alan ve 60 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	64
Şekil 4.40	B=20 T manyetik alan ve 75 ⁰ açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.	64
Şekil 4.41	Elektrik ve eğik manyetik alanın artışına bağlı olarak 1-2 enerji seviyeleri arasındaki enerji farkının (ΔE) manyetik alanın x- eksenine göre değişimi.	66
Şekil 5.1	B=10 T manyetik alan ve F=0 elektrik alan altında $\theta=45^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.	68
Şekil 5.2	B=10 T manyetik alan ve F=0 elektrik alan altında $\theta=60^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.	69
Şekil 5.3	B=10 T manyetik alan ve F=0 elektrik alan altında $\theta=75^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.	69
Şekil 5.4	B=10 T manyetik alan ve F=30 kV/cm elektrik alan altında $\theta=45^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.	70

Şekil 5.5	B=10 T manyetik alan ve F=30 kV/cm elektrik alan altında $\theta=60^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.....	70
Şekil 5.6	B=10 T manyetik alan ve F=30 kV/cm elektrik alan altında $\theta=75^0$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.....	71
Şekil 5.7	Eğik manyetik alan altında beş kuantum kuyusunun farklı elektrik ve eğiklik açısı altında 2-3 enerji geçişleri için enerji seviyeleri arasındaki farkın (ΔE) eğiklik açısına (θ) bağlı değişimi.	72
Şekil 6.1	F=0 elektrik alan, B=20 T manyetik alan ve 45^0 açı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.	75
Şekil 6.2	F=0 elektrik alan, B=20 T manyetik alan ve 60^0 açı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.	75
Şekil 6.3	F=0 elektrik alan, B=20 T manyetik alan ve 75^0 açı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.	76
Şekil 6.4	1-2 enerji geçişleri için saturasyon yoğunluğunun manyetik alan ve eğiklik açısına göre değişimi.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge-1	Kuantum sınırlamanın serbestlik derecesinin boyuta karşı değişimi.....	2
Çizelge-2	Manyetik alan, elektrik alan ve eğiklik açısına göre 1-2 enerji geçişleri için ΔE büyüklükleri.	56
Çizelge-3	1-2 enerji geçişi için saturasyon yoğunluğunun manyetik alan ve eğiklik açısına bağlı olarak değişimi.....	77



SİMGELER DİZİNİ

- a_H ; Manyetik Uzunluk = $(\sqrt{\frac{\hbar}{\mu\omega}})$ (Å)
- $\vec{A}(\vec{r})$; Vektör Potansiyeli
- c ; Işık Hızı = $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s
- e ; Elektron Yükü = $-1.602 \cdot 10^{-19}$ C
- E_a ; Alıcı Enerji Aralığı
- E_d ; Verici (Donör) Enerji Aralığı
- E_g ; Yasaklı Band aralığı
- I ; Işık Şiddeti (W/m^2)
- $k_{x,y,z}$; Dalga Vektörü
- m^* ; Elektron Etkin Kütlesi = $m_0 m_e = 0.607607 \cdot 10^{-31}$ kg
- n_R ; Kırıcılık İndisi
- p ; Momentum (kg m/s)
- R ; İletken Direnci (ohm)
- ρ ; Özdireç (ohm m)
- ϵ_0 ; Serbest Uzayın Geçirgenlik Katsayısı = $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ C²/N m²
- \hbar ; Planck Sabiti = $1,05457266 \cdot 10^{-34}$ J.s
- μ ; Sistemin Geçirgenliği
- σ_s ; Elektron Yoğunluğu = $3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³
- Γ_{12} ; Yarılanma Oranı = $1/\tau$ (sn⁻¹) = $1/0.14$ ps⁻¹
- w ; Açısız Frekans (sn⁻¹)
- ω ; Siklotron Frekansı = (eB/m*)

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler optoelektronik özelliklerinden dolayı günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarıiletken elektronik devre elemanlarının nanometre boyutlarında olması nedeniyle çok küçük hacimlere sığdırılabilmesi ve çeşitli devre elemanları yapımı için yarıiletkenlerin yasak bant aralıklarının uygun olması bu tip malzemelere olan ilgiyi oldukça arttırmıştır.

Yarıiletken malzemelerin elektriksel iletkenliği metal ve yalıtkan malzemelerin arasındadır. Yarıiletken malzemelere dıştan sıcaklık, optik uyarma veya katkılama uygulayarak bu malzemelerin iletkenliği değiştirilebilir. Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinin dış etkilerle değiştirilebilir olması özelliği, bu malzemelerin optik cihazlarda kullanılmak istenmesinin nedenlerinden birisidir.

Günümüzde yarıiletken malzemelerin optoelektronik özellikleri yardımıyla bilgisayar, TV, telefon, tablet... vb elektronik cihazlarda kullanılan çipler, kamera, kızılötesi sensörlerin kullanımı artmakta ve her geçen gün bu devre elemanları giderek geliştirilmektedir. Veri depolama olarak kullandığımız CD (Compact Disk), DVD (Digital Versatile Disc) ve lazer yazıcılarda da yarıiletkenlerin optoelektronik özelliklerinden yararlanılmıştır. Buna benzer olarak diyot, LED (Ligt Emitting Diode), güneş pili, fotosel, hareket sensörleri, transistörler, elektron tabancaları vb. gibi elektronik aygıtları, yarıiletkenlerin kullanım alanlarına örnek olarak sayabiliriz.

Yarıiletkenlerin tüm bu özellikleri, bilim adamlarını bu alanda yoğunlaşmaya sevk etmiş ve bu alandaki çalışmalar son yıllarda giderek artmıştır. 1970'lerde Esaki ve Tsu'nun çok kuantum kuyulu süperörgüler üzerine yaptığı çalışma bu alanda yapılan ilk çalışmadır. Daha sonra ise rezonans tünellemesi (Chang ve ark. 1974), transport deneyleri (Esaki ve Chang 1974), optik soğurma ölçümleri (Dingle ve ark. 1974) ve modülasyon katkılama (Dingle ve ark. 1978) sonucunda enerji seviyelerinin kesikli olduğunu deneysel olarak ispatlayan çok sayıda sonuca ulaşılmıştır.

Daha sonraki yıllarda ise çeşitli büyütme teknikleri kullanılarak bu alanda gelişmeler devam etmiştir. Bu büyütme yöntemlerinden bazıları ise, moleküler demet epitaksi (MBE), metal organik kimyasal buhar kaplama (MOCVD), buhar fazı epitaksi (VPE) ve sıvı faz epitaksi (LPE) gibi büyütme teknikleridir. Bu büyütme teknikleri ile iki $Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken malzeme arasına GaAs yarıiletken malzeme eklenerek tekli

kuantum kuyusu, oluşan bu yapıyı periyodik olarak tekrarlayarak çoklu kuantum kuyuları ve iki veya daha fazla malzemenin tabakalar halinde dizilmiş periyodik yapıları olan süperörgüler de elde edilebilir.

Yarıiletken kuantum kuyularında taşıyıcıların (elektronlar) hareketi bir, iki ve üç boyutta sınırlandırılabilir. Yarıiletken malzemedeki yüklü taşıyıcıların tek boyutta kuşatılması (yani iki boyutta serbest hareket etmesi) ile kuantum kuyusu (quantum well), iki boyutta kuşatma (tek yönde hareket) ile kuantum teli (quantum wire) ve üç boyutta kuşatma ile de kuantum noktası (quantum dot) oluşturulmuştur. Kuantum sınırlamanın serbestlik derecesinin boyuta karşı değişim çizelgesi ve oluşabilecek durumlar aşağıda verilmiştir.

Yapı Türü	Kuantum Sınırı	Serbest Boyut
Külçe	Yok	3
Kuantum Kuyu / Süperörgü	1 – D	2
Kuantum Teli	2 – D	1
Kuantum Noktacık / Kutu	3 – D	0

Çizelge-1 Kuantum sınırlamanın serbestlik derecesinin boyuta karşı değişimi.

Çizelge-1, kuantum sınırlaması yapılarak oluşabilecek üç temel kuantum sınırlamalı yapının tipini özet olarak vermektedir. Bu yapılar elektronların bir, iki veya üç boyutta hapsedilip hapsedilmeme durumuna göre sınıflandırılır. Bu yapılar sırasıyla şu şekilde adlandırılır:

- Kuantum kuyular (1-D (bir boyutlu) sınırlama);
- Kuantum teller (2-D sınırlama);
- Kuantum noktacıkları (dotlar) (3-D sınırlama)

Çizelge-1 aynı zamanda sınırlama tipine karşılık gelen serbestlik derecelerini de göstermektedir. Külçe yarıiletkenlerde elektronlar ve holler (elektronun hareket ederek arkasında bıraktığı pozitif yüklü boşluk, delik), her doğrultuda kendi ilgili bandları içinde hareket etmek için serbesttirler ve bu yüzden üç tane serbestlik derecesine sahiptirler. Aksine bir kuantum kuyusundaki elektronlar ve holler bir doğrultuda hapsedilmişlerdir ve bundan dolayı sadece iki tane serbestlik derecesine sahiptirler. Bu, elektronlar ve

hollerin etkin olarak iki boyutlu (2-D) malzemeler gibi davrandıkları anlamına gelir. Benzer şekilde, kuantum noktaları sıfır boyutlu (0-D) ve kuantum telleri bir boyutlu (1-D) malzemelerdir. Bu son nokta, elektronlar ve hollerin tamamen kuantum noktasına lokalize olmaları açısından, bunların her üç boyutta kuantumlu olmaları manasına gelir[1].

Yarıiletkenlerin en önemli özelliği enerji band aralığıdır. Bu enerji band aralığının büyüklüğü yarıiletkenin gelen ışığı soğurması veya enerji tabakaları arasında ışığı yayması sonucunda oluşan ışığın dalgaboyu (λ) ile bulunur. Bu aralık elektromanyetik spektrumda yayılan ışığın kızılötesi, görünür bölge veya morötesi bölgesinde olmasını ifade eder. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusuna dıştan uygulanan elektrik ve manyetik alanın büyüklüğü veya manyetik alanın x-ekseniyle yaptığı açı (eğikliği) değiştirilerek kuantum kuyu parametreleri; kuyu genişliği veya kuyu potansiyel yüksekliği değişir. Buna bağlı olarak da uzaysal kuşatma altındaki enerji altbantlararası aralığı arttırabilir veya azaltılabilir. Bunun sonucunda ise ışığın elektromanyetik spektrumdaki yeri kontrol edilebilir hale gelir. Böylece elektronik araçlarda kullanılmak üzere amaca uygun olarak örneğin ışık yayan diyotlar (LED) ve lazerler elde edilebilir.

Bir yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusuna dıştan elektrik alanın uygulanması iletim (conduction) veya değerlik (valans) bandı içerisindeki kesikli enerji altbandlarının oluşmasına sebep olur. Kuantum kuyu yapısının büyütme doğrultusuna paralel bir manyetik alan uygulandığında elektrik alan ile oluşan her bir altbandın Landau düzeylerine yarılmaya ve kuantize bir sistemin oluşmasına neden olur. Bu durumda manyetik alan ile elektrik alan aynı doğrultudadır. Bunun sonucunda enerji spektrumları ise kesikli ve kuşatılmış elektronların Landau düzeyleri formunda olur. Yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusunun büyütme doğrultusuna manyetik alan dik uygulandığında ise elektron gazı üzerinde kuşatma etkisi olmayacağından dolayı enerji spektrumunda fazla bir değişiklik olmaz, böylelikle manyetik alan sadece altbandlararası optik geçişlerde etkili olur.

Yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyularının büyütme doğrultularına paralel uygulanan elektrik alan ile yine bu doğrultudaki manyetik alanın oluşturduğu sistemi tanımlayan Hamiltoniyen, Landau düzeylerini doğuran manyetik alanı içeren kısım ve altbandları oluşturan elektrik alanı içeren kısım olarak ayrılabilir ve sistemin çözümü olan enerji özdeğerleri kolaylıkla bulunur. Literatürde manyetik alanın büyütme doğrultusuna

dik olduğu kuantum sisteminin Schrödinger denklemi değişkenlerine ayrılarak analitik olarak çözümleri yapılmıştır. Ancak manyetik alanın heteroyapıya eğik uygulanması durumunda Schrödinger denklemi değişkenlerine ayrılamadığından analitik çözüm İ. Sökmen ve ark. [2-5] tarafından yapılan çalışmaya dek bulunamamıştır. Bu yüzden bazı araştırmacılar deneysel sonuçlara yaklaşık durumlar elde etmeye çalışmışlardır[6].

Bu çalışmada ilk olarak, büyütme doğrultusunda uygulanan elektrik alan ve büyütme doğrultusuna dik doğrultu (x eksenini) ile θ açısı yapan eğik manyetik alan altında beş kuantum kuyusundan oluşan GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapı için sistemi tanımlayan Schrödinger denklemi, özel bir ortogonal dönüşüm kullanılarak [2-5] yeni koordinatlar cinsinden çözüldü ve enerji özdeğerleri bulundu. Bu sistemin manyetik alanın farklı değerleri ve x - eksenini ile yaptığı farklı eğiklik açıları (θ) için, elektrik alansız ve 30 kV/cm büyüklüğündeki elektrik alan uygulanarak yörünge merkezine göre elektronik enerji grafikleri çizildi ve yorumlandı.

Bu çalışmanın ikinci kısmında ise beş kuantum kuyusundan oluşan GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapının iletim bandındaki elektronlar için taban durum ile uyarılmış üst enerji durumları arasındaki izinli geçişler için lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları, elektrik ve manyetik alanın farklı büyüklükleri ve manyetik alanın farklı eğiklik açılara bağlı olarak hesaplandı. Yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusuna dıştan elektrik alan ve eğik manyetik alan uygulanarak, bu alanların farklı büyüklüklerine karşılık sistemin kuyu parametreleri üzerindeki değişimleri incelendi. Bu tanımlanan kuantum kuyuları sistemine elektrik alan uygulanmazken ($F=0$) sistem simetrik yapıdadır. Simetrik bir kuantum kuyusu içerisinde tek-tek (1-3) veya çift-çift (2-4) elektronik enerji seviyeleri arasındaki geçişler için dipol matris elemanları yoktur. Bu yüzden simetrik kuantum kuyularında tekten teke veya çiftten çifte enerji geçişleri yasaklıdır. Ancak sisteme elektrik alan uygulandığında sistem simetri özelliğini kaybeder ve asimetric hale geçer. Böylelikle elektrik alan uygulanmasıyla yasaklı olan enerji geçişleri de izinli hale gelir. Bu çalışmada, sisteme uygulanan elektrik ve manyetik alanların büyüklükleri değiştirilerek 1-2 ve 2-3 geçişleri için manyetik alanın eğiklik açısına karşılık enerji seviyeleri arasındaki enerji farkı (ΔE) karşılaştırıldı. Sisteme dıştan uygulanan elektrik ve manyetik alanların büyüklüklerini veya manyetik alanın eğiklik açısını değiştirerek, 1-2, 2-3, 1-3, 2-4 enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin izinli ve yasaklı durumları incelendi. Tüm bu elektronik seviyeler

arasındaki enerji geçişleri için lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam optik soğurma katsayıları foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak çizildi.

Kuantum kuyularında lineer soğurma katsayısı $\alpha^{(1)}(\omega)$, üçüncü dereceden lineer olmayan soğurma katsayısı $\alpha^{(3)}(\omega, I)$ ve toplam soğurma katsayısı ise $\alpha(\omega, I)$ olarak tanımlanır. Saturasyon yoğunluğu (I_s), toplam soğurma katsayısının $\alpha(\omega, I)$ yarıya indiği yoğunluk olarak tanımlanır, o zaman $\alpha(\omega, I_s) = \alpha^{(1)}(\omega)/2$ veya eşdeğer olarak $\alpha^{(3)}(\omega, I_s) = -\alpha^{(1)}(\omega)/2$ eşitliklerini yazarız. Saturasyon yoğunluğu kuantum kuyularının karakteristik bir özelliğini ifade eder ve bu niceliği kuantum kuyusunun yapı parametresinin bir fonksiyonu olarak incelemek yararlı olacaktır[7]. Bu çalışmada GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusuna gönderilen ışık şiddetinin (I) büyüklüğü değiştirilerek toplam optik soğurma katsayısı üzerinde oluşan saturasyon yoğunluğu incelendi.

Son olarak GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heteroyapıdaki beş kuantum kuyusuna dıştan elektrik ve eğik manyetik alan uygulandığında kuantum kuyu parametrelerinin açığa bağlı değişimleri, dış alanlarının ΔE üzerine etkileri ve sisteme gönderilen ışık şiddetinin farklı değerleri için toplam soğurma katsayısındaki saturasyon olayı yorumlandı.

2. DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER

2.1. Giriş

Son yıllarda nanoteknolojideki gelişmeler ile birlikte haberleşme ve iletişim teknolojisinde kullanılan çok küçük yapıların üretilmesine olanak sağlanmıştır. Hafıza ve hesaplama sistemlerine aşırı talep, sinyal iletme ve işleme hızlarının yükseltilmesi yönündeki araştırmalar, mikroelektronik ve optoelektronik aygıtların üretilmesine olanak sağlamıştır[8,9].

Yapılan çalışmalar ile elektronik aygıtların boyutları gittikçe artan bir hızla küçülmeye başlamıştır. Bu çalışmaların yapılmasının iki temel nedeni vardır: Birincisi, bir entegre devreye yada bir bilgisayar işlemcisine daha fazla işlem yapabilecek daha çok sayıda transistör konulması ile daha çok aygıtı daha küçük hacimlere sığdırıp, elektronik donanımların hem boyutlarını hem de maliyetlerini düşürmek, ikincisi ise daha hızlı çalışan elektronik aygıtlar ve birim zamanda daha çok işlem yapabilen boyutları küçük, ancak bellek kapasitesi büyük süper bilgisayarlar yapabilmektir[10].

Nitekim günümüzde elektronik cihaz yapımında kullanılan düşük boyutlu kuantum yapıları yarıiletken malzemelerden üretilmektedir. Yarıiletken malzemelerin tercih edilmesinin sebebi bu malzemelerin enerji band aralığının ayarlanabilir olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerde iletkenliği sağlayan elektron veya hollerin, kontrol edilebilir olması bu yapılarda yarıiletken malzemelerin kullanılmasının tercih nedenlerinden birisidir.

2.2. Yarıiletkenler

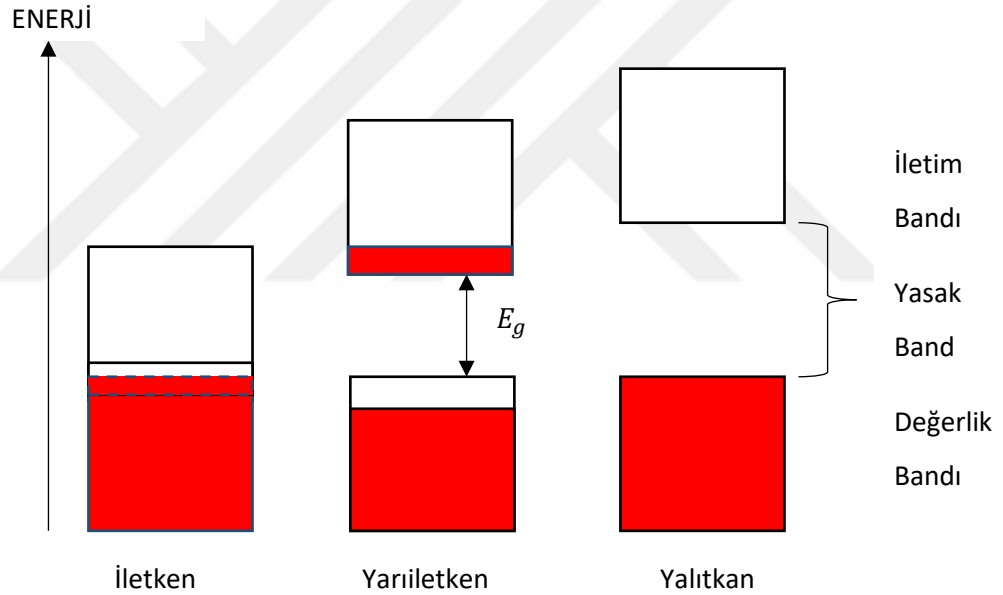
Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik bakımından metallere göre iyi bir iletken değildir. Yarıiletkenler, $T = 0 \text{ } ^\circ\text{K}$ de yalıtkan iken sıcaklığın artmasıyla öz dirençleri azalır ve buna karşılık iletkenliği artarak iletken malzeme haline geçerler. İletken bir maddede elektriksel iletkenliği sadece elektronlar sağlarken yarıiletken maddelerde ise hem elektron hem de holler iletkenliğe katkıda bulunurlar. Bir yarıiletken maddenin iletkenliğini değiştirmenin bir başka yolu ise farklı katkı atomları eklemektir. Yarıiletkenlerin iletkenliklerinin ayarlanabilir olması özelliği, bu maddelerin optik cihazlarda kullanılmasının en büyük nedenlerinden biridir.

Yarıiletkenler, elementler olarak tek başına veya iki veya daha fazla elementin birleşmesiyle bileşik olarak bulunurlar. Element olarak periyodik cetvelin IVA grubunda

yer alırlar. Örnek olarak Si (Silisyum), Ge (Germanyum) verilebilir. Aynı zamanda IIIA – VA (III-V bileşiği) veya IIB – VIA (II-VI bileşiği) grubu elementleri de bileşik yaparak bir yarıiletken oluşturabilir. III-V bileşik yarıiletkenlere örnek olarak GaAs (Galyum Arsenit), AlAs (Alüminyum Arsenit), $Ga_{1-x}Al_xAs$ (Galyum Alüminyum Arsenit), II-VI yarıiletken bileşiklerine örnek olarak ise ZnS (Çinko Sülfür), CdS (Kadmiyum Sülfür) söylenebilir.

2.2.1. Yarıiletkenlerin band yapısı ve saf yarıiletkenler

İletken, yarıiletken veya yalıtkan malzemelerin elektronik olarak kimlik yapısını enerji band aralığı belirler. Yarıiletkenlerin enerji band aralığı iletkenlerinkinden büyük ancak yalıtkanların band aralığından daha küçüktür.



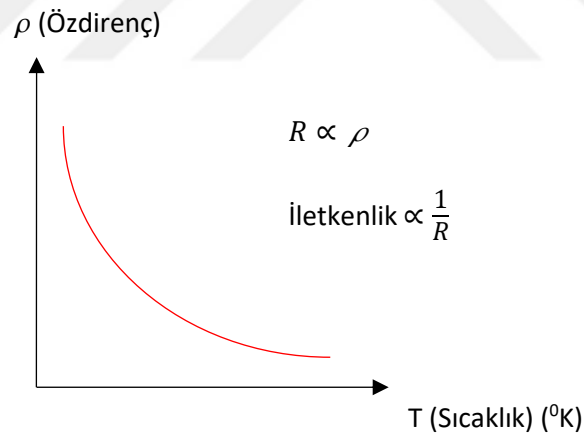
Şekil 2.1 Oda sıcaklığında iletken, yalıtkan ve yarıiletken maddelerin band yapısı.

Değerlik (valans) bandı, $T=0$ K'de elektronun bulunduğu en dıştaki enerji bandıdır. İletim bandı, ısı, ışık, foton bombardımanı, elektrik alan veya manyetik alan ile değerlik bandındaki elektronun uyarılması sonucu elektriksel iletkenliğin oluşabilmesi için gerekli olan elektron enerjisi aralığıdır. Yasak band aralığı (E_g) ise elektronun bulunma olasılığının sıfır olduğu yasak enerji düzeylerinin tümünün adıdır.

Şekil 2.1'de oda sıcaklığında ($T=300$ K) iletken, yalıtkan ve yarıiletkenlerin band yapıları gösterilmiştir. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere metallerin iletim bandı ile değerlik

bandı arasında boşluk yoktur. Yalıtkanlarda değerlik bandı veya iletim bandı tamamen dolu veya tamamen boştur. Buna karşın yarıiletken malzemelerin değerlik bandı bu maddelerin elektriksel iletkenlik özelliğinden dolayı son yörüngeleri yarı doludur. Ancak unutulmamalıdır ki yarıiletkenler $T=0$ $^{\circ}\text{K}$ 'de yalıtkan yapıda olmasından dolayı bu sıcaklıkta değerlik bandları yalıtkanların yapısındaki gibi tamamen doludur. Metallerde elektriksel iletkenlik için gerekli olan enerji büyüklüğü az iken yarıiletkenlerde iletkenlere göre biraz daha fazla potansiyel enerjiye ihtiyaç vardır. Yalıtkan maddelerde ise elektriksel iletkenlik için çok daha fazla potansiyel enerji gerekmektedir. Gerekli olan bu enerji miktarını, maddelerin yasak band aralıkları belirlemektedir. Şekil 2.1'de verildiği üzere oda sıcaklığında metallerin yasak band aralığı yokken yarıiletkenlerin yasak bant aralığı ise yalıtkanların yasak band aralığından daha küçüktür.

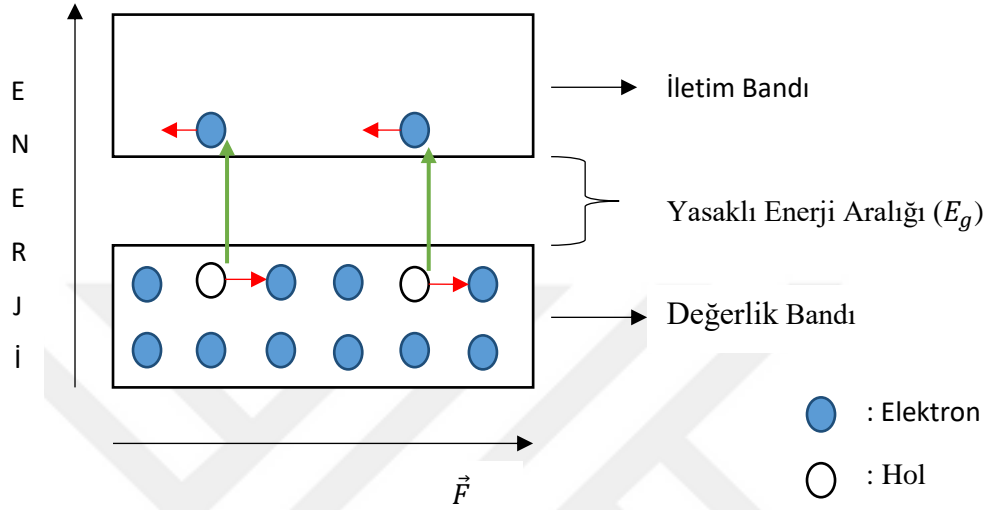
Oda sıcaklığında ($T=300$ $^{\circ}\text{K}$) yarıiletkenlerin yasak band aralıkları $E_g < 3$ eV iken yalıtkanlarınkı ise $E_g \sim 10$ eV büyüklüğündedir. Bundan dolayı yarıiletkenleri yalıtkanlardan ayıran en önemli özellik yasak enerji band aralığıdır.



Şekil 2.2 Yarıiletkenlerin özdirençlerinin (ρ) sıcaklıkla (T) ile değişim grafiği.

Şekil 2.2, yarıiletkenlerin özdirençlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösterir. Şekil 2.2, incelendiğinde yarıiletkenlerin özdirençleri sıcaklık artışı ile giderek azalmaktadır. Bunun sonucunda ise sıcaklık arttıkça bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği de artar. $T=0$ $^{\circ}\text{K}$ 'de yarıiletkenlerin değerlik bandından iletim bandına geçen elektron yoktur ancak sıcaklığın artmasıyla birlikte değerlik bandından iletim bandına geçen elektron sayısı da giderek artmaktadır.

Yarıiletkenlerde değerlik bandında bulunan elektronlar dış etkiler: ısı, ışık, foton, elektrik alan veya manyetik alan ile uyarıldığında iletim bandına geçerler. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere elektrik alan ile uyarılan elektron, elektrik alana zıt hareket ederken değerlik bandında bıraktığı pozitif yüklü holler ise elektrik alanla aynı yönde hareket ederler. Bu davranışla elektron ve holler elektriksel iletkenliği birlikte oluştururlar.



Şekil 2.3 Elektron ve hollerin elektrik alan altındaki davranışı.

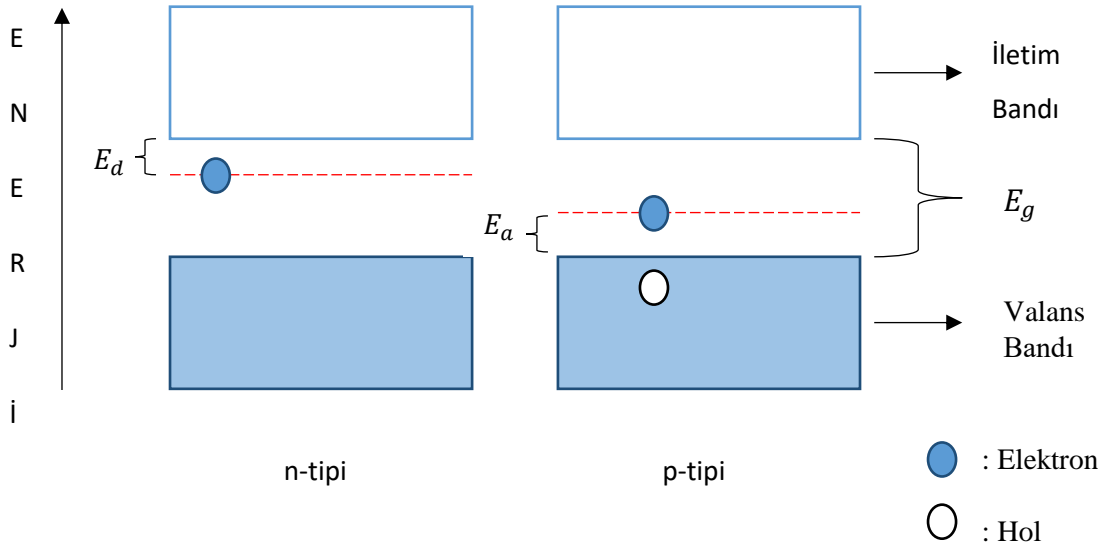
İçinde katkı atomu bulunmayan yani $T=0$ 0K 'de hiçbir yük taşıyıcısı olmayan yarıiletkenlere saf (katkısız) yarıiletken denir. Bu yarıiletkenlerde örneğin ısı enerjisi alan elektronlar değerlik bandından iletim bandına çıkar ve arkasında değerlik bandında pozitif yüklü holler bırakırlar. Böylelikle elektron ve holler birlikte elektriksel iletkenliği oluştururlar. İletim bandındaki elektron konsantrasyonuna n , değerlik bandındaki hol konsantrasyonuna p ve yarıiletkendeki saf taşıyıcı konsantrasyonuna n_i dersek $n=p=n_i$ olur[11]. Bu şekilde sıcaklığın artırılmasıyla iletkenliğin sağlanması yarıiletken malzemelerin elektronik devrelerde kullanımını kısıtlamaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik devrelerde sıcaklığının artması sonucu istenmedik şekilde fonon saçılmaları oluşur ve bu durum ise elektrik alan ile kontrol edilemez hale gelir. Bu sorunu çözmek için ise katkılama yöntemi kullanılarak yarıiletken malzemeler elde edilir.

2.2.2. Katkılı yarıiletkenler

Saf yarıiletkenler içerisine kristal örgü yapılarını bozmayacak şekilde katkı atomu katarak elektriksel iletimi sağlayan elektron ve hollerin yoğunluğu artırılır. Yapılan bu işleme katkılama, oluşan yeni yarıiletkenlere ise katkılı yarıiletken denir. Saf

yarıiletkenlerde sıcaklığın artmasıyla iletkenlik artar ancak bu sırada ortaya çıkan istenmeyen fononlar elektrik alan ile kontrol edilemez ancak katkılama işlemi sonucunda yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri artık kontrol edilebilir duruma gelir. Bu özellik günümüzde katkılı yarıiletkenlerin teknolojide geniş alanda kullanımını arttırmıştır. Katkılama sonucu oluşan katkılı yarıiletkenlerin iletkenlikleri safsızlık atomlarının cinsine ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişir.

Katkılı yarıiletkenler, katkı atomunun cinsine göre n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Örneğin, 5 değerlik elektronuna sahip As (Arsenik) gibi bir atom bir yarıiletkene ilave edildiğinde, dört değerlik elektronu kovalent bağ yaparken bir elektron boşta kalır. Bu boşta kalan elektron hemen hemen serbesttir ve iletkenlik bandının hemen altında, yasak enerji band aralığında bulunan bir enerji seviyesine sahiptir. Böylece beş değerlik elektronu olan atom, yapıya bir elektron verir. Bu atoma verici (donör) atom denir. Verici seviye ile iletkenlik bandı arasındaki enerji aralığı çok küçüktür. Çok az bir ısı ile enerji ile boşta bulunan bu elektron iletim bandına geçer. Verici atom ile katkılandırılan yarıiletkenlere n-tipi yarıiletkenler denir. Bir başka örnek olarak ise In (İndiyum) ve Al (Alüminyum) gibi üç değerlik elektronuna sahip atomlarla yarıiletken katkılandığında üç elektron kovalent bağ yaparken bir elektron noksanı veya boşluk (hol) boşta kalır. Bu tür safsızlıkların enerji düzeyleri ise değerlik bandının hemen üstünde yasak enerji bandı içinde kalır. Oda sıcaklığında, bu safsızlık düzeylerini dolduracak kadar ısı ile enerjiye sahip elektronlar, değerlik bandında bir boşluk (hol) bırakarak ayrılır. Üç değerlikli atom, gerçekte değerlik bandından bir elektron aldığından, böyle safsızlıklara alıcı denir. Üç değerlikli safsızlıklar (alıcı) ile aşılana yarıiletken p-tipi olarak adlandırılır[12].



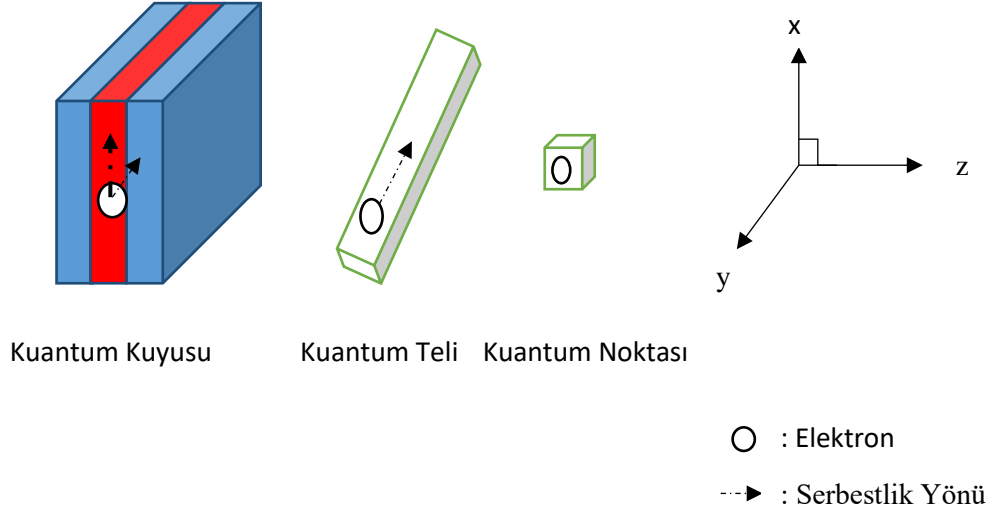
Şekil 2.4 n-tipi ve p-tipi katkılı yarıiletkenlerin enerji band diyagramı.

Şekil 2.4'de katkılanan atom cinsine göre katkılama sonucu oluşan n-tipi ve p-tipi katkılı yarıiletkenlerin band diyagramı gösterilmiştir. Burada E_d , verici (donör) enerji aralığını ve E_a ise alıcı enerji aralığını gösterir.

2.3. Heteroyapılar ve Kuantum Kuyuları

2.3.1. Heteroyapılar

Heteroyapı, farklı yapıdaki yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşan kuantum yapılarına denir. Düşük boyutlu kuantum yapılar, elektronların serbestlik düzeyine göre Çizelge-1'de gösterildiği gibi kuantum kuyu, kuantum teli ve kuantum noktaları olarak üçe ayrılır. Şekil 2.5'de z- doğrultusunda büyütülerek çeşitli yapıda oluşturulan kuantum yapıları gösterilmiştir. Şekil 2.5'de verildiği üzere kuantumsal olarak kuşatma altındaki elektron, kuantum kuyusunda iki (x- ve y-) boyutta, kuantum telinde tek (y-) boyutta ve kuantum noktasında ise sıfır boyutta serbestlik derecesine sahiptir.



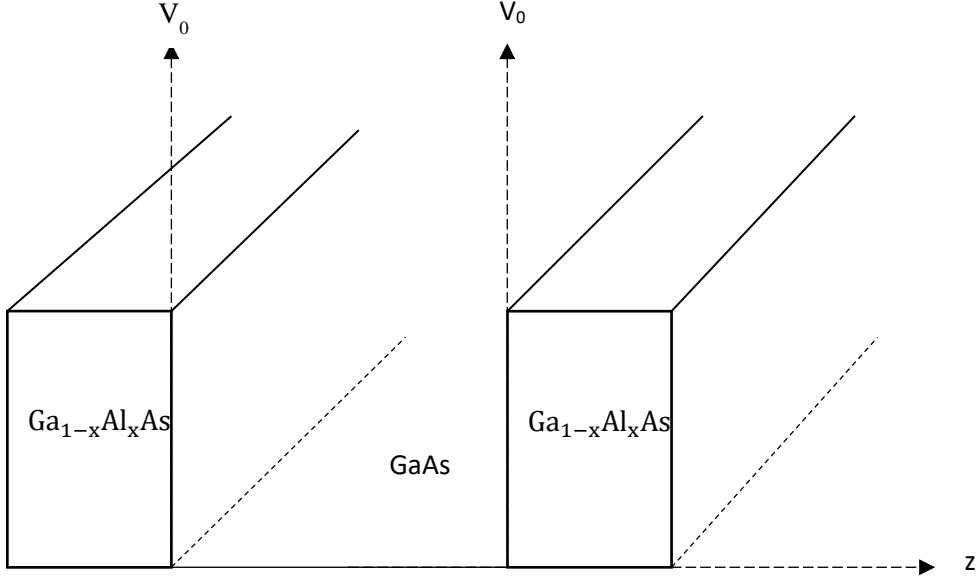
Şekil 2.5 Elektronun serbestlik derecesine göre kuantum yapıları.

Şekil 2.5’de verilen kuantum yapıları, bu çalışmanın giriş kısmında anlatılan çeşitli büyütme teknikleri kullanılarak farklı yapıdaki yarıiletkenlerden oluşturulmaktadır. Bu büyütme tekniklerinden en önemlileri ise MBE ve MOCVD büyütme teknikleridir. Bu teknikler yardımıyla kuantum kuyu yapılarının sürekli enerji seviyesine değil kesikli enerji seviyelerine sahip olduğu gösterilmiştir. Büyütme teknikleriyle elektronun ve değerlik bandında geride bıraktığı hollerin hareketleri kontrol altına alınır. Bu özelliklerden dolayı günümüzde farklı heteroyapıdaki yarıiletken malzemeler elektronik cihazların yapımında kullanılmaktadır. Örneğin; diyot, transistör, lazerler vb.

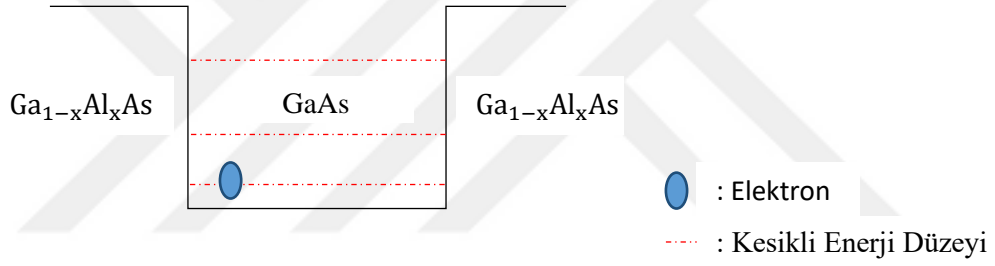
2.3.2. Kuantum kuyu yapısı

Farklı enerji band aralığına sahip yarıiletkenlerin büyültme doğrultusunda birbirine eklenmesiyle kuantum kuyuları oluşturulabilir. Örneğin iki $Ga_{1-x}Al_xAs$ yapının arasına bir GaAs eklenmesiyle $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusu elde edilebilir. Oluşturulan yarıiletken kuantum yapısında $Ga_{1-x}Al_xAs$ bariyer kısmını oluştururken GaAs ise kuyu kısmını oluşturur.

$GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusunun şematik gösterimi Şekil 2.6’de verilmiştir. Şekil 2.7’ de kuantum kuyusunun iletim bandı içerisinde oluşan kesikli enerji seviyeleri gösterilmiştir. Elektronlar, sahip olduğu enerji büyüklüğüne göre değerlik bandı veya iletim bandı içerisindeki kesikli enerji düzeylerine yerleşir.

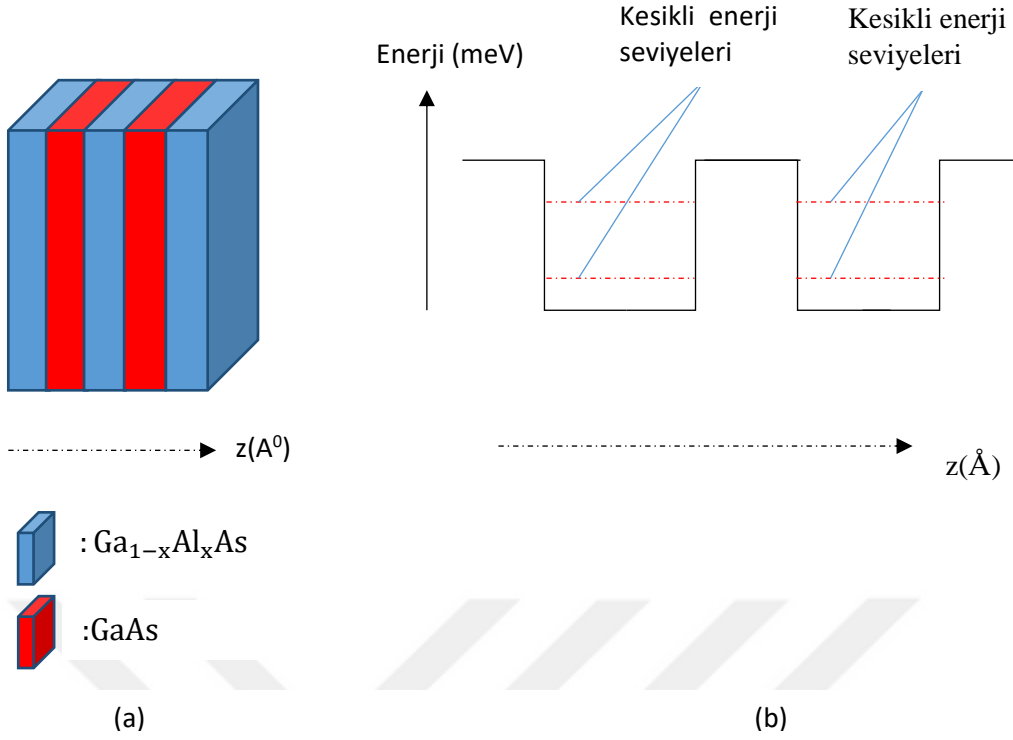


Şekil 2.6 Farklı yapıdaki yarıiletkenlerle oluşturulan heteroyapıdaki kuantum kuyusu.



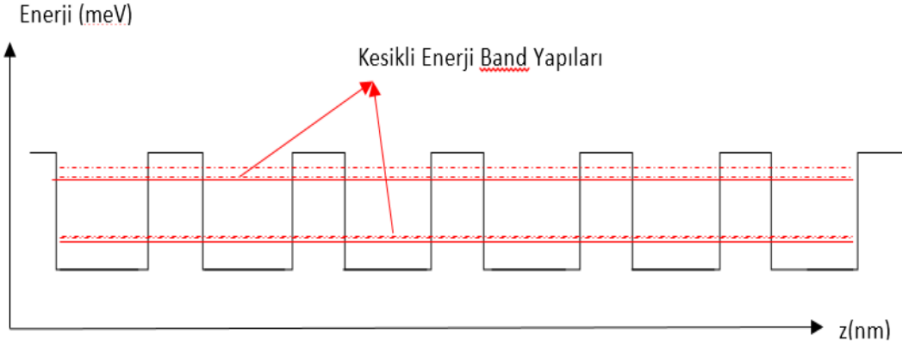
Şekil 2.7 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki kuantum kuyusunun band diyagramı ve kesikli enerji düzeylerinin şematik olarak gösterimi.

İki veya daha fazla heteroyapıdaki yarıiletken kuantum kuyusunun z- doğrultusunda üst - üste büyütülmesiyle çoklu kuantum kuyuları oluşur. Örneğin; GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heteroyapı yarıiletkenden oluşan iki kuyulu kuantum kuyusunun şematik olarak gösterimi Şekil 2.8'deki gibidir.



Şekil 2.8 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki iki kuantum kuyusunun (a) z- doğrultusunda oluşturulan yapısı (b) şematik olarak gösterimi.

Yarıiletken süperörgüler, çoklu kuantum kuyusu yapılarının uzantılarıdır. Şekil 2.9’ de gösterildiği gibi, süperörgüler, biri bariyer malzemesi diğeri kuyu malzemesi olan alternatif malzeme katmanının periyodik olarak üstüste büyütülmesiyle oluşur. Bununla birlikte, çoklu kuantum kuyularının aksine, bariyer katmanları, taşıyıcıların mekanik olarak bir kuyudan diğere tünel oluşturabileceği kadar dardır. Sonuç olarak, kuantum kuyularının normalde ayırık olan enerji durumları, tüm süperörgü boyunca yayılan minibandlar oluşturmak üzere genişler. Süperörgülerin bir bütün olarak ortaya çıkan bant yapısı, külçe yarı iletkenlere benzer. Ancak, minibandlar arasında enerji boşluklarının oluşmasıyla sonuçlanan daha az bant örtüşmesi vardır. Minibandlar arasındaki enerji boşlukları, kuyu ve bariyer kalınlıkları değiştirilerek kontrol edilebilir[13].



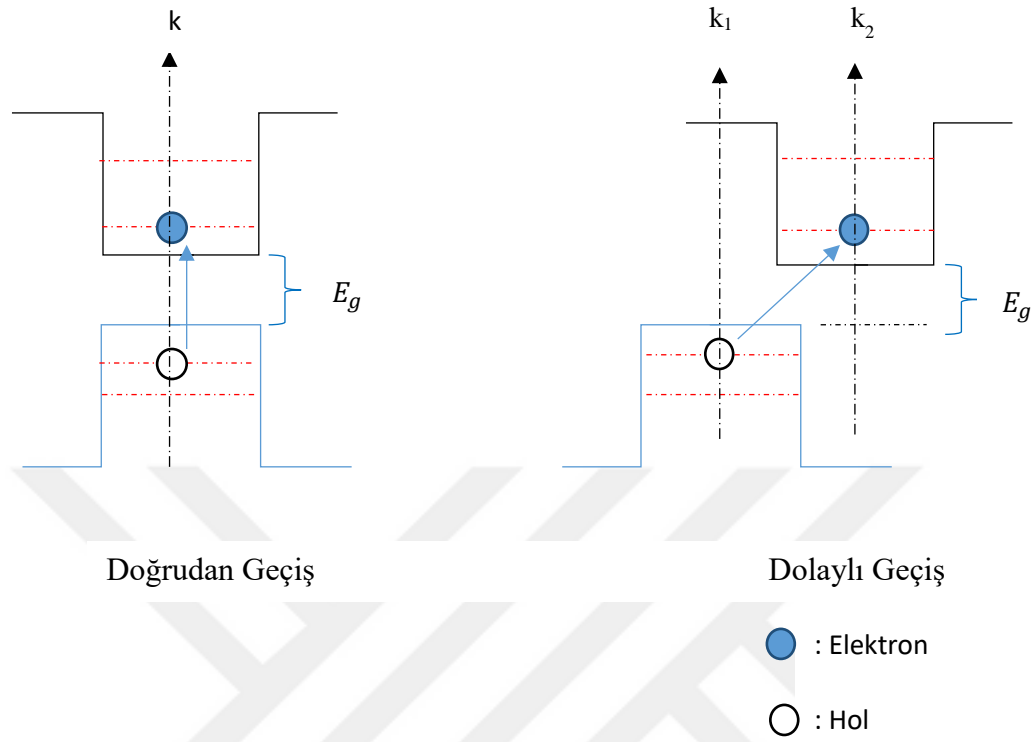
Şekil 2.9 Farklı yarıiletkenlerin z- doğrultusunda büyütülmesiyle oluşan süperörgülerin band diyagramı.

2.3.3. Düşük boyutlu yarıiletken yapılarda optik geçişler

Düşük boyutlu yarıiletken yapılarda elektronun çeşitli dış alan etkileriyle uyarılması sonucu optik geçişler gerçekleşir. Yarıiletken malzemelerde elektronun fotonlarla uyarılabilmesi için gelen fotonun enerjisi en az malzemenin enerji band aralığı kadar olmalıdır. Gelen fotonun enerjisine E_f ve enerji band aralığının büyüklüğüne ise E_g dersek gelen fotonun elektronu uyarabilmesi için $E_f \geq E_g$ olması gerekir. Eğer $E_f < E_g$ olursa gelen fotonun enerjisi elektronu uyarmak için yeterli olmadığından elektronun bir üst enerji seviyesine geçişi gerçekleşmez.

Yarıiletken malzemelerde bu optik geçişler iki kısma ayrılır. İlk olarak değerlik bandı ile iletim bandı arasında gerçekleşen bandlararası geçişlerdir. Bandlararası geçişler ise kendi içerisinde ikiye ayrılır. Elektronun, aynı \vec{k} dalga vektörü üzerinde olan değerlik bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu arasında gerçekleşen geçişine doğrudan (direct) geçiş denir. Doğrudan geçiş sonucunda elektron gelen fotonun enerjisini soğurur ve arkasında değerlik bandında hol bırakarak iletim bandına geçer. İletim bandına geçen elektronun \vec{k} dalga vektörü değişmediği gibi aynı zamanda elektron, enerjisini ve momentumunu da koruyarak geçişini tamamlar. Değerlik bandının maksimum değeri ile iletim bandının minimum değeri farklı \vec{k} dalga vektör uzayında olan yapılarda ise elektronun bu noktalar arasındaki geçişine dolaylı (indirect) geçişler denir. Optik geçişlerin tamamında elektronun enerjisi ve $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ büyüklüğündeki momentumu korunur. Doğrudan geçişlerde momentum korunurken dolaylı geçişlerde momentumun

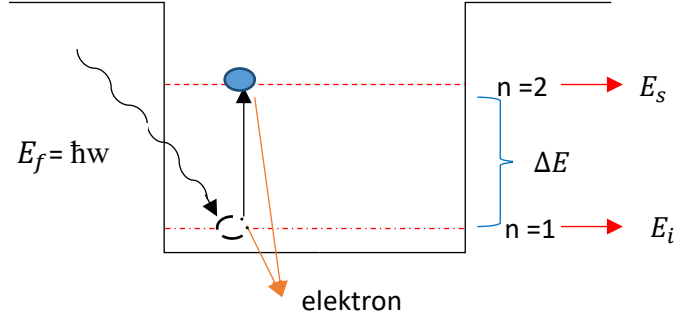
korunması için foton ve elektron haricinde fononlar ortaya çıkar. Bu sebepten dolaylı geçişlere sahip olan malzemeler ışık üretiminde tercih edilmezler.



Şekil 2.10 Yarıiletken malzemelerde bandlar arası geçişlerin şematik gösterimi.

Şekil 2.10’da görüldüğü üzere yarıiletken maddeler için doğrudan geçişte elektron aynı \vec{k} dalga vektör uzayında değerlik bandından iletim bandına geçerken dolaylı geçişte ise farklı vektör uzayında geçiş gerçekleşir.

Yarıiletken malzemelerde ikinci optik geçiş türü ise altbandlararası geçiştir. Bir altbandlararası geçiş, iletim veya değerlik bandlarının içindeki seviyeler (veya “altbandlar”) arasındaki geçişlerdir[14]. İletim bandı içerisinde altbandlararası optik geçiş şematik olarak Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Yarıiletken malzemelerde iletim bandında altbandlararası optik geçiş

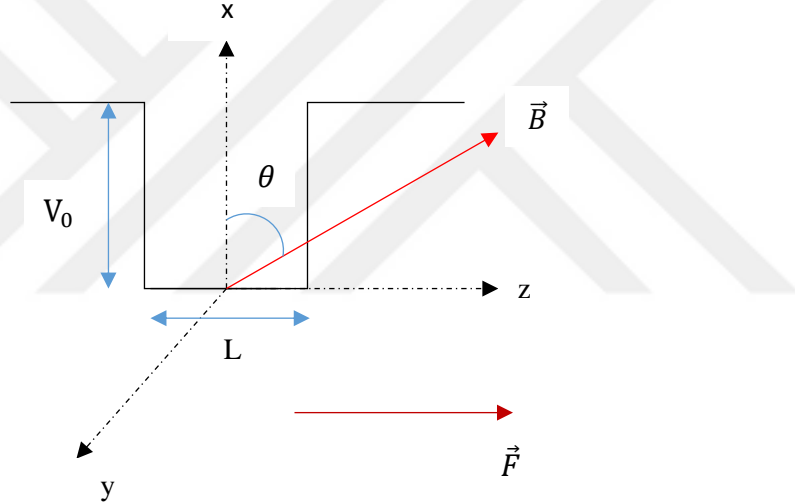
$n=1$ enerji düzeyindeki elektron $E_f = \hbar\omega$ enerjiye sahip foton ile uyarıldığı zaman $n=2$ enerji düzeyine çıkar. Burada gelen fotonun enerjisi (E_f), iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkına ($\Delta E = E_s - E_i$) minimum olarak eşit veya daha büyük olmalıdır ($E_f \geq \Delta E$). Uyarılan elektron bir üst enerji seviyesine geçtikten sonra çok kısa sürede ($t = 10^{-8}$ s) tekrar alt seviyeye iner. Elektron kendiliğinden alt seviyeye inerken dışarıya $E = \hbar\omega$ enerjiye sahip foton yayar. Sonuç olarak enerji düzeyleri arasındaki enerji farkı (ΔE), gelen fotonun enerjisine ve aynı zamanda tekrar yayılan fotonun enerjisine eşittir.

Son yıllarda, kuantum kuyularındaki altbandlararası geçişler hem fiziksel hem de teknolojik açıdan önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bu durum, bu tür geçişlerin büyük dipol matris elemanlarına (1-3 nm) ve osilatör şiddetlerine ($f \sim 15-20 \text{ sn}^{-1}$) sahip olmasından kaynaklanır[15].

3. HESAPLAMALAR

3.1. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyunun Schrödinger Denkleminin Analitik Çözümü

x-z düzleminde uygulanan B manyetik alan altında L genişlikli kuyu ve V₀ potansiyel yüksekliğinde bariyerden oluşan bir kuantum kuyusu (Şekil 3.1) için eğik manyetik alan $\vec{B} = (B\cos\theta, 0, B\sin\theta)$ olarak tanımlanır. Burada θ , x-z düzleminde bulunan manyetik alanın x- eksenine yaptığı eğiklik açısıdır. Şekil 3.1’de gösterildiği üzere eğik manyetik alan altındaki kuantum kuyusunun büyüme yönüne paralel elektrik alan uyguladığımızda, $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ Coulomb ayarı kullanılarak bu sistemin manyetik alan vektör potansiyeli $\vec{A} = (0, x B\sin\theta - z B\cos\theta, 0)$ olarak tanımlanır.

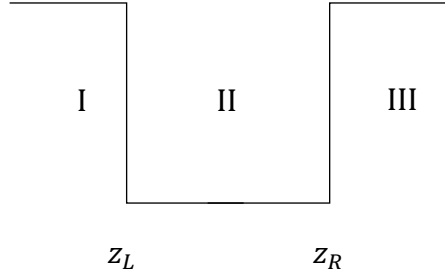


Şekil 3.1 Eğik manyetik alan ve z- doğrultusunda uygulanan elektrik alan altındaki kuantum kuyusu

Bu şekilde oluşan sistemin Hamiltoniyen’ i;

$$H = \frac{1}{2m^*} (\vec{p} + e\vec{A})^2 + V(z) \quad [3.1]$$

olarak tanımlanır. Burada V(z), eFz elektrik alan terimini de içeren elektron potansiyel enerjisidir.



Şekil 3.2 L kuyu genişlikli tek kuantum kuyusu ($z_L=0$ ve $z_R=L$)

Şekil 3.2’de z- ekseninde kuyunun solu z_L ve sağı ise z_R olmak üzere $V(z)$ elektron potansiyel enerjisini S basamak fonksiyonu cinsinden V_0 ’a bağlı olarak yazarsak;

$$V(z) = (S(z_L - z) + S(z - z_R)) V_0 \quad [3.2]$$

olur. Bu potansiyel terimine elektrik alan etkisini de eklendiğimizde;

$$V(z) = (S(z_L - z) + S(z - z_R)) V_0 + eFz \quad [3.3]$$

$V(z)$ potansiyel enerjisi yazılmış olunur. $V(z)$, S basamak fonksiyonu ile bir çoklu kuantum kuyusu sistemi için yazıldığında;

$$V(z) = \sum_i^N [S(z_{L_i} - z) + S(z - z_{R_i}) - (N - 1)] V_0 + eFz \quad [3.4]$$

olur. Burada i ; 1’ den N ’ e kadar doğal sayı ve N ise; kuyu sayısını ifade eder. Kuantum kuyusu içerisinde x- ve z- doğrultusunda kuşatılan elektron y- yönünde serbestçe hareket etmektedir. Öteleme simetrisi kullanarak (y- yönünde) sistemin dalga fonksiyonu;

$$\Psi(r) = e^{(ik_y y)} \varphi(x, z) \quad [3.5]$$

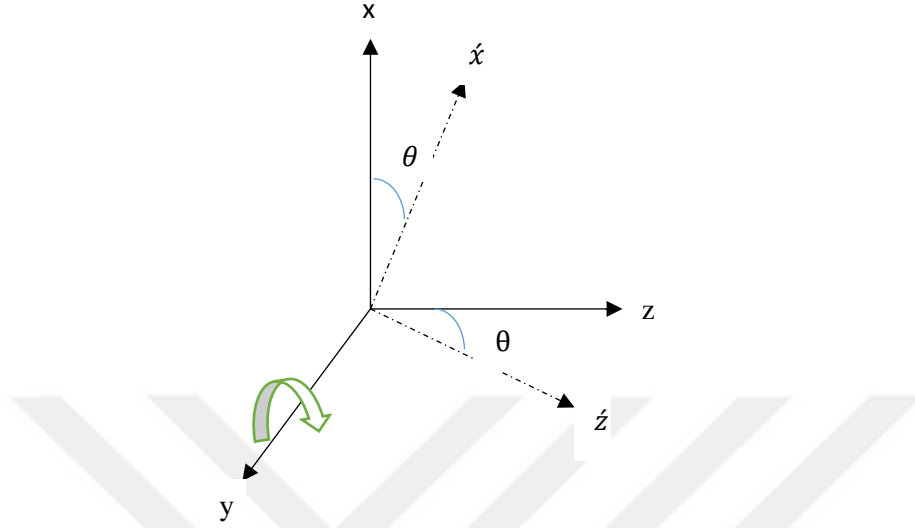
olarak yazılır.

\vec{A} vektör potansiyelini Denklem [3.1]’ deki Hamiltoniyen’e uygulayıp sistemin Hamiltoniyen’ i yeniden yazılırsa;

$$H = \frac{1}{2m^*} (p_x^2 + p_z^2) + \frac{1}{2m^*} (\hbar k_y - eB(z \cos \theta - x \sin \theta))^2 + V(z) \quad [3.6]$$

olur. Bu denkleme göre sistemin Hamiltoniyen’i hem x hem de z bileşenleri olduğundan dolayı değişkenlerine ayırarak çözümü yapılamaz. İ. Sökmen ve ark. tarafından yapılan özel bir dönüşümden sonra Hamiltoniyen yeni koordinatlar cinsinden ayrılabilir hale gelir[2-5,16-18]. Bu sebepten dolayı sisteme ortogonal bir dönüşüm uygulayarak, y-

ekseni etrafında Şekil 3.3' deki gibi θ açısı yapacak şekilde döndürüp manyetik alanını x- eksenine paralel hale getirdikten sonra ancak nokta kanonik dönüşüm sayesinde çözebiliriz.



Şekil 3.3 x-y-z düzleminin y- ekseninde θ açısı yaparak döndürülmesi.

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi kuantum kuyusu yapısını y- ekseninde θ açısı yapacak şekilde döndürüldüğünde aşağıdaki nokta kanonik dönüşümü kullanılarak;

$$\begin{pmatrix} z' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ x \end{pmatrix} \quad [3.7]$$

Yeni (x', z') dönüşmüş koordinatlar elde edilir. Böylece sistemin Hamiltoniyen'i yeni koordinatlar cinsinden;

$$H = \frac{1}{2m^*} (p_{x'}^2 + p_{z'}^2) + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (z_0' - z')^2 + V(x', z') \quad [3.8]$$

olur. Burada; $z_0' = \frac{\hbar k_y}{eB} = a_H^2 k_y$; yörünge merkezidir.

Denklem [3.8]'de görüldüğü üzere sistemin Hamiltoniyen'inde artık sadece $V(x', z')$ terimi her iki bileşeni de içermektedir. Bu terimide koordinat dönüşümü uygulayarak göstermek için S basamak fonksiyonuna da dönüşüm uygulamamız gerekir.

$$S(z_L - z) = S [z_L' \cos \theta + x_L' \sin \theta - z' \cos \theta - x' \sin \theta] \quad [3.9]$$

$$S(z_L - z) = S [(z_L' - z') \cos \theta + (x_L' - x') \sin \theta] \quad [3.10]$$

$$S(z_L - z) = \cos^2 \theta S[z_L' - z'] + \sin^2 \theta S[x_L' - x'] \quad [3.11]$$

Benzer olarak;

$$S(z - z_R) = \cos^2 \theta S[z' - z_R'] + \sin^2 \theta S[x' - x_R'] \quad [3.12]$$

olarak yazılır [2,19]. S basamak fonksiyonu ve koordinat dönüşümü kullanılarak potansiyel terimi;

$$V(x', z') = V(x') + V(z') \quad [3.13]$$

$$V(x') = V_0 \sin^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[x_{L_i}' - x'] + S[x' - x_{R_i}'] - (N - 1)\} + eF \sin \theta x' \quad [3.14]$$

$$V(z') = V_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N - 1)\} + eF \cos \theta z' \quad [3.15]$$

olarak bulunur. Sistemin Hamiltoniyen'i artık bileşenlerine ayrıldığından;

$$H = H_{x'} + H_{z'}$$

$$H_{x'} = \frac{p_{x'}^2}{2m^*} + V(x')$$

$$H_{z'} = \frac{p_{z'}^2}{2m^*} + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (z_0' - z')^2 + V(z') \quad [3.16]$$

olarak yazılabilmektedir. Buradan Hamiltoniyenler için tek boyutta Schrödinger denklemleri;

$$H_{x'} \chi(x') = E_{x'} \chi(x') \quad [3.17]$$

$$H_{z'} \phi(z') = E_{z'} \phi(z') \quad [3.18]$$

olur. Yukarıda verilen $H_{x'}$, etkin yüksekliği $V_{\text{eff}} = V_0 \sin^2 \theta$ ve etkin kuyu genişliği $L_{\text{eff}} = L \sin \theta$ olan x' doğrultusundaki çoklu kuantum kuyusu sisteminin Hamiltoniyen'ini ifade eder. $H_{z'}$, Hamiltoniyen' i ise etkin yüksekliği $V_{\text{eff}} = V_0 \cos^2 \theta$ ve etkin kuyu genişliği $L_{\text{eff}} = L \cos \theta$ olan z' doğrultusundaki çoklu kuantum kuyuları için tanımlanmıştır. Denklem[3.17]'deki Schrödinger denkleminin çözümleri Airy fonksiyonları (Airy Ai ve Airy Bi) olan elektrik alan altındaki kuantum kuyu sistemleri içindir. Bu çalışmada elektrik alan altındaki çoklu kuantum kuyuları üzerinde eğik manyetik alanın etkisi incelendiğinden, manyetik alanın etkisini içeren $H_{z'}$ Hamiltoniyen teriminin çözümü üzerinde duruldu. Denklem [3.15] ve Denklem [3.16]'i kullanarak Denklem [3.18]'ü tekrar düzenlendiğinde;

$$\left[\frac{p_{z'}^2}{2m^*} + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (z_0' - z')^2 + V(z') \right] \Phi(z') = E_{z'} \Phi(z') \quad [3.19]$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz'^2} + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (z_0' - z')^2 + (V_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\} + eF \cos \theta z') \right] \Phi(z') = E_{z'} \Phi(z') \quad [3.20]$$

Denklemin her iki tarafını $-\frac{2m^*}{\hbar^2}$ ile genişletildiğinde;

$$\left[\frac{d^2 \Phi(z')}{dz'^2} - \frac{2m^*}{\hbar^2} \left[\frac{1}{2} m^* \omega^2 (z_0' - z')^2 + (V_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\} + eF \cos \theta z') \right] \Phi(z') = -\frac{2m^*}{\hbar^2} E_{z'} \Phi(z') \quad [3.21]$$

Eşitliğin her iki tarafını $\frac{1}{\omega^2}$ ile çarpıp tekrar düzenlendiğinde;

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 \Phi(z')}{dz'^2} - \frac{m^{*2}}{\hbar^2} (z_0' - z')^2 \Phi(z') - \left[\frac{2m^*}{\hbar^2 \omega^2} V_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\} \right] \Phi(z') - \frac{2m^*}{\hbar^2 \omega^2} eF \cos \theta z' \Phi(z') + \frac{2m^*}{\hbar^2 \omega^2} E_{z'} \Phi(z') = 0 \quad [3.22]$$

elde ederiz.

Sistemi boyutsuz niceliklerle ifade etmek için öncelikle

$$u = z_0' - z' \quad [3.23]$$

dönüşümü yapıldıktan sonra aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanarak;

$$\begin{cases} \tilde{u} = \frac{\sqrt{2}}{a_H} u \\ \tilde{E}_{z'} = \frac{E_{z'}}{\hbar \omega} \\ \tilde{V}_0 = \frac{V_0}{\hbar \omega} \end{cases} \quad [3.24]$$

Denklem [3.22] boyutsuz olarak yazılırsa;

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 \Phi(z')}{dz'^2} - \frac{m^{*2}}{\hbar^2} (u)^2 \Phi(z') - \left[\frac{2m^*}{\hbar \omega} \tilde{V}_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\} \right] \Phi(z') - \frac{2m^*}{\hbar^2 \omega^2} eF \cos \theta \left(z_0' - \frac{a_H}{\sqrt{2}} \tilde{u} \right) \Phi(z') + \frac{2m^*}{\hbar \omega} \tilde{E}_{z'} \Phi(z') = 0 \quad [3.25]$$

olur. Denklemin her iki tarafı $\frac{\hbar \omega}{2m^*}$ ile çarpılarak tekrar düzenlendiğinde;

$$\frac{\hbar}{2m^*\omega} \frac{d^2\phi(z')}{dz'^2} - \frac{m^*\omega}{2\hbar} (u)^2 \phi(z') - [\tilde{V}_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\}] \phi(z') - \frac{1}{\hbar\omega} eF \cos \theta \left(z_0' - \frac{a_H}{\sqrt{2}} \tilde{u} \right) \phi(z') + \tilde{E}_{z'} \phi(z') = 0 \quad [3.26]$$

elde edilir. Siklotron frekansı (ω) ve manyetik uzunluğa (a_H) bağlı olarak denklem [3.26] düzenlenirse;

$$\frac{\hbar}{2eB} \frac{d^2\phi(z')}{dz'^2} - \frac{eB}{2\hbar} (u)^2 \phi(z') - [\tilde{V}_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\}] \phi(z') - \frac{1}{\hbar\omega} eF \cos \theta \left(z_0' - \frac{a_H}{\sqrt{2}} \tilde{u} \right) \phi(z') + \tilde{E}_{z'} \phi(z') = 0 \quad [3.27]$$

$$\frac{a_H^2}{2} \frac{d^2\phi(z')}{dz'^2} + \left[-\frac{eB}{2\hbar} (u)^2 - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta \sum_{i=1}^N \{S[z_{L_i}' - z'] + S[z' - z_{R_i}'] - (N-1)\} - \frac{1}{\hbar\omega} \frac{a_H}{\sqrt{2}} eF \cos \theta \tilde{z}_0 + \frac{1}{\hbar\omega} \frac{a_H}{\sqrt{2}} eF \cos \theta \tilde{u} \right] \phi(z') + \tilde{E}_{z'} \phi(z') = 0 \quad [3.28]$$

elde edilir. Burada;

$$\tilde{\alpha}_0 = \frac{1}{\hbar\omega} \frac{a_H}{\sqrt{2}} eF \cos \theta \tilde{z}_0 \quad [3.29]$$

$$\tilde{\beta} = \frac{1}{\hbar\omega} \frac{a_H}{\sqrt{2}} eF \cos \theta \quad [3.30]$$

olarak tanımlanarak tüm terimleri boyutsuza dönüştürülürse;

$$\frac{a_H^2}{2} \frac{d^2\phi(z')}{dz'^2} + \left[-\frac{eB}{2\hbar} \left(\frac{a_H}{\sqrt{2}} \tilde{u} \right)^2 - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta S[\tilde{u}] - \tilde{\alpha}_0 + \tilde{\beta} \tilde{u} \right] \phi(z') + \tilde{E}_{z'} \phi(z') = 0 \quad [3.31]$$

elde edilir. Burada $S[\tilde{u}] = \sum_{i=1}^N \{S[-u_{L_i}' + u'] + S[-u' + u_{R_i}'] - (N-1)\}$ dir.

$$\tilde{u} = \frac{\sqrt{2}}{a_H} u = \frac{\sqrt{2}}{a_H} (z_0' - z') \quad [3.32]$$

$$d\tilde{u} = -\frac{\sqrt{2}}{a_H} dz' \quad [3.33]$$

$$d\tilde{u}^2 = \frac{2}{a_H} dz'^2 \quad [3.34]$$

denklem [3.31] tekrar düzenlendiğinde;

$$\frac{d^2\phi(\tilde{u})}{d\tilde{u}^2} + \left[-\frac{1}{4} (\tilde{u})^2 - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta S[\tilde{u}] - \tilde{\alpha}_0 + \tilde{\beta} \tilde{u} + \tilde{E}_{z'} \right] \phi(\tilde{u}) = 0 \quad [3.35]$$

olur.

Bu denklemi boyutsuz olan \tilde{u} ' yı $2\tilde{\beta}$ kadar öteleyerek yeni bir dönüşüm $\tilde{\zeta} = \tilde{u} + 2\tilde{\beta}$ tanımlayıp tekrar oluşturulduğunda çözümleri çok iyi bilinen bir denkleme dönüşür. Buna göre Denklem [3.35];

$$\frac{d^2\phi(\tilde{\zeta})}{d\tilde{\zeta}^2} + \left[-\frac{1}{4}\tilde{\zeta}^2 + \left(m + \frac{1}{2}\right)\right]\phi(\tilde{\zeta}) = 0 \quad [3.36]$$

dönüşür [5]. Elde edilen bu Schrödinger denkleminin çözümü ise literatürde çok iyi bilinen Weber fonksiyonlarıdır[20]. Çözümleri Weber fonksiyonları olan diferansiyel denklem aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + \left(m + \frac{1}{2} - \frac{1}{4}z^2\right)\psi(z) = 0 \quad [3.37]$$

Weber fonksiyonlarının genel formuna göre kuantum kuyusu içerisinde her bir bölgenin çözümüne göre Hamiltoniyen' in z - yönünde enerji özdeğerleri aşağıdaki dönüşümler;

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\hbar\omega}$$

$$\tilde{V}_0 = \frac{V_0}{\hbar\omega},$$

$$\rho = z - z_0,$$

$$\tilde{\rho} = \frac{\sqrt{2}}{a_H}\rho$$

yapıldıktan sonra herbir kuyu ve bariyer için boyutsuz olarak sırasıyla m ve m' olarak verilir.

$$\begin{cases} m' + \frac{1}{2} = \tilde{\varepsilon} - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta, & \rho > \frac{\sqrt{2}}{a_H}z_R \text{ ve } \rho < \frac{\sqrt{2}}{a_H}z_L \\ m + \frac{1}{2} = \tilde{\varepsilon}, & \frac{\sqrt{2}}{a_H}z_R > \rho > \frac{\sqrt{2}}{a_H}z_L \end{cases} \quad [3.38]$$

Çözümü literatürde iyi bilinen bu özdeğerlerden yararlanılarak sistemin Hamiltoniyen' in z' doğrultusundaki bileşenine ait m ve m' özdeğerleri ise;

$$\tilde{E}_{z'} - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta = m' + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_0 \quad [3.39]$$

$$\tilde{E}_{z'} = m + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_0 \quad [3.40]$$

yazılır. Bulunan bu iki denklemde verilen \tilde{E}_z' terimi düzenlendiğinde;

$$m + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_0 - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta = m' + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_0 \quad [3.41]$$

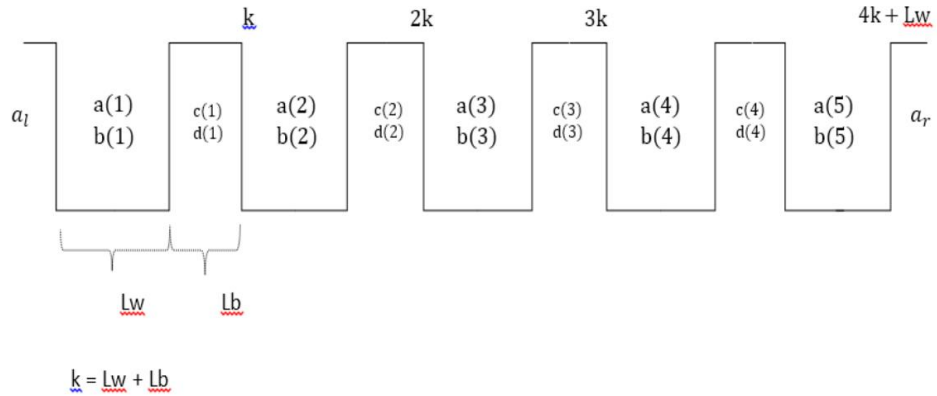
olur. Bu denklemin sonucunda m ve m' sırasıyla kuyu ve bariyer bölgesi için kuantum sayılarıdır ve aralarında;

$$m - m' = \tilde{V}_0 \cos^2 \theta \quad [3.42]$$

bağıntısı bulunur.

3.2. Çoklu Kuantum Kuyularında Geçiş Matrisleri Yöntemi

Bu tez çalışmasında beş kuantum kuyusunun enerji özdeğerleri Mathematica programı ile hesaplandı. Öncelikle çoklu kuantum kuyusuna geçiş matrisleri yöntemi uygulanarak ilk bariyer bölgesinin a_l katsayısı son bariyer bölgesinin a_r katsayısı cinsinden tanımlanarak dalga fonksiyonunun normalizasyon katsayısı belirlenmiştir.



Şekil 3.4 Yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyulu yapının katsayılar cinsinden gösterimi.

Şekil 3.4' de a ve b katsayıları ifade etmektedir. a_l katsayısı kuyunun solundaki ilk bariyer katsayısı iken a_r ise kuyunun sağındaki son bariyer katsayısıdır.

İlk olarak ilk bariyer bölgesi ve komşu ilk kuyu bölgesi için dalga fonksiyonları yazılıp sınır değerinde kendisi ve türevleri eşitlenir. Çözümlerde Weber fonksiyonlarının (w_b ile gösterilmiştir) üzerindeki “b” indisi bariyeri, “w” ise kuyu bölgesini ifade eder.

$$a_l w_b^b(-0) = a(1) w_b^w(0) + b(1) w_b^w(-0) \quad [3.43]$$

denklemin türevi alınırsa;

$$-a_l w_b^{w'}(-0) = a(1)w_b^{w'}(0) - b(1)w_b^{w'}(-0) \quad [3.44]$$

olur. Bu iki denklem matrisler cinsinden yazılırsa;

$$\begin{pmatrix} a(1) \\ b(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(0) & w_b^w(-0) \\ w_b^{w'}(0) & -w_b^{w'}(-0) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^b(-0) & 0 \\ 0 & -w_b^{b'}(-0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_l \\ a_l \end{pmatrix} \quad [3.45]$$

olur. Burada Denklem [3.45]'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^b(-0) & 0 \\ 0 & -w_b^{b'}(-0) \end{pmatrix} = mi1 \quad [3.46]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^w(0) & w_b^w(-0) \\ w_b^{w'}(0) & -w_b^{w'}(-0) \end{pmatrix}^{-1} = mi2 \quad [3.47]$$

$$mst = mi1 mi2 \quad [3.48]$$

$$\begin{pmatrix} a(1) \\ b(1) \end{pmatrix} = mst \begin{pmatrix} a_l \\ a_l \end{pmatrix} \quad [3.49]$$

olarak yeniden tanımlandı.

İlk kuyu ile ilk bariyerin sınırında ($z=Lw$) dalga fonksiyonlarının kendisi ve türevleri eşitlendiğinde;

$$a(1)w_b^w(Lw) + b(1)w_b^w(-Lw) = c(1)w_b^b(Lw) + d(1)w_b^b(-Lw) \quad [3.50]$$

$$a(1)w_b^{w'}(Lw) - b(1)w_b^{w'}(-Lw) = c(1)w_b^{b'}(Lw) - d(1)w_b^{b'}(-Lw) \quad [3.51]$$

$$\begin{pmatrix} a(1) \\ b(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(Lw) & w_b^w(-Lw) \\ w_b^{w'}(Lw) & -w_b^{w'}(-Lw) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^b(Lw) & w_b^b(-Lw) \\ w_b^{b'}(Lw) & -w_b^{b'}(-Lw) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(1) \\ d(1) \end{pmatrix} \quad [3.52]$$

olur. Denklem [3.52] de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^b(Lw) & w_b^b(-Lw) \\ w_b^{b'}(Lw) & -w_b^{b'}(-Lw) \end{pmatrix} = mi3 \quad [3.53]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^w(Lw) & w_b^w(-Lw) \\ w_b^{w'}(Lw) & -w_b^{w'}(-Lw) \end{pmatrix}^{-1} = mi4 \quad [3.54]$$

$$M_1 = mi3 mi4 \quad [3.55]$$

$$\begin{pmatrix} a(1) \\ b(1) \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} c(1) \\ d(1) \end{pmatrix} \quad [3.56]$$

olarak yeniden tanımlandı.

İlk bariyer ile ikinci kuyu sınırı ($Lw + Lb = k$)'da dalga fonksiyonları için;

$$c(1)w_b^b(k) + d(1)w_b^b(-k) = a(2)w_b^w(k) + b(2)w_b^w(-k) \quad [3.57]$$

$$c(1)w_b^{b'}(k) - d(1)w_b^{b'}(-k) = a(2)w_b^{w'}(k) - b(2)w_b^{w'}(-k) \quad [3.58]$$

$$\begin{pmatrix} c(1) \\ d(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^b(k) & w_b^b(-k) \\ w_b^{b'}(k) & -w_b^{b'}(-k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^w(k) & w_b^w(-k) \\ w_b^{w'}(k) & -w_b^{w'}(-k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(2) \\ b(2) \end{pmatrix} \quad [3.59]$$

olur. Denklem [3.59] de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^w(k) & w_b^w(-k) \\ w_b^{w'}(k) & -w_b^{w'}(-k) \end{pmatrix} = mi5 \quad [3.60]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^b(k) & w_b^b(-k) \\ w_b^{b'}(k) & -w_b^{b'}(-k) \end{pmatrix}^{-1} = mi6 \quad [3.61]$$

$$M_2 = mi5 \ mi6 \quad [3.62]$$

$$\begin{pmatrix} c(1) \\ d(1) \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} a(2) \\ b(2) \end{pmatrix} \quad [3.63]$$

olarak tanımlandı. $M_1 M_2 = M$ olmak üzere;

$$\begin{pmatrix} a(1) \\ b(1) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} a(2) \\ b(2) \end{pmatrix} \quad [3.64]$$

yazılır.

İkinci kuyu ile ikinci bariyerin sınırı ($z = k + Lw$)'da dalga fonksiyonları ve türev bağıntıları;

$$\begin{aligned} a(2)w_b^w(k + Lw) + b(2)w_b^w(-(k + Lw)) = \\ c(2)w_b^b(k + Lw) + d(2)w_b^b(-(k + Lw)) \end{aligned} \quad [3.65]$$

$$\begin{aligned} a(2)w_b^{w'}(k + Lw) - b(2)w_b^{w'}(-(k + Lw)) = \\ c(2)w_b^{b'}(k + Lw) - d(2)w_b^{b'}(-(k + Lw)) \end{aligned} \quad [3.66]$$

$$\begin{pmatrix} a(2) \\ b(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(k+Lw) & w_b^w(-(k+Lw)) \\ w_b^{w'}(k+Lw) & -w_b^{w'}(-(k+Lw)) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^b(k+Lw) & w_b^b(-(k+Lw)) \\ w_b^{b'}(k+Lw) & -w_b^{b'}(-(k+Lw)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(2) \\ d(2) \end{pmatrix} \quad [3.67]$$

olur. Denklem [3.67] 'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^w(k+Lw) & w_b^w(-(k+Lw)) \\ w_b^{w'}(k+Lw) & -w_b^{w'}(-(k+Lw)) \end{pmatrix}^{-1} = mi8 \quad [3.68]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^b(k+Lw) & w_b^b(-(k+Lw)) \\ w_b^{b'}(k+Lw) & -w_b^{b'}(-(k+Lw)) \end{pmatrix} = mi7 \quad [3.69]$$

$$M_3 = mi7 \ mi8 \quad [3.70]$$

$$\begin{pmatrix} a(2) \\ b(2) \end{pmatrix} = M_3 \begin{pmatrix} c(2) \\ d(2) \end{pmatrix} \quad [3.71]$$

olarak yeniden tanımlandı.

Denklem [3.63] ve denklem [3.71] kullanarak $M_2 M_3 = M_k$ olmak üzere;

$$\begin{pmatrix} c(1) \\ d(1) \end{pmatrix} = M_k \begin{pmatrix} c(2) \\ d(2) \end{pmatrix} \quad [3.72]$$

yazılır.

İkinci bariyer ile üçüncü kuyu sınırı ($2k$)'da dalga fonksiyonları ve türevleri ise;

$$c(2)w_b^b(2k) + d(2)w_b^b(-2k) = a(3)w_b^w(2k) + b(3)w_b^w(-2k) \quad [3.73]$$

$$c(2)w_b^{b'}(2k) - d(2)w_b^{b'}(-2k) = a(3)w_b^{w'}(2k) - b(3)w_b^{w'}(-2k) \quad [3.74]$$

$$\begin{pmatrix} c(2) \\ d(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^b(2k) & w_b^b(-2k) \\ w_b^{b'}(2k) & -w_b^{b'}(-2k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^w(2k) & w_b^w(-2k) \\ w_b^{w'}(2k) & -w_b^{w'}(-2k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(3) \\ b(3) \end{pmatrix} \quad [3.75]$$

olur. Denklem [3.75] 'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^w(2k) & w_b^w(-2k) \\ w_b^{w'}(2k) & -w_b^{w'}(-2k) \end{pmatrix} = mi9 \quad [3.76]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^b(2k) & w_b^b(-2k) \\ w_b^{b'}(2k) & -w_b^{w'}(-2k) \end{pmatrix}^{-1} = mi10 \quad [3.77]$$

$$M_4 = mi9 \ mi10 \quad [3.78]$$

$$\begin{pmatrix} c(2) \\ d(2) \end{pmatrix} = M_4 \begin{pmatrix} a(3) \\ b(3) \end{pmatrix} \quad [3.79]$$

olarak tanımlandı.

Üçüncü kuyu ile üçüncü bariyerin sınırı ($z=2k+Lw$)'da dalga fonksiyonları ve türevleri;

$$\begin{aligned} a(3)w_b^w(2k+Lw) + b(3)w_b^w(-(2k+Lw)) = \\ c(3)w_b^b(2k+Lw) + d(3)w_b^b(-(2k+Lw)) \end{aligned} \quad [3.80]$$

$$\begin{aligned} a(3)w_b^{w'}(2k+Lw) - b(3)w_b^{w'}(-(2k+Lw)) = \\ c(3)w_b^{b'}(2k+Lw) - d(3)w_b^{b'}(-(2k+Lw)) \end{aligned} \quad [3.81]$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a(3) \\ b(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(2k+Lw) & w_b^w(-(2k+Lw)) \\ w_b^{w'}(2k+Lw) & -w_b^{w'}(-(2k+Lw)) \end{pmatrix}^{-1} \\ \begin{pmatrix} w_b^b(2k+Lw) & w_b^b(-(2k+Lw)) \\ w_b^{b'}(2k+Lw) & -w_b^{b'}(-(2k+Lw)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(3) \\ d(3) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad [3.82]$$

olur. Denklem [3.82]'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^b(2k+Lw) & w_b^b(-(2k+Lw)) \\ w_b^{b'}(2k+Lw) & -w_b^{b'}(-(2k+Lw)) \end{pmatrix} = mi11 \quad [3.83]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^w(2k+Lw) & w_b^w(-(2k+Lw)) \\ w_b^{w'}(2k+Lw) & -w_b^{w'}(-(2k+Lw)) \end{pmatrix}^{-1} = mi12 \quad [3.84]$$

$$M_5 = mi11 \ mi12 \quad [3.85]$$

$$\begin{pmatrix} a(3) \\ b(3) \end{pmatrix} = M_5 \begin{pmatrix} c(3) \\ d(3) \end{pmatrix} \quad [3.86]$$

olarak yeniden tanımlandı.

Üçüncü bariyer ile dördüncü kuyu sınırı ($z=3k$)'da dalga fonksiyonları ve türevleri ise;

$$c(3)w_b^b(3k) + d(3)w_b^b(-3k) = a(4)w_b^w(3k) + b(4)w_b^w(-3k) \quad [3.87]$$

$$c(3)w_b^{b'}(3k) - d(3)w_b^{b'}(-3k) = a(4)w_b^{w'}(3k) - b(4)w_b^{w'}(-3k) \quad [3.88]$$

$$\begin{pmatrix} c(3) \\ d(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^b(3k) & w_b^b(-3k) \\ w_b^{b'}(3k) & -w_b^{b'}(-3k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^w(3k) & w_b^w(-3k) \\ w_b^{w'}(3k) & -w_b^{w'}(-3k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(4) \\ b(4) \end{pmatrix} \quad [3.89]$$

olur. Denklem [3.89] 'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^w(3k) & w_b^w(-3k) \\ w_b^{w'}(3k) & -w_b^{w'}(-3k) \end{pmatrix} = mi13 \quad [3.90]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^b(3k) & w_b^b(-3k) \\ w_b^{b'}(3k) & -w_b^{b'}(-3k) \end{pmatrix}^{-1} = mi14 \quad [3.91]$$

$$M_5 = mi13 \ mi14 \quad [3.92]$$

$$\begin{pmatrix} c(3) \\ d(3) \end{pmatrix} = M_5 \begin{pmatrix} a(4) \\ b(4) \end{pmatrix} \quad [3.93]$$

olarak yeniden tanımlandı.

Dördüncü kuyu ile dördüncü bariyerin sınırı ($z=3k+Lw$)'da dalga fonksiyonları ve türevleri;

$$\begin{aligned} a(4)w_b^w(3k + Lw) + b(4)w_b^w(-(3k + Lw)) = \\ c(4)w_b^b(3k + Lw) + d(4)w_b^b(-(3k + Lw)) \end{aligned} \quad [3.94]$$

$$\begin{aligned} a(4)w_b^{w'}(3k + Lw) - b(4)w_b^{w'}(-(3k + Lw)) = \\ c(4)w_b^{b'}(3k + Lw) - d(4)w_b^{b'}(-(3k + Lw)) \end{aligned} \quad [3.95]$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} a(4) \\ b(4) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(3k + Lw) & w_b^w(-(3k + Lw)) \\ w_b^{w'}(3k + Lw) & -w_b^{w'}(-(3k + Lw)) \end{pmatrix}^{-1} \\ \begin{pmatrix} w_b^b(3k + Lw) & w_b^b(-(3k + Lw)) \\ w_b^{b'}(3k + Lw) & -w_b^{b'}(-(3k + Lw)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(4) \\ d(4) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad [3.96]$$

olur. Denklem [3.96] 'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^b(3k + Lw) & w_b^b(-(3k + Lw)) \\ w_b^{b'}(3k + Lw) & -w_b^{b'}(-(3k + Lw)) \end{pmatrix} = mi15 \quad [3.97]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^w(3k + Lw) & w_b^w(-(3k + Lw)) \\ w_b^{w'}(3k + Lw) & -w_b^{w'}(-(3k + Lw)) \end{pmatrix}^{-1} = mi16 \quad [3.98]$$

$$M_6 = mi15 \ mi16 \quad [3.99]$$

$$\begin{pmatrix} a(4) \\ b(4) \end{pmatrix} = M_6 \begin{pmatrix} c(4) \\ d(4) \end{pmatrix} \quad [3.100]$$

olarak yeniden tanımlandı.

Dördüncü bariyer ile beşinci kuyu sınırı (4k)'da dalga fonksiyonları ve türevleri ise;

$$c(4)w_b^b(4k) + d(4)w_b^b(-4k) = a(5)w_b^w(4k) + b(5)w_b^w(-4k) \quad [3.101]$$

$$c(4)w_b^{b'}(4k) - d(4)w_b^{b'}(-4k) = a(5)w_b^{w'}(4k) - b(5)w_b^{w'}(-4k) \quad [3.102]$$

$$\begin{pmatrix} c(4) \\ d(4) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^b(4k) & w_b^b(-4k) \\ w_b^{b'}(4k) & -w_b^{b'}(-4k) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} w_b^w(4k) & w_b^w(-4k) \\ w_b^{w'}(4k) & -w_b^{w'}(-4k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(5) \\ b(5) \end{pmatrix} \quad [3.103]$$

olur. Denklem [3.103] 'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^w(4k) & w_b^w(-4k) \\ w_b^{w'}(4k) & -w_b^{w'}(-4k) \end{pmatrix} = mi17 \quad [3.104]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^b(4k) & w_b^b(-4k) \\ w_b^{b'}(4k) & -w_b^{b'}(-4k) \end{pmatrix}^{-1} = mi18 \quad [3.105]$$

$$M_7 = mi17 \ mi18 \quad [3.106]$$

$$\begin{pmatrix} c(4) \\ d(4) \end{pmatrix} = M_7 \begin{pmatrix} a(5) \\ b(5) \end{pmatrix} \quad [3.107]$$

olarak tanımlandı. Bu matris elemanlarını genel formda yazarsak;

$$c(N - 1) = M_7[1,1] a(N) + M_7[1,2] b(N) \quad [3.108]$$

$$d(N - 1) = M_7[2,1] a(N) + M_7[2,2] b(N) \quad [3.109]$$

elde edilir.

Son olarak beşinci kuyu ile bariyerin sol sınırı ($z=4k+Lw$)'da dalga fonksiyonları ve türevlerini yazarsak;

$$a(5)w_b^w(4k + Lw) + b(5)w_b^w(-(4k + Lw)) = a_7 w_b^b(4k + Lw) \quad [3.110]$$

$$a(5)w_b^{w'}(4k + Lw) - b(4)w_b^{w'}(-(4k + Lw)) = a_r w_b^{b'}(4k + Lw) \quad [3.111]$$

$$\begin{pmatrix} a(5) \\ b(5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_b^w(4k + Lw) & w_b^w(-(4k + Lw)) \\ w_b^{w'}(4k + Lw) & -w_b^{w'}(-(4k + Lw)) \end{pmatrix}^{-1} \\ \begin{pmatrix} w_b^b(4k + Lw) & 0 \\ 0 & w_b^{b'}(4k + Lw) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_r \\ a_r \end{pmatrix} \quad [3.112]$$

olur. Denklem [3.112]'de çarpım durumundaki matrisler;

$$\begin{pmatrix} w_b^b(4k + Lw) & 0 \\ 0 & w_b^{b'}(4k + Lw) \end{pmatrix} = mi19 \quad [3.113]$$

$$\begin{pmatrix} w_b^w(4k + Lw) & w_b^w(-(4k + Lw)) \\ w_b^{w'}(4k + Lw) & -w_b^{w'}(-(4k + Lw)) \end{pmatrix}^{-1} = mi20 \quad [3.114]$$

$$M_s = mi19 \ mi20 \quad [3.115]$$

$$\begin{pmatrix} a(5) \\ b(5) \end{pmatrix} = M_s \begin{pmatrix} a_r \\ a_r \end{pmatrix} \quad [3.116]$$

olur. Buradan Denklem [3.116]'i genellersek;

$$a(N) = (M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r \quad [3.117]$$

$$b(N) = (M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r \quad [3.118]$$

elde edilir.

Beş kuantum kuyusunun analitik çözümü, Weber fonksiyonları kullanılarak katsayılar cinsinden Denklem [3.117] ve Denklem [3.118] olarak elde edildi. Enerji özdeğerlerinin hesabının yapılabilmesi için yukarıda elde edilen tüm katsayı değerlerinin genel bağıntılar elde edildi. Bu genel bağıntıları Denklem [3.43] ve Denklem [3.64] kullanılarak;

$$a_i = [\{w_b^w(0)(\sum_{i=1}^N M)_{1,1} + w_b^w(-0)(\sum_{i=1}^N M)_{2,1}\}a(N) + \{w_b^w(0)(\sum_{i=1}^N M)_{1,2} + w_b^w(-0)(\sum_{i=1}^N M)_{2,2}\}b(N)]/w_b^b(-0) \quad [3.119]$$

$$\begin{pmatrix} a(i) \\ b(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} \\ M_{2,1} & M_{2,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a(N) \\ b(N) \end{pmatrix} \quad [3.120]$$

Denklem [3.117] ve Denklem [3.118] kullanarak Denklem [3.120] düzenlenirse;

$$a(i) = M_{1,1}(M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_{1,2}(M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r \quad [3.121]$$

$$b(i) = M_{2,1}(M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_{2,2}(M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r \quad [3.122]$$

elde ederiz. Denklem [3.72] kullanarak bariyer sayısı, kuyu sayısından (N) bir eksik olduğundan denklem genel olarak;

$$\begin{pmatrix} c(i) \\ d(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{k_{1,1}} & M_{k_{1,2}} \\ M_{k_{2,1}} & M_{k_{2,2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(N-1) \\ d(N-1) \end{pmatrix} \quad [3.123]$$

forma dönüşür. Denklem [3.121] ve Denklem [3.122] i kullanarak Denklem [3.123]'i düzenlediğinde genel formda;

$$c(i) = M_{k_{1,1}}\{M_7[1,1] a(N) + M_7[1,2] b(N)\} + M_{k_{1,2}}\{M_7[2,1] a(N) + M_7[2,2] b(N)\} \quad [3.124]$$

$$d(i) = M_{k_{2,1}}\{M_7[1,1] a(N) + M_7[1,2] b(N)\} + M_{k_{2,2}}\{M_7[2,1] a(N) + M_7[2,2] b(N)\} \quad [3.125]$$

elde edilir. Bu denklemleri de a_r ye bağlamak için Denklem [3.117] ve Denklem [3.118]'i kullanarak;

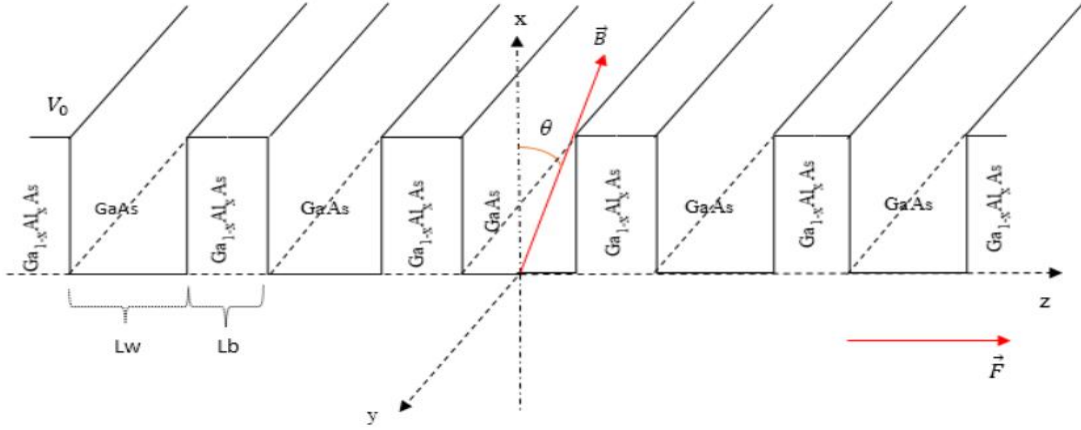
$$c(i) = M_{k_{1,1}}[M_7[1,1](M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_7[1,2](M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r] + M_{k_{1,2}}[M_7[2,1](M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_7[2,2](M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r] \quad [3.126]$$

$$d(i) = M_{k_{2,1}}[M_7[1,1](M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_7[1,2](M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r] + M_{k_{2,2}}[M_7[2,1](M_s[1,1] + M_s[1,2])a_r + M_7[2,2](M_s[2,1] + M_s[2,2])a_r] \quad [3.127]$$

elde edildi. Geçiş matrisleri yöntemi ile sistemin her bir bölgesi için tanımlanan dalga fonksiyonlarının katsayıları yukarıda anlatılan adımlarla tanımlanarak yazılıp katsayılar determinantı elemanları oluşturulup enerji özdeğerleri Mathematica programı kullanılarak hesaplandı.

4. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs YARIİLETKEN HETEROYAPIDAKİ BEŞ KUANTUM KUYUSUNUN OPTİK ÖZELLİKLERİ

4.1. Elektrik ve Eğik Manyetik Alan Altındaki Kuyu Parametrelerindeki Değişimler



Şekil 4.1 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunun şematik gösterimi.

Bu çalışmada iki Ga_{1-x}Al_xAs arasına bir GaAs eklenerek oluşturulan yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu üzerinde çalışıldı. Bu sistemde Ga_{1-x}Al_xAs, kuantum kuyusunun bariyer kısmını oluştururken GaAs kuyu bölgesini oluşturmaktadır. Literatürde de sıkça çalışılan bu yapının tercih edilmesinin sebebi Ga_{1-x}Al_xAs ile GaAs yarıiletkenlerinin birbirine çok yakın örgü sabitlerine sahip olmasıdır.

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere oluşturulan yapıda kuyu genişliği Lw, bariyer genişliği Lb ve potansiyel yükseklik ise V₀’dır. Kuantum kuyusuna uygulanan manyetik alanın büyüklüğüne ve eğiklik açısına bağlı kuyu parametrelerinin boyutsuz etkin değerleri sırasıyla; etkin kuyu genişliği L_{eff}, etkin bariyer genişliği L_{b,eff} ve etkin potansiyel yükseklik V_{eff} aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$L_{eff} = \tilde{L}w \cos\theta = \frac{\sqrt{2}}{a_H} Lw \cos\theta$$

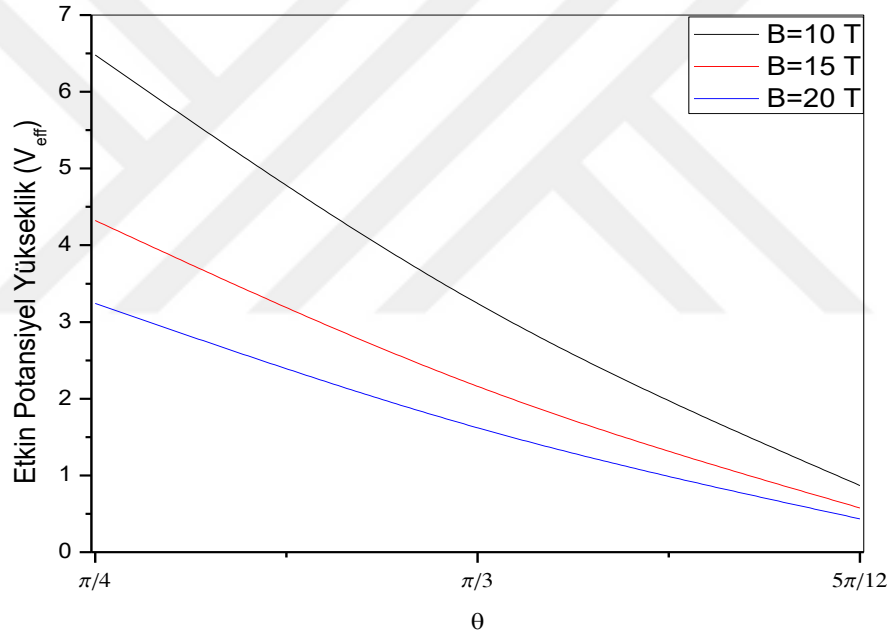
$$= \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\hbar}{m^* \omega}}} \right) Lw \cos\theta = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\hbar}{m^* \frac{eB}{m^*}}}} \right) Lw \cos\theta = \sqrt{\frac{2eB}{\hbar}} Lw \cos\theta \quad [4.1]$$

$$Lb_{eff} = \tilde{L}b \cos\theta = \frac{\sqrt{2}}{a_H} Lb \cos\theta$$

$$= \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\hbar}{m^* \omega}}} \right) Lb \cos\theta = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\hbar}{m^* \frac{eB}{m^*}}}} \right) Lb \cos\theta = \sqrt{\frac{2eB}{\hbar}} Lb \cos\theta \quad [4.2]$$

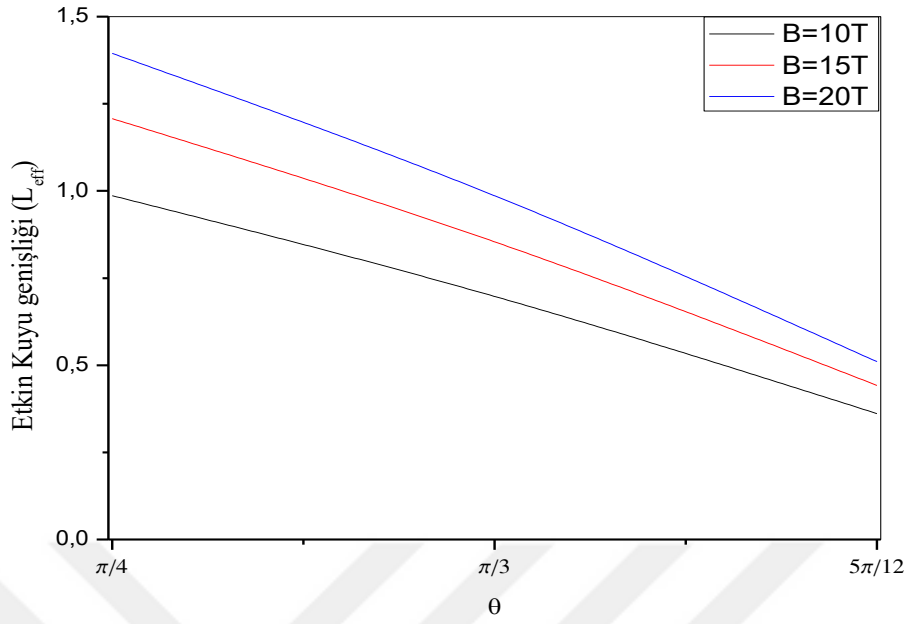
$$V_{eff} = \tilde{V}_0 \cos^2 \theta = \frac{V_0}{\hbar\omega} \cos^2 \theta = \frac{V_0}{\hbar eB/m^*} \cos^2 \theta \quad [4.3]$$

Denklem ([4.2] – [4.3]) incelendiğinde kuyu parametrelerinin uygulanan elektrik alandan bağımsızken buna karşılık kuyu parametrelerinin, uygulanan manyetik alan büyüklüğüne (B) ve manyetik alanın x- eksenine yaptığı açıya (θ) bağlı olduğu görülür.



Şekil 4.2 Farklı manyetik alan değerleri için etkin potansiyel yüksekliğinin açıya bağlı değişimi.

Şekil 4.2, farklı manyetik alan değerlerine karşı etkin potansiyel yüksekliğinin manyetik alanın eğiklik açısına bağlı değişimini gösterir. Şekil 4.2 incelendiğinde etkin potansiyel yükseklik, artan eğiklik açısı ve manyetik alan şiddetine bağlı olarak azaldığı görülür. Denklem [4.3]' de verildiği üzere V_{eff} , manyetik alan büyüklüğü ile ters orantılı ve aynı zamanda $\cos^2\theta$ terimi ile de doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4.3 Farklı manyetik alan değerleri için etkin kuyu genişliğinin açığa bağlı değişimi.

Şekil 4.3 farklı manyetik alan değerlerine karşı etkin kuyu genişliğinin manyetik alanın eğiklik açısına bağlı değişimini gösterir. Şekil 4.3 incelendiğinde etkin kuyu genişliğinin manyetik alan büyüklüğüne bağlı olarak arttığı ancak manyetik alanın eğiklik açısına bağlı olarak ise daraldığı görülür. Denklem [4.3]'de verildiği üzere etkin kuyu genişliği L_{eff} , manyetik alan büyüklüğünün karekökü ve $\cos \theta$ ile doğru orantılı olarak değişir.

4.2. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyusu İçin Elektronik Enerji Spektrumu

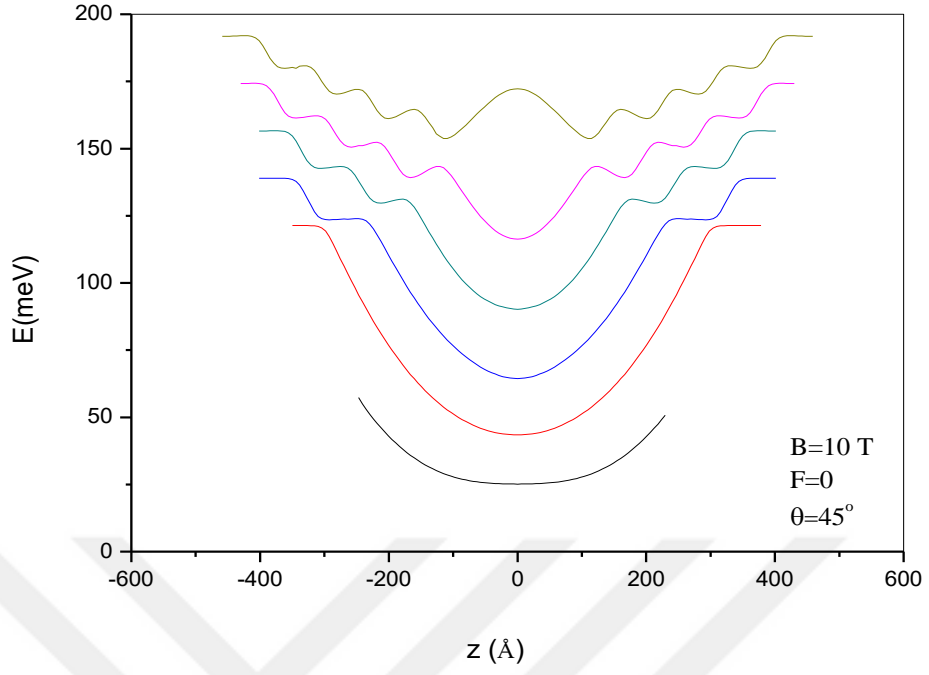
Elektrik ve eğik manyetik alan uygulanan kuantum kuyu yapılarında enerji düzeyleri için iki farklı durum söz konusudur. Bunlardan ilki kuantum kuyusu içerisinde uzaysal kuşatma altındaki düzeyler, ikinci durum ise uzaysal kuşatma bölgesinin üzerinde olup parabolik kuşatma bölgesinde bulunan düzeylerdir. Sistemdeki bütün enerji durumları aslında manyetik alanın oluşturduğu parabolik potansiyelin içinde kalır ve bu yüzden sistem içerisindeki tüm durumların hepsi bağlıdır. Sistemdeki enerji düzeylerinden bahsederken kuyu içerisindeki potansiyel yüksekliğin altında kalan enerji düzeyleri “bağlı düzeyler”, potansiyel yüksekliğin üzerinde kalan durumlar ise “genişletilmiş düzeyler” olarak adlandırıldı. Kuantum kuyusu içerisinde kalan bağlı durumlar uzaysal kuşatmanın etkisi daha baskınken potansiyel yükseklik dışında kalan genişletilmiş enerji düzeyleri ise hem uzaysal hem de manyetik kuşatma etkisinde kalır. Genişletilmiş

düzeyler her iki kuşatma etkisiyle küçük genlikli osilasyonlar yaparak büyük z değerlerinde Landau düzeylerine yerleşir ve ardışık her bir Landau düzeyleri arasındaki uzaklık ise gelen fotonun enerjisi yani $\hbar\omega$ kadardır. Kuantum kuyusunun parametreleri olan kuyu genişliği ve potansiyel yükseklik θ açısına bağlı olarak; kuyu genişliği $L_{\text{eff}} = L \cos \theta$, potansiyel yükseklik ise $V_{\text{eff}} = V_0 \cos^2 \theta$ olarak yazılır. Dolayısıyla θ açısının artmasıyla cosinüs terimine bağlı olarak kuyu genişliği daralırken, potansiyel yükseklik de aynı terimin karesine bağlı olarak azalır. Potansiyel yüksekliğinin üstünde kalan genişletilmiş enerji düzeyleri daha büyük z değerlerinde Landau düzeylerine yerleşmeye başlar. Artan açı değerleriyle kuyu ve bariyer genişliklerinin daralması ve potansiyel yüksekliğinin düşmesi sonucu uzaysal kuşatma altındaki enerji düzeyi sayısı azalmaktadır. Genişletilmiş düzeyler ise küçük genlikli osilasyonlar yaparak artan açı değerleriyle birlikte daha küçük enerji değerlerinde Landau düzeyine yerleşir.

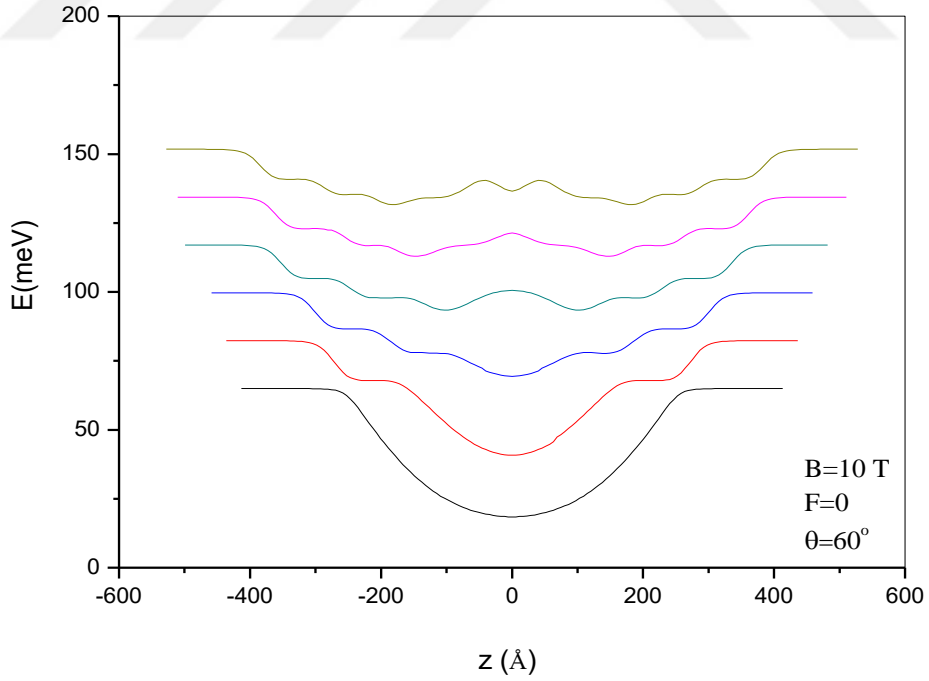
Bu çalışmada, GaAs ve AlAs bileşiklerinin örgü sabitleri (sırasıyla 5.65 Å ve 5.66 Å) uyumlu olmasından dolayı literatürde sıkça tercih edilen GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusundan oluşan yapıya elektrik ve eğik manyetik alan uygulandığında, yapının enerji spektrumu incelendi.

Bu sistemde Al konsantrasyonu $x = 0.4$ alındığında $V_0 = 225$ meV, kuyu genişliği $L_w = 80$ Å ve bariyer genişliği $L_b = 15$ Å olarak alınmıştır. Oluşturulan sisteme 45°, 60° ve 75° açı değerlerine karşılık sırasıyla 10 T, 15 T ve 20 T büyüklüğünde eğik manyetik alan ve büyütme doğrultusuna paralel $F=30$ kV/cm büyüklüğünde elektrik alan uygulanarak elektronik enerji spektrumu oluşturuldu. Beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin merkezi ($z_0 = 0$) üçüncü kuyunun ortası olarak ele alındı. Bu sistemde bariyer genişliği yeteri kadar küçük olduğundan, enerji düzeyleri etkileşen elektronlardan dolayı kuantum kuyu sayısı kadar yarılacaktır.

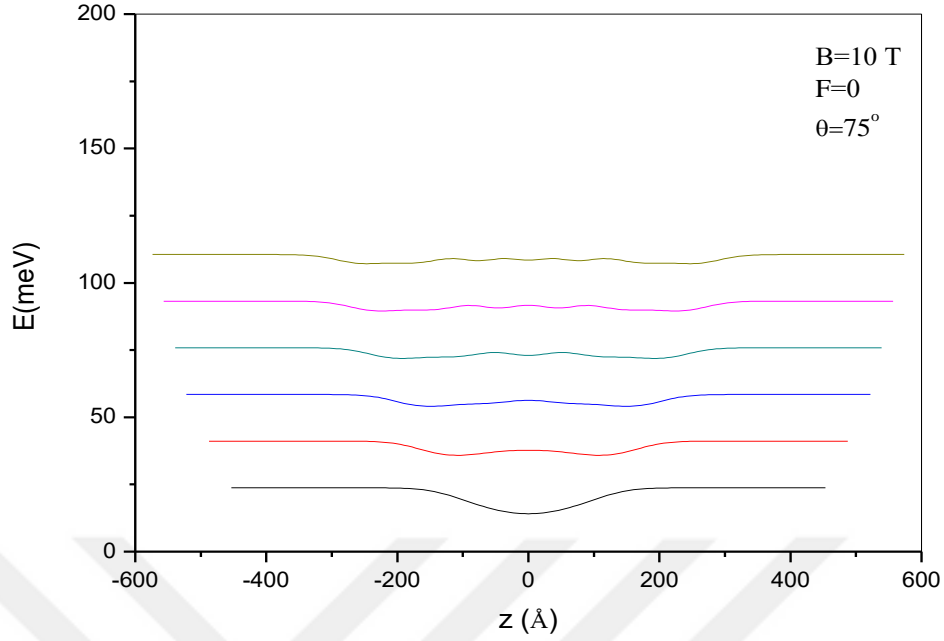
Beş kuantum kuyusundan oluşan sisteme $B=10$ T manyetik alan değerine karşılık değişen açı değerlerine göre elektronik enerji özdeğerleri bulundu ve ilk altı elektronik enerji düzeyini içeren grafikler z uzanımına karşı çizildi.



Şekil 4.4 $B=10$ T manyetik alan, $\theta=45^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.5 $B=10$ T manyetik alan, $\theta=60^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.

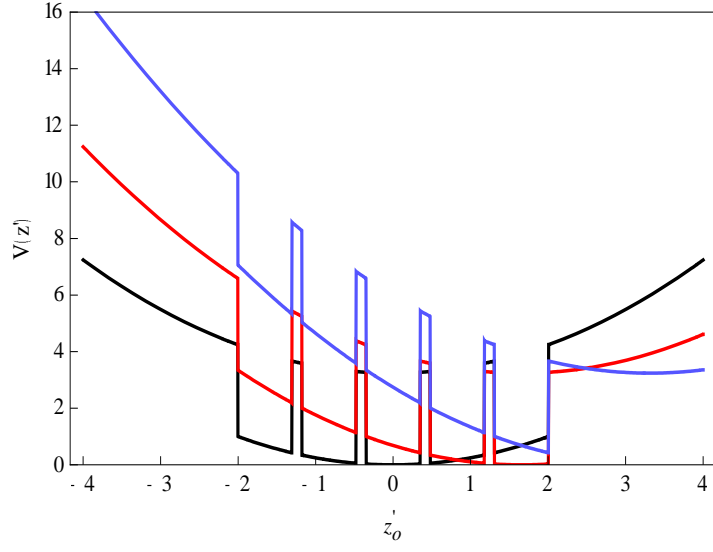


Şekil 4.6 $B=10$ T manyetik alan, $\theta =75^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.

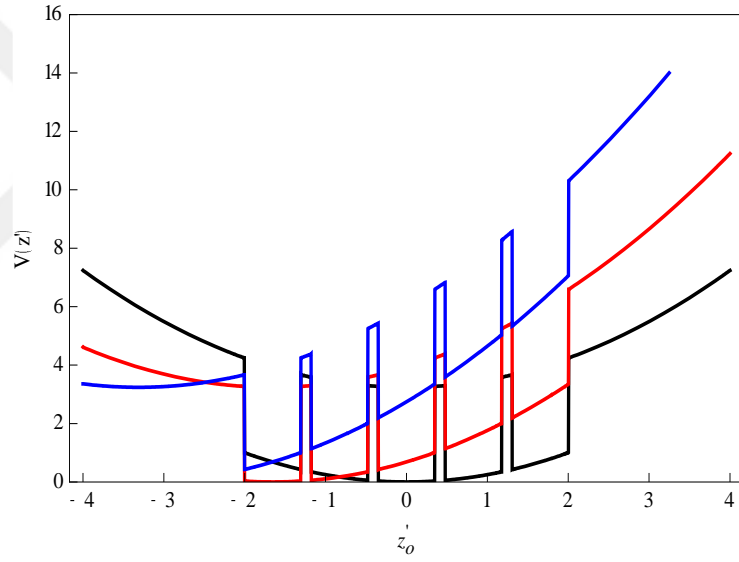
$B=10$ T büyüklüğünde eğik manyetik alan altındaki beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin enerji spektrumu Şekil 4.4 - Şekil.4.6' de görülmektedir. Şekil 4.4 incelediğinde ilk beş elektronik enerji seviyesinin uzaysal kuşatma etkisinde, kuyu içerisinde lokalize olduğu ancak altıncı enerji seviyesinin kuyu dışında, manyetik alanın etkisiyle oluşan parabolik potansiyel içerisinde yani genişletilmiş düzeyde bulunduğu görülmektedir. İlk enerji seviyesinin $\theta =45^\circ$ için 110 meV civarında potansiyel yüksekliğine ulaşarak ilk Landau düzeyine yerleşmesi beklenir. Ancak artan z değerlerinde Weber fonksiyonlarının osilasyon özelliğinden dolayı veri alınmadığından ilk enerji seviyesinin öngördüğümüz Landau düzeyine yerleştiği gösterilememiştir. Şekil 4.5' i incelediğimizde ilk enerji seviyesi $\theta = 60^\circ$ değerinde yaklaşık olarak 57 meV 'lik potansiyel yüksekliğe büyük z değerlerinde ilk Landau düzeyini yerleşir. İkinci enerji seviyesi yaklaşık 74 meV, üçüncü enerji seviyesi 91 meV ve diğer seviyeler ise sırasıyla yaklaşık olarak 108 meV, 125 meV ve 142 meV değerlerindeki Landau düzeylerine ulaştıkları görülür. Oluşan bu Landau düzeyleri arasındaki farka bakıldığında sabit bir değer olduğu bulunur. Enerji düzeyleri arasındaki bu büyüklük Landau düzeylerinin özelliğinden dolayı $\hbar\omega$ kadardır. Manyetik alanın x eksenine ile yaptığı açı arttıkça başlangıçta kuyu içerisinde bağlı olan durum sayısının giderek azaldığı Şekil 4.4 – Şekil 4.6' da açıkça görülmektedir. Açı değeri

arttıkça cosinüs teriminden dolayı hem kuyu genişliği hem de kuyu potansiyel yüksekliği azalır. Kuyu genişliğinin daralmasıyla enerji düzeyleri kuyu tabanından yükselirken aynı zamanda kuyunun potansiyel yüksekliğinin de düşmesiyle kuyu içerisindeki enerji düzeyleri uzaysal kuşatmadan kurtularak genişletilmiş düzeye geçerler. Böylelikle başlangıçta beş olan bağlı durum sayısı, açı değeri arttıkça önce 60^0 de ikiye sonra da 75^0 de bire düşmüştür. Açı değeri arttıkça kuyu ve bariyer genişlikleri daralırken potansiyel yükseklikleri düşmektedir. Bundan dolayı manyetik alan, büyütme doğrultusuna paralel uygulandığında (yani $\theta = 90^0$) uzaysal kuşatmanın etkisi tamamen ortadan kalkar ve enerji düzeyleri külçe Landau düzeylerine dönüşür.



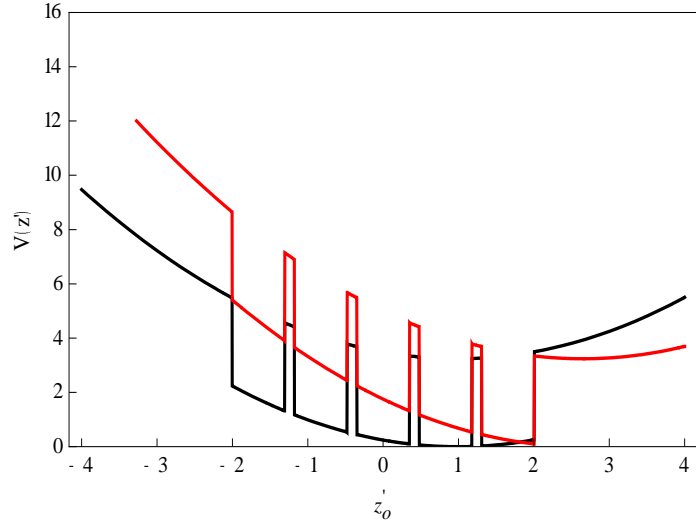


(a)

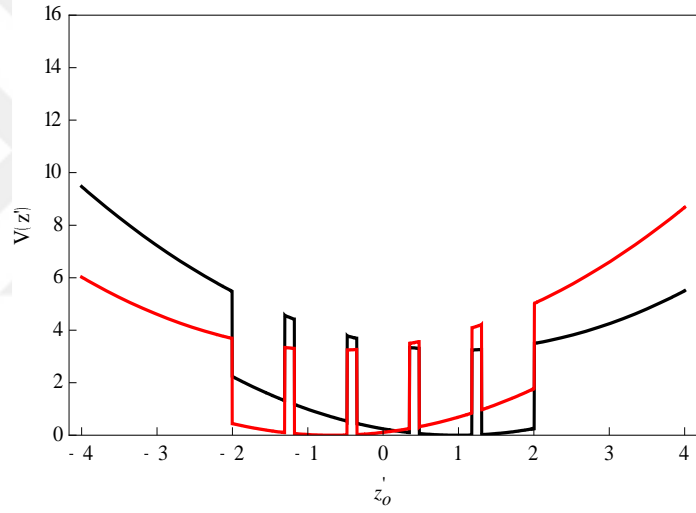


(b)

Şekil 4.7 Kuyu merkezi $z_0' = 0$ 'a göre potansiyel profilinin (a) pozitif ve (b) negatif yönde kayması.

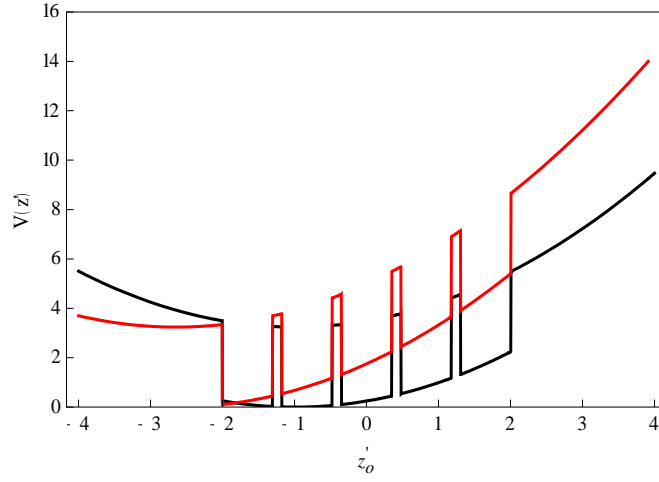


(a)

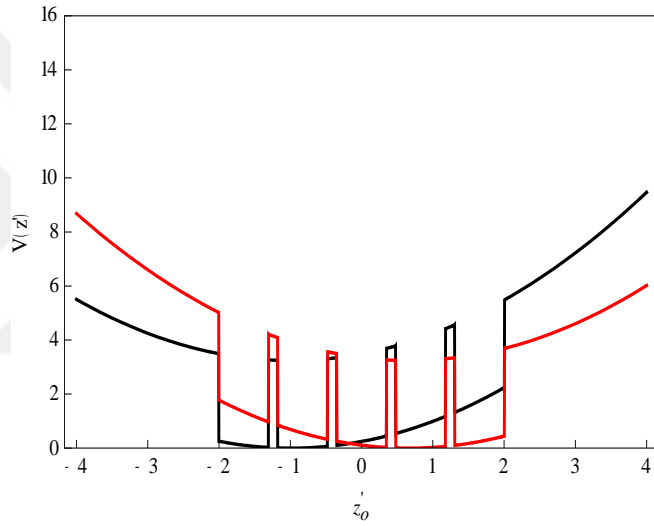


(b)

Şekil 4.8 $F=30$ kV/cm elektrik alan altında kuyu merkezi potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ ve $z_0' = 1,66$ 'a göre (b) $z_0' = 0$ ve $z_0' = -1,66$ 'a göre kayması.



(a)



(b)

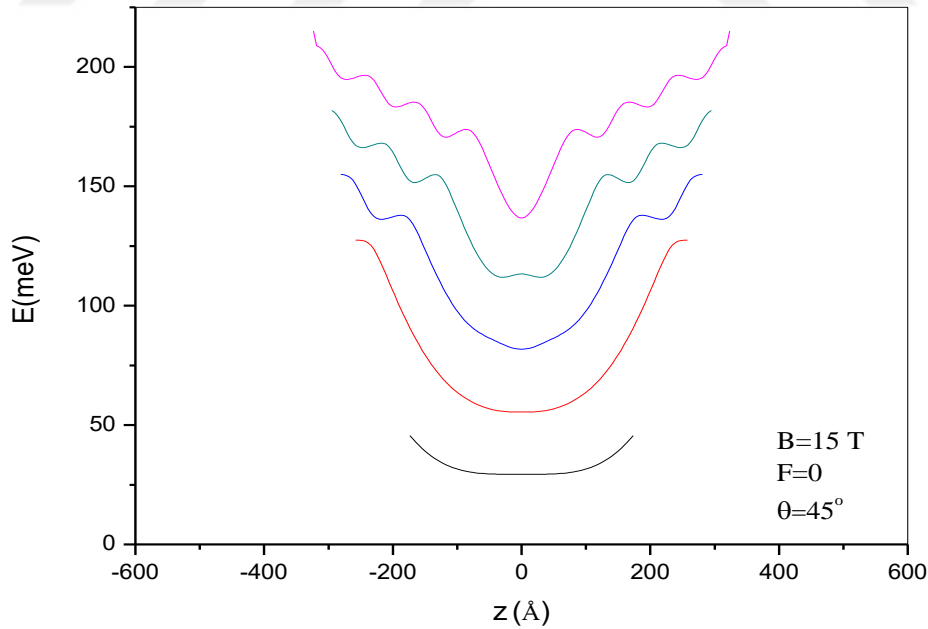
Şekil 4.9 $F=-30$ kV/cm elektrik alan altında kuyu merkezi potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ ve $z_0' = 1,66$ 'a göre (b) $z_0' = 0$ ve $z_0' = -1,66$ 'a göre kayması.

Şekil 4.7 (a ve b)' de örnek olarak seçilen $B=10$ T, $\theta = 60^0$, $F=0$ değerinde kuyu merkezinin seçimine bağlı olarak beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin potansiyel profilinin boyutsuz çizimleri gösterilmiştir. Şekil 4.7 (a)' da siyah renkle gösterilen grafikte, potansiyel merkezinin $z_0' = 0$ ' dan $z_0' = 2(Lwt+Lb) = 1,66$ değerine ötelenmesiyle oluşan yeni potansiyel profilinin merkezi (kırmızı) beşinci kuyunun ortasına kaymaktadır. Aynı şekilde kuyu merkezinin $z_0' = 0$ ' dan $z_0' = 4(Lwt+Lb) = 3,31$ değerine ötelenmesiyle potansiyel profili (mavi) kuantum kuyu bölgesinin dışında merkezlenmektedir. Şekil 4.7 (b)' de ise $z_0' = 0$ merkez koordinatının Şekil 4.7 (a)' da aldığımız z_0' değerlerinin negatifi olarak alınmasıyla çizilen potansiyel profilleri

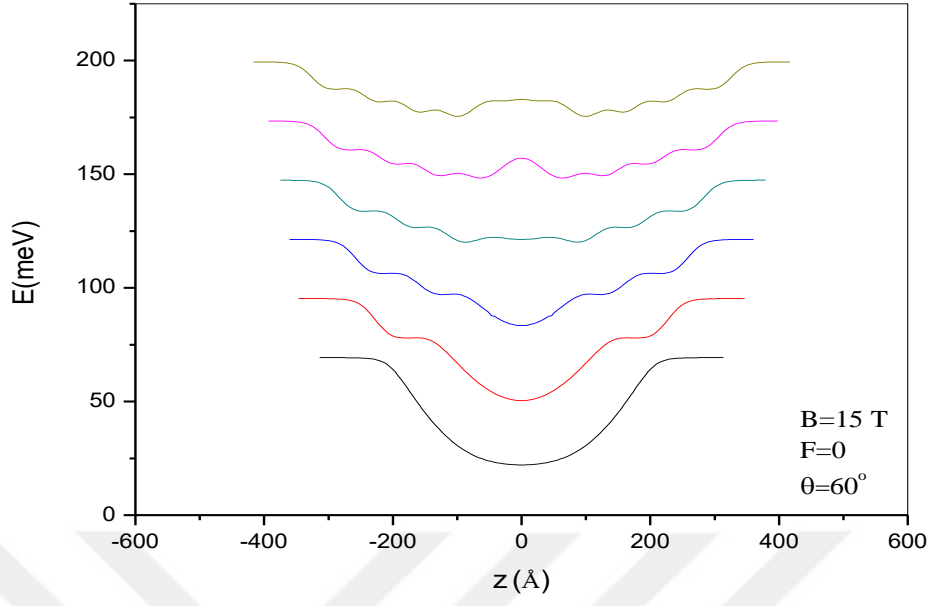
görülmektedir. Şekil 4.8 (a)' da seçilen kuyu merkezleri sırasıyla $z_0' = 0$ (siyah) ve $z_0' = 2(Lwt+Lb) = 1.66$ (kırmızı) $F=30$ kV/cm değerinde elektrik alan uygulanmasıyla kuyuların sağa doğru eğildiği görülmektedir. Şekil 4.8 (b)' de ise ikinci kuyu merkezinin $z_0' = -1.66$ (kırmızı) seçilmesiyle oluşan potansiyel profilinin sola doğru eğiminin arttığı, profilin simetrik görüntüye yaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.9 (a ve b)'de ise elektrik alanın $F= -30$ kV/cm uygulanmasıyla potansiyel profilin Şekil 4.8 (a ve b)'nin tersine sola doğru eğildiği görülmektedir. Sonuç olarak potansiyel merkezinin seçimi veya kuyuya elektrik alanın uygulanması ile manyetik alan etkisiyle oluşan parabolik potansiyelin minimum noktası değişmiş olur.

Yapılan bu çalışmada potansiyel merkezi olarak beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin orta noktası (3.kuyu merkezi) $z_0' = 0$ alınmış ve sistemin enerji özdeğerleri bu merkeze göre bulunmuştur.

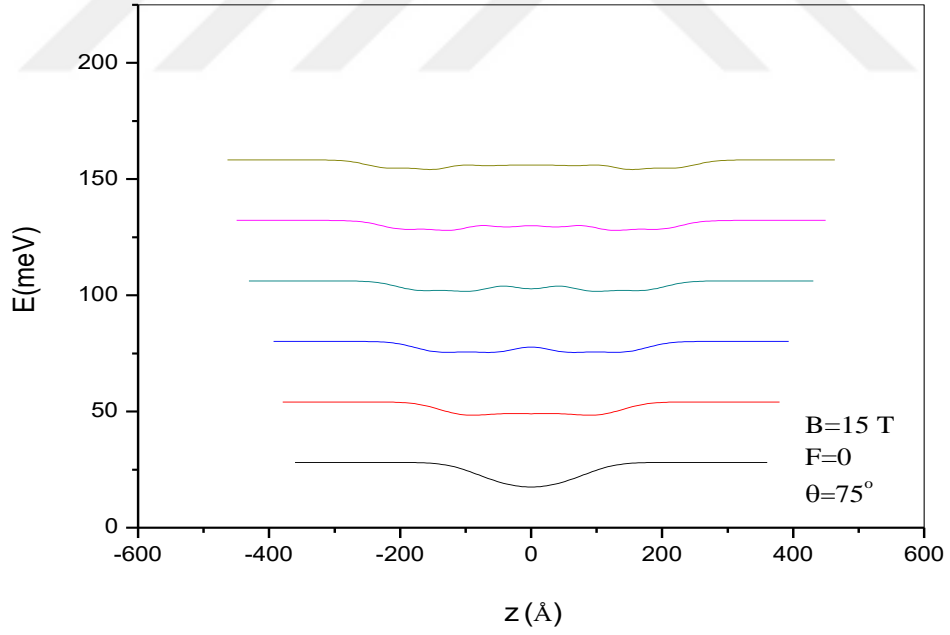
Şekil 4.10 – Şekil 4.15' de manyetik alan (B) büyüklüğünü ve manyetik alanın x-ekseniyle yaptığı açı (θ)'nın farklı değerlerine karşılık beş kuantum kuyusundan oluşan yapının enerji spektrumları incelenmiştir.



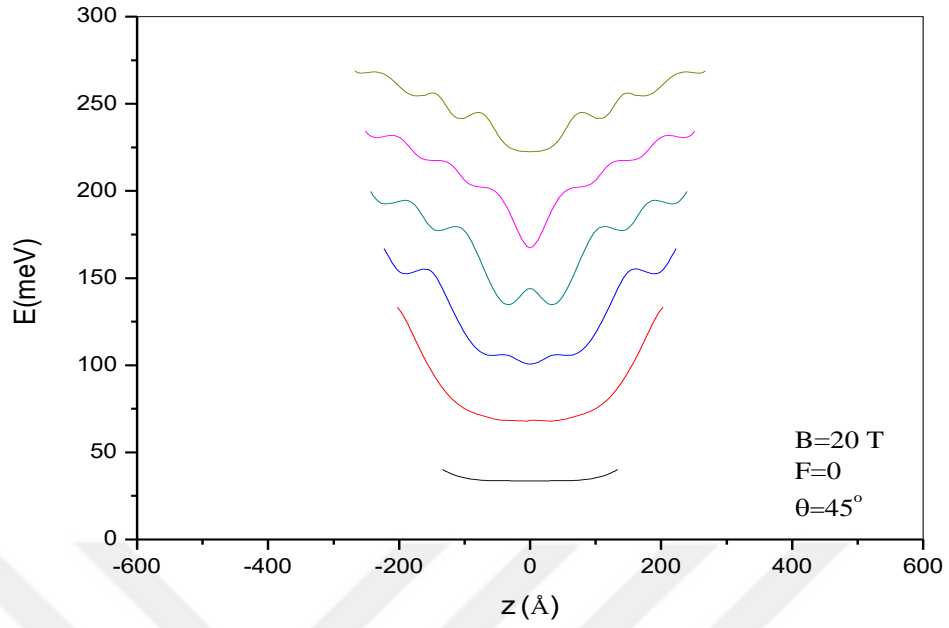
Şekil 4.10 $B=15$ T manyetik alan, $\theta=45^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



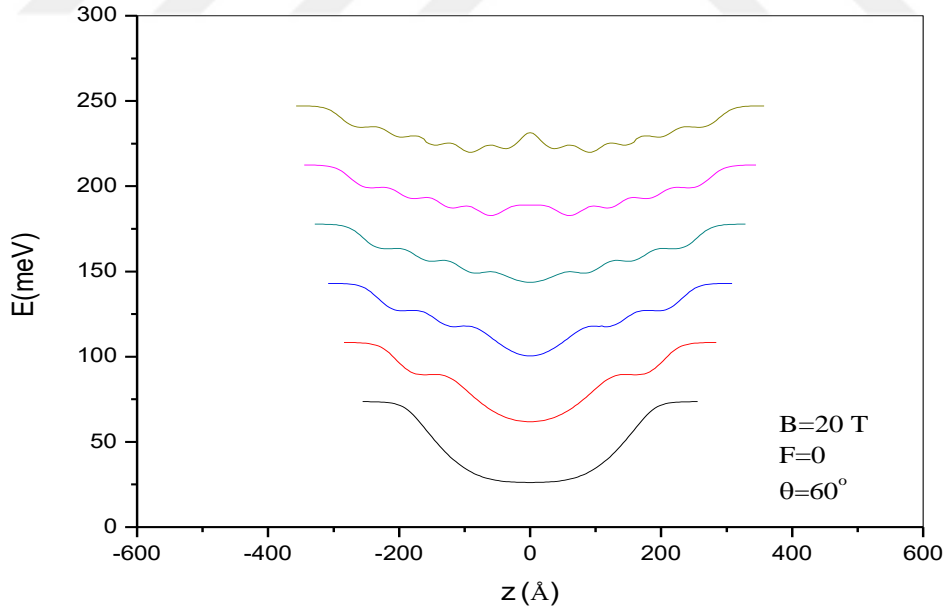
Şekil 4.11 $B=15$ T manyetik alan, $\theta=60^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



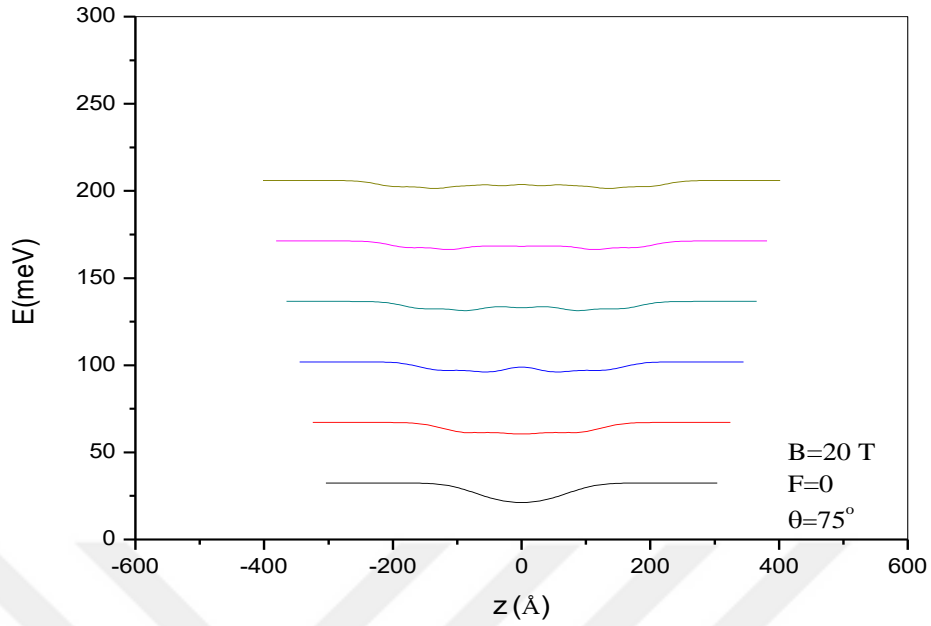
Şekil 4.12 $B=15$ T manyetik alan, $\theta=75^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.13 $B=20 \text{ T}$ manyetik alan, $\theta=45^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.14 $B=20 \text{ T}$ manyetik alan, $\theta=60^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.15 $B=20\text{ T}$ manyetik alan, $\theta=75^\circ$ ve elektrik alan değeri $F=0$ iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.

Şekil 4.10 – Şekil 4.15’lerde 15 T ve 20 T büyüklüğünde farklı eğiklik açısı altında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunun enerji seviyelerinin durumları gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde elektrik alanın uygulanmadığı 10 T büyüklüğündeki manyetik alan altındaki sistemin enerji spektrumuyla benzer yapıda oldukları görüldü.

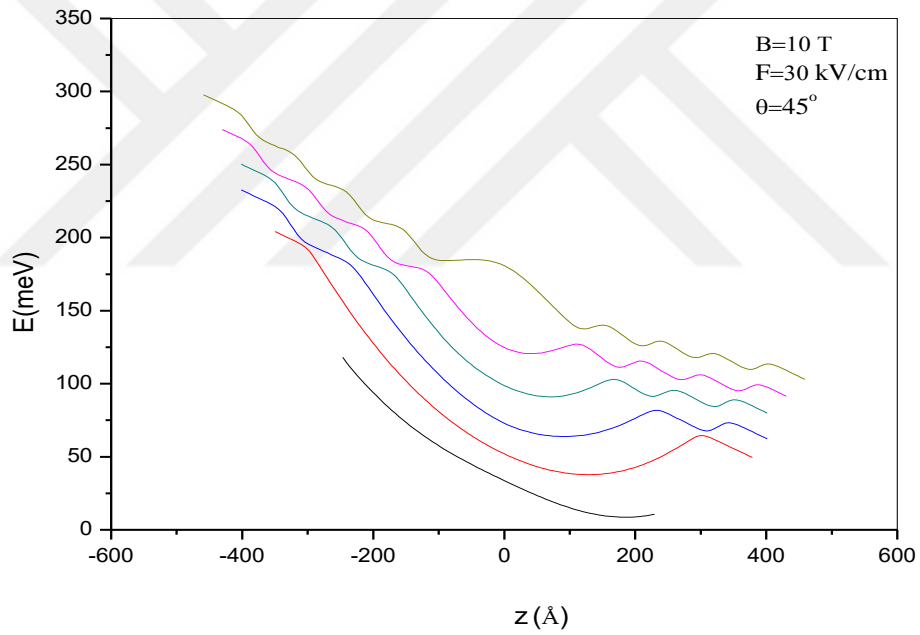
Şekil 4.10 - Şekil 4.15, incelendiğinde sabit eğiklik açısı altında manyetik alanın büyüklüğü arttıkça bağlı durum sayısının azaldığı görülür. Bu durum, kuyu genişliğinin \sqrt{B} ile orantılı artması ve potansiyel yüksekliğinin B ile orantılı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır. Kuyu parametrelerinin manyetik alana bağlı olarak değişimlerini ve enerji düzeylerinin durumunu incelediğimizde kuyu genişliğinin artmasıyla enerji düzeyleri tabana yaklaşırken, potansiyel yüksekliğinin azalmasıyla bu enerji düzeyleri uzaysal kuşatma bölgesinden genişletilmiş düzey bölgesine geçerler. Şekil 4.2 - Şekil 4.3’ de görüldüğü üzere manyetik alanın artmasıyla potansiyel yükseklikteki düşüş kuyu genişliğindeki artışa göre daha büyük değerde olduğundan enerji düzeylerinin uzaysal kuşatmadan kurtularak genişletilmiş düzeylere geçtiği görülür. Örneğin; Şekil (4.4), Şekil (4.8) ve Şekil (4.11)’ da sabit $\theta = 45^\circ$ açıda ve 10 T büyüklüğündeki manyetik alan

altında bağılı durum sayısı beş iken, 15 T manyetik alanda bağılı durum sayısı dörde ve aynı şekilde 20 T manyetik alan altında ise üçe düştüğü görülür.

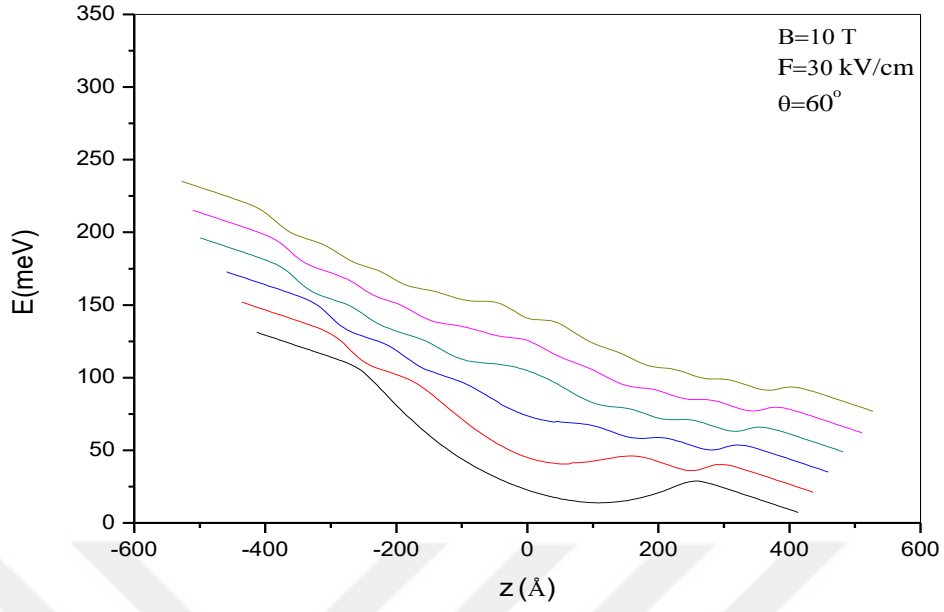
Sonuç olarak; manyetik alanın büyüklüğünün artması veya manyetik alanın eğiklik açısının artması sonucu kuyu içerisindeki bağılı enerji durumları uzaysal kuşatma altından kurtularak manyetik kuşatma bölgesine geçerler. Bunun sonucunda ise kuyu içerisindeki bağılı durum sayısı azalır.

4.3. Eğik Manyetik Alan Altında Beş Kuantum Kuyusuna Elektrik Alan Uygulanmasıyla Elektronik Enerji Spektrumunda Oluşan Değişimler

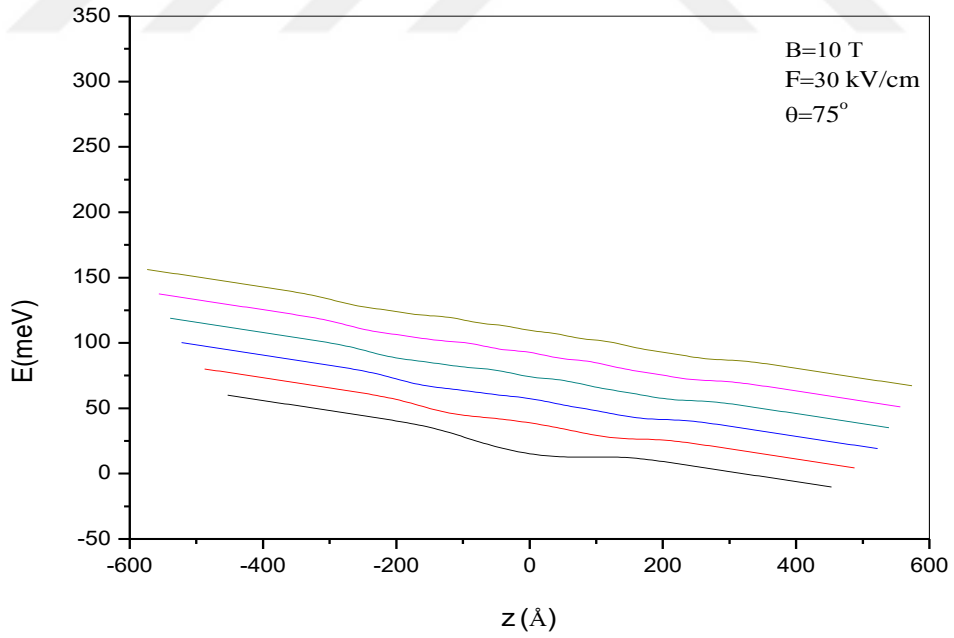
Eğik manyetik alan altındaki beş kuantum kuyusuna, yapının büyütme doğrultusuna paralel olarak z- eksenini boyunca $F=30$ kV/cm büyüklüğünde elektrik alanın uygulanmasıyla yapı üzerinde oluşan sonuçları inceleyelim.



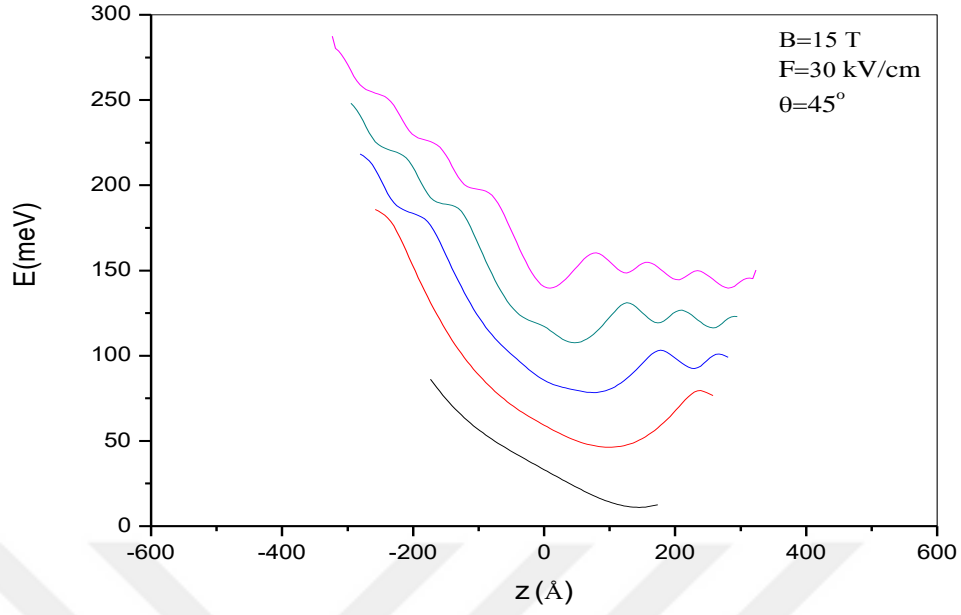
Şekil 4.16 $B=10$ T, $\theta=45^\circ$ ve $F=30$ kV/cm iken beş kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağılı değişimi.



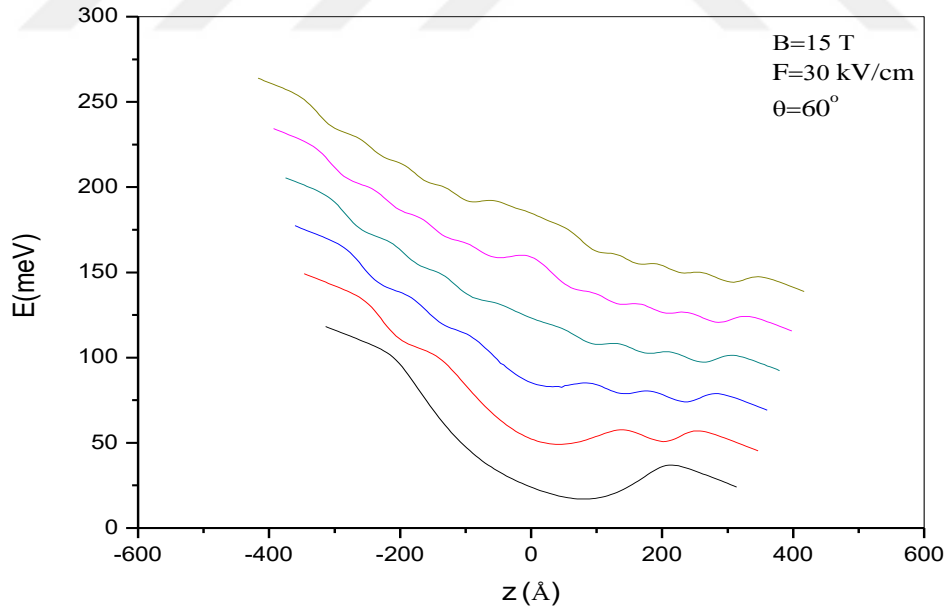
Şekil 4.17 $B=10$ T, $\theta=60^\circ$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



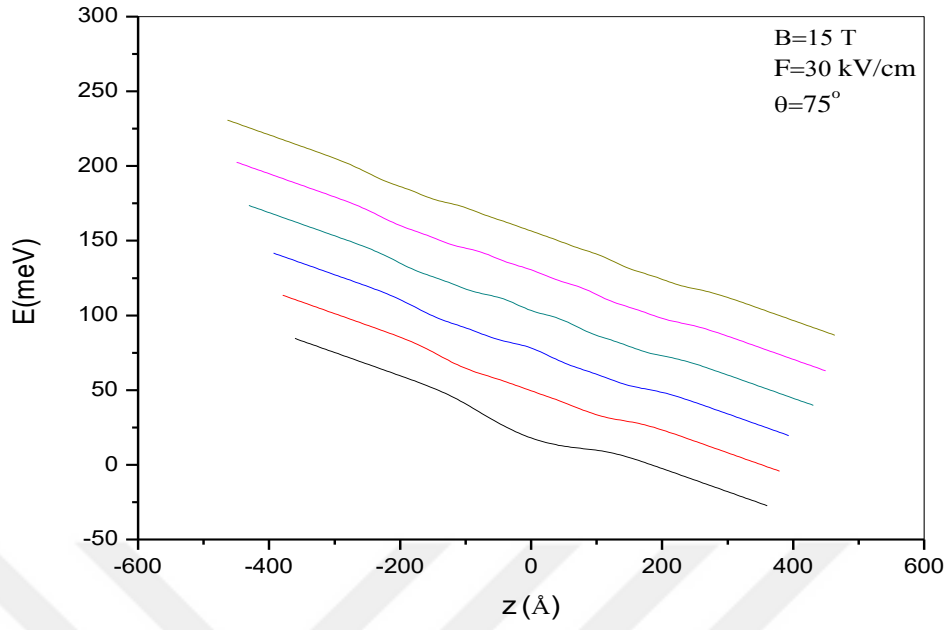
Şekil 4.18 $B=10$ T, $\theta=75^\circ$ ve $F=30$ kV/cm altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



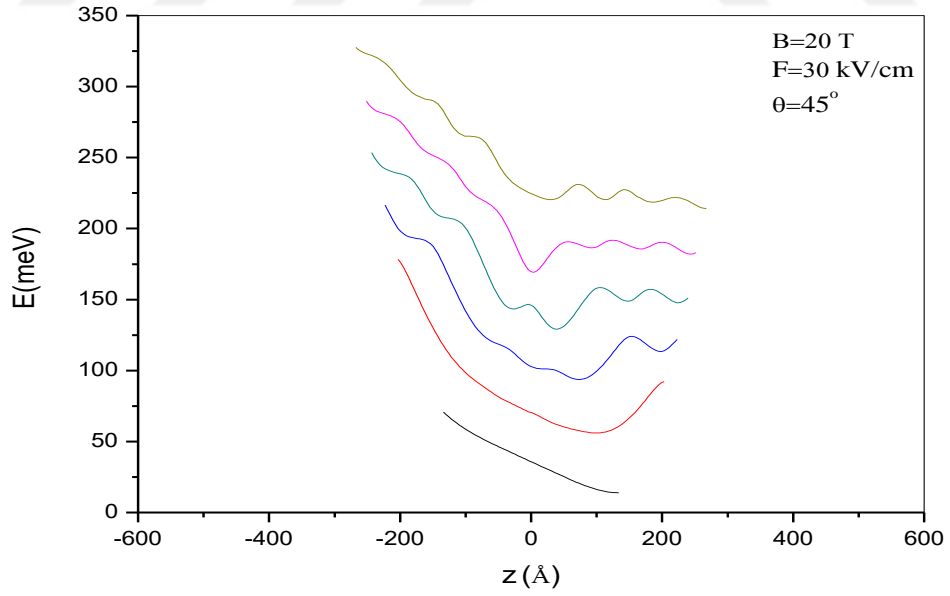
Şekil 4.19 $B=15 \text{ T}$, $\theta=45^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



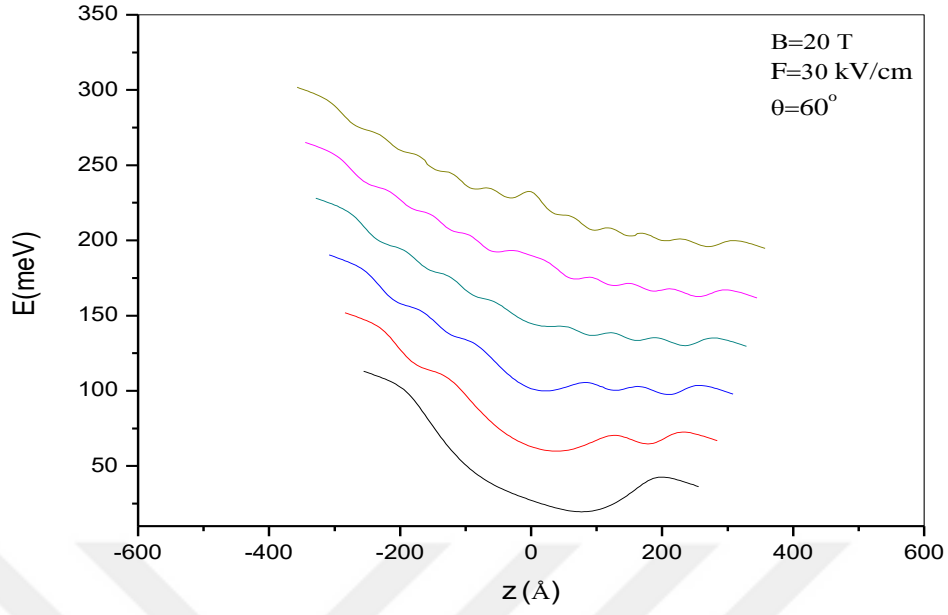
Şekil 4.20 $B=15 \text{ T}$, $\theta=60^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



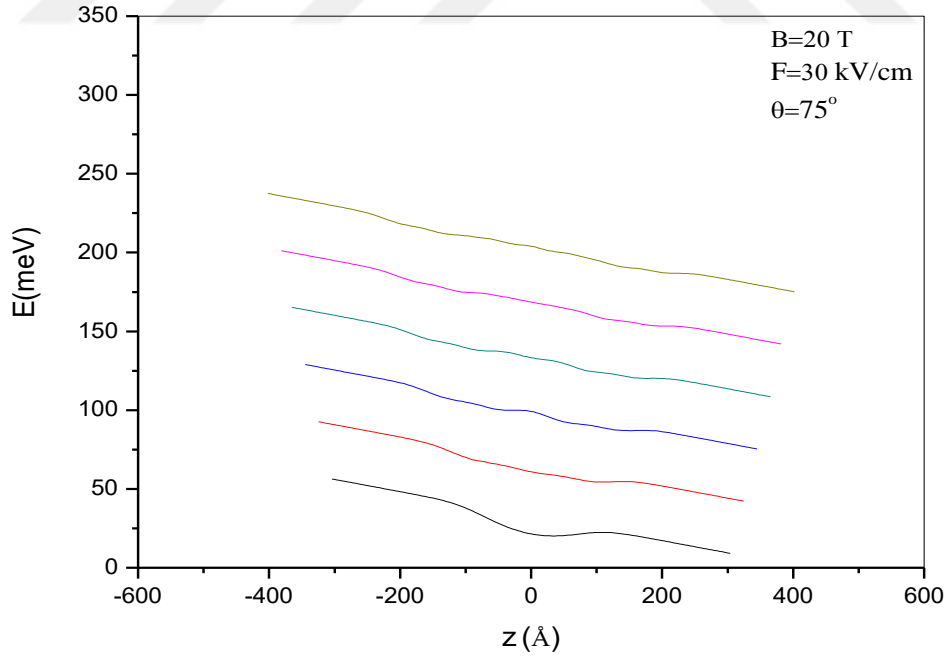
Şekil 4.21 $B=15 \text{ T}$, $\theta=75^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.22 $B=20 \text{ T}$, $\theta=45^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk beş enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.23 $B=20 \text{ T}$, $\theta=60^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.



Şekil 4.24 $B=20 \text{ T}$, $\theta=75^\circ$ ve $F=30 \text{ kV/cm}$ altında beş kuantum kuyusunun ilk altı enerji düzeyinin yörünge merkezine bağlı değişimi.

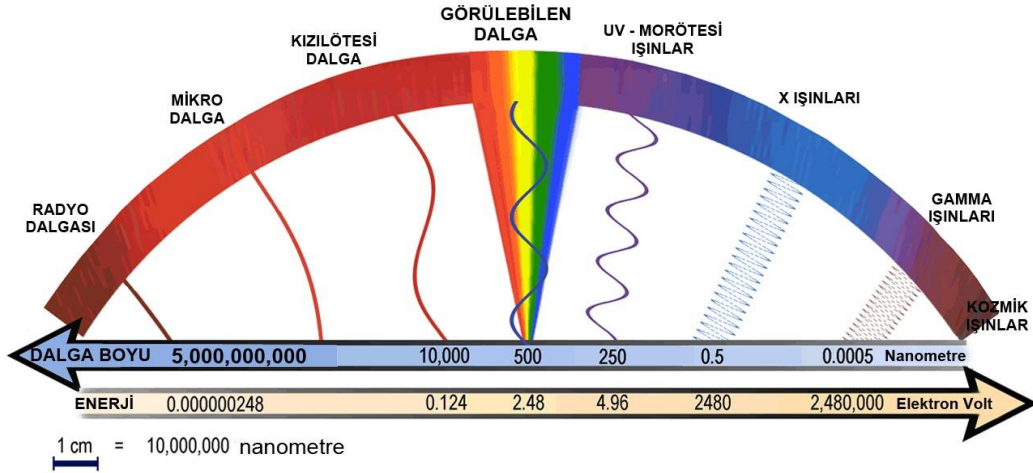
Şekil 4.16 - 4.24' de eğik manyetik alan altındaki beş kuantum kuyusuna büyütme doğrultusunda $F=30$ kV/cm büyüklüğünde elektrik alan uygulanmasıyla enerji spektrumlarındaki değişiklikler görülmektedir. Şekiller incelendiğinde elektrik alanın uygulanması sonucu yapının kuyu merkezine göre simetrisinin bozulması ile spektrumun elektrik alan etkisiyle eğildiği görülür. Elektrik alan uygulanması ile yörünge merkezi z_0 , $\tilde{\beta}'$ ya bağlı olarak $2\tilde{\beta}$ kadar sağa doğru kaydığı görüldü. Ayrıca manyetik alanın x-ekseniyle yaptığı açı arttıkça sistemin merkezinde oluşan kayma miktarı azalmaktadır. Bu kayma miktarı kuyu içerisindeki bağlı elektronik enerji seviyelerinde belirgin olarak görülürken diğer enerji seviyelerinde ise azalmaktadır.

4.4. Eğik Manyetik Alan ve Elektrik Alan Altındaki GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Yarıiletken Heteroyapıdaki Beş Kuantum Kuyusundaki Altbandlararası Soğurma Katsayıları

Bu bölümde elektrik ve eğik manyetik alan altında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu içerisinde bulunan elektronun foton ile uyarılması ile altbandlararası enerji seviyeleri arasında geçişi incelendi. $I=0.2$ MW/cm² ışık şiddeti, farklı manyetik alan ve eğiklik açıları kullanılarak gelen fotonun enerjisinin bir fonksiyonu olarak lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam optik soğurma katsayılarındaki değişimler incelendi. Soğurma katsayıları, elektrik ve manyetik alanın büyüklüğüne ve manyetik alanın eğiklik açısına bağlı olarak Mathematica programı yardımıyla hesaplandı ve soğurma katsayıları üzerindeki değişimler Origin Pro 8 programı kullanılarak çizildi.

Kuantum kuyusu içerisinde bulunan bir elektron, foton ile uyarıldığı zaman bir üst seviyeye geçiş yapar. Taban durumundaki elektronun ilk uyarılmış seviyeye geçebilmesi için gelen fotonun enerjisinin en az iki elektronik enerji seviyesi arasındaki enerji farkına eşit olması gerekir. Şekil 2.11'de verildiği üzere foton ile uyarılarak altbandlararası bir üst seviyeye geçen elektron çok kısa sürede tekrar alt seviyeye iner. Elektron alt seviyeye geçerken iki enerji seviyesi arasındaki fark kadarlık enerjiye sahip bir fotonu yayar. Elektronun yaydığı bu fotonun elektromanyetik dalga spektrumundaki yeri Şekil 4.25'de verilen şema kullanarak yorumlanabilir.

ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM



Şekil 4.25 Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik dalgaların sahip olduğu enerjileri ve dalgaboylarına göre gösterimi.

Şekil 4.25’de verilen elektromanyetik spektrum, sahip oldukları enerjileri ve dalgaboylarına göre elektromanyetik dalgaları gösterir. Elektromanyetik spektrumda, kızılötesi bölgeden morötesi bölgeye doğru elektromanyetik dalganın dalgaboyu azalmakta iken sahip olduğu enerjisi artar.

4.5. Eğik Manyetik Alanın Optik Soğurma Katsayıları Üzerindeki Etkisi

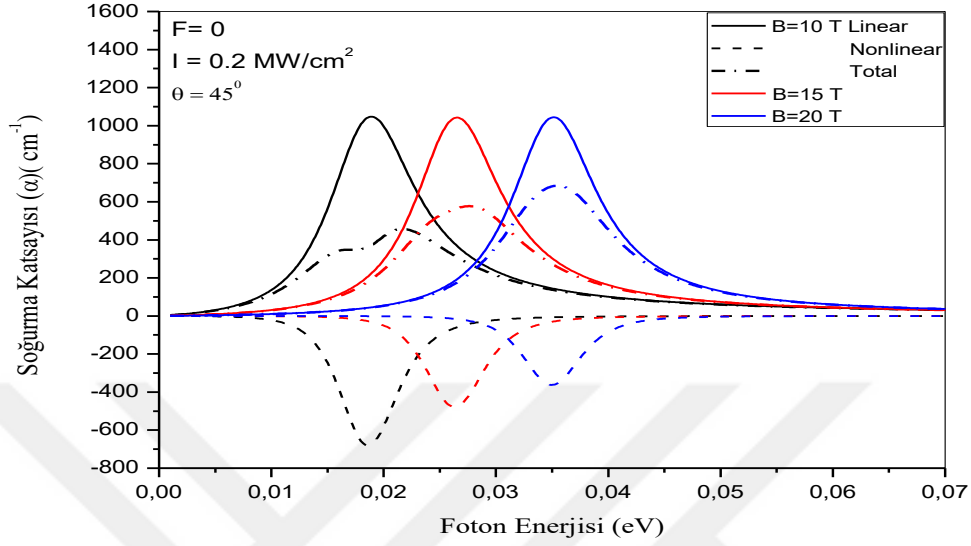
Beş kuantum kuyusunu içeren GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapı üzerine gönderilen ışık yardımıyla elektron taban durumundan üst enerji seviyesine uyarılır. Elektronun uyarıldığı enerji seviyesi ile ilk enerji seviyesi arasında oluşan fark $\Delta E = E_2 - E_1$ olarak verilir. Işık şiddetine ve ΔE ’ye bağlı olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları ise aşağıdaki gibi tanımlanır[7,21-24].

$$\alpha^{(1)}(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_R}} \frac{|M_{21}|^2 \sigma_V \hbar \Gamma_{12}}{(\Delta E - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \quad [4.4]$$

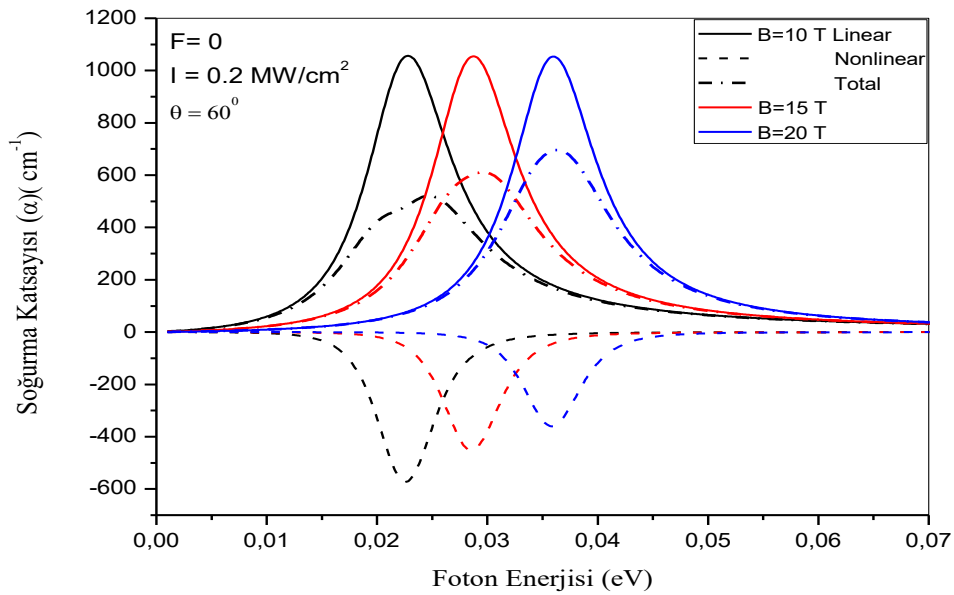
$$\alpha^{(3)}(\omega, I) = -2\omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_R}} \left(\frac{I}{\epsilon_0 n_r c} \right) \frac{|M_{21}|^4 \sigma_V \hbar \Gamma_{12}}{[(\Delta E - \hbar \omega)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2]^2} \times \left(1 - \frac{|M_{22} - M_{11}|^2}{|2M_{21}|^2} \frac{(\Delta E - \hbar \omega)^2 - (\hbar \Gamma_{12})^2 + 2(\Delta E)(\Delta E - \hbar \omega)}{(\Delta E)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2} \right) \quad [4.5]$$

$$\alpha(\omega, I) = \alpha^{(1)}(\omega) + \alpha^{(3)}(\omega, I) \quad [4.6]$$

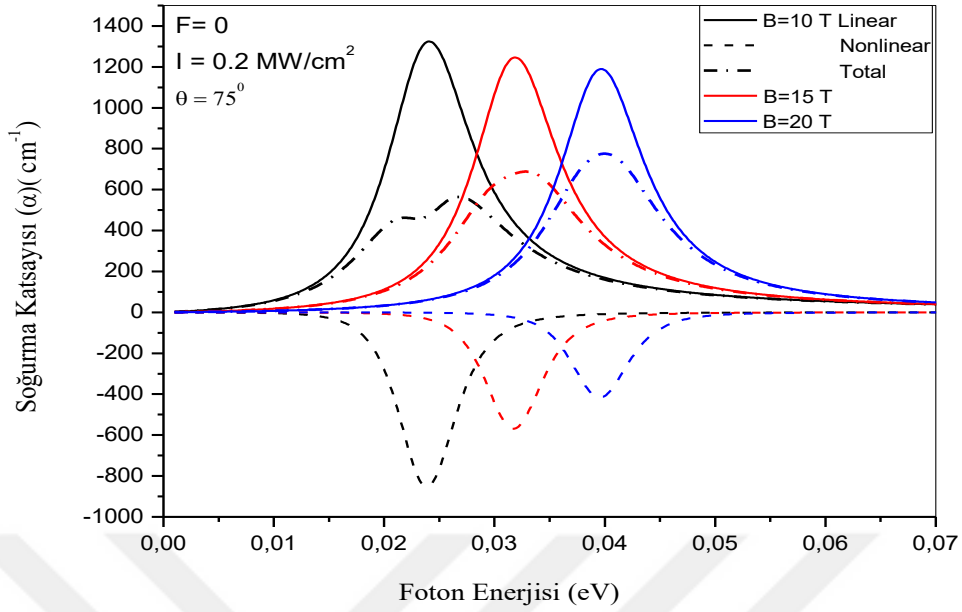
Beş kuantum kuyusu üzerine $B=10$ T, 15 T ve 20 T büyüklüğündeki manyetik alanlar uygulayarak lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayılarının gelen foton enerjisine bağlı değişim grafikleri çizildiğinde;



Şekil 4.26 $F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 45° eğiklik açısı için $B=10$ T, 15T ve 20T manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



Şekil 4.27 $F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 60° eğiklik açısı için $B=10$ T, 15T ve 20T manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



Şekil 4.28 $F=0$ büyüklüğünde elektrik alan ve 75^0 eğiklik açısı için $B=10T$, $15T$ ve $20T$ manyetik alan değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.

	B=10 T		B=15 T		B=20 T	
	F=0	F=30kV/cm	F=0	F=30kV/cm	F=0	F=30 kV/cm
Açı / Elektrik Alan						
	ΔE (meV)		ΔE (meV)		ΔE (meV)	
45^0	18.31	21.87	26.11	26.50	34.82	34.23
60^0	22.32	24.79	28.35	29.60	35.69	36.21
75^0	23.62	24.28	31.53	32.83	39.40	40.65

Çizelge-2 Manyetik alan, elektrik alan ve eğiklik açısına göre 1-2 enerji geçişleri için ΔE büyüklükleri.

Şekil 4.26 – Şekil 4.28’deki grafiklerde eğik manyetik alan altında değişen açı değerlerine karşılık lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayılarının foton enerjisine göre değişimleri gösterildi. Şekil 4.26 incelendiğinde manyetik alanın 10 T değerinden 20 T değerine doğru artması ile lineer soğurma pikinin maksimum değerinde neredeyse hiç değişiklik olmazken, lineer olmayan soğurma katsayısı azalmıştır. Bunun sonucunda manyetik alanın artışıyla toplam soğurma katsayısı artmaktadır. Ayrıca manyetik alan arttıkça toplam soğurma katsayısı üzerinde

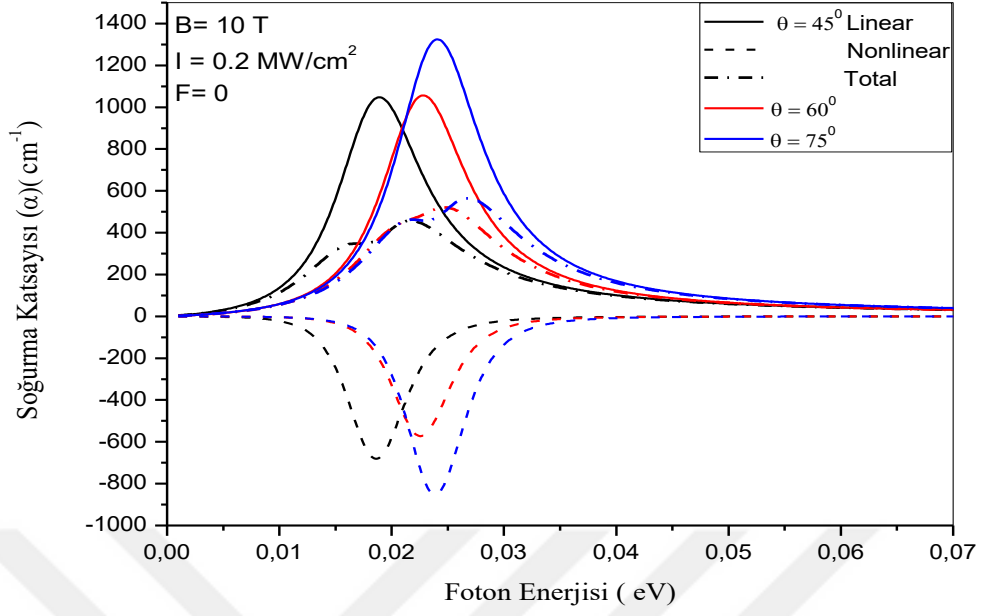
oluşan çiftlenim etkisi (bleaching effect) giderek azalır ve toplam soğurma katsayısının tepe noktası keskin durumuna geçer. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 incelendiğinde Şekil 4.26' e göre benzer durumlar görülür. Bu durumlar içerisindeki tek fark ise açı değerinin $\theta = 75^0$ olduğunda manyetik alanın büyüklüğünün artmasıyla lineer soğurma katsayısının pik yüksekliğinin azalmasıdır.

Şekil 4.26 – Şekil 4.28' de verildiği üzere manyetik alan değeri arttıkça grafiklerde soğurma katsayısı pik değeri sağa doğru (maviye) kaymaktadır. Bunun nedeni ise altbandlararası 1-2 enerji geçişi sırasında enerji seviyeleri arasındaki farkın (ΔE) artmasından kaynaklanır. Eğik manyetik alanın büyüklüğünün artmasıyla 1-2 enerji geçişleri arasındaki enerji farkının arttığı Çizelge-2' de açıkça görülür.

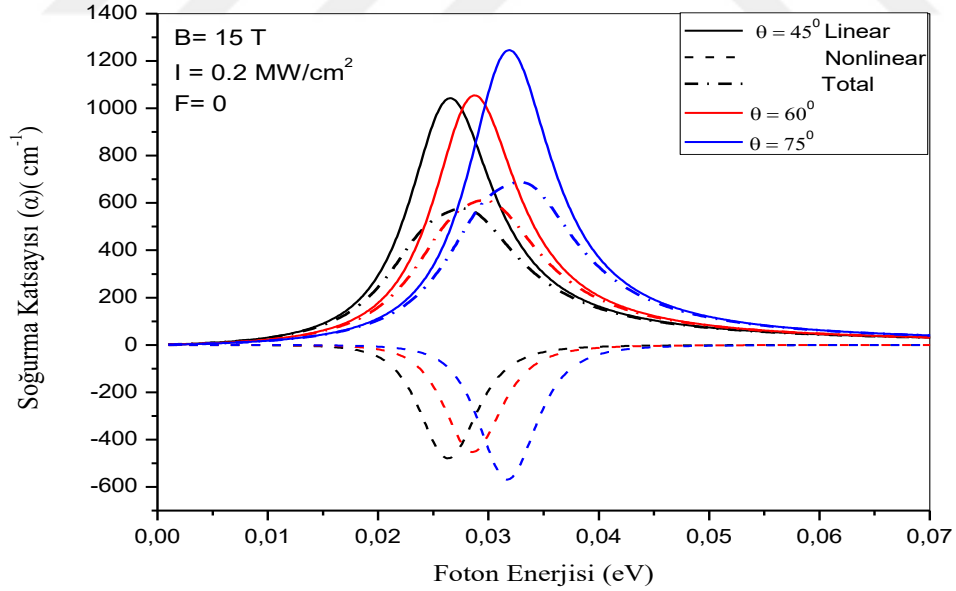
4.6. Manyetik Alanın Eğiklik Açısının Optik Soğurma Katsayılarına Etkisi

Beş kuantum kuyusuna uygulanan 10 T, 15 T ve 20 T büyüklüğündeki manyetik alanın x- eksenine yaptığı açıya bağlı olarak lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları üzerindeki etkisi incelendi. Sisteme uygulanan ışığın şiddeti 0.2 MW/cm^2 büyüklüğünde iken elektrik alan uygulanmadı.

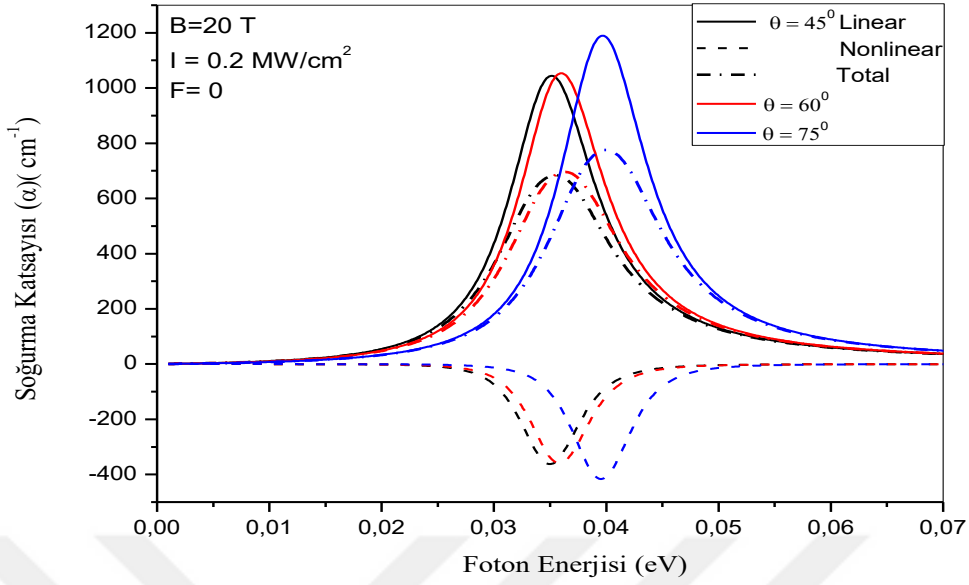
Daha önceki bölümlerde incelediğimiz gibi artan açı değeriyle birlikte kuyu ve bariyer genişlikleri daralmakta iken potansiyel yüksekliği azalmaktadır. Bunun sonucunda Çizelge – 2' de görüldüğü üzere taban durum elektronik enerji seviyesi ile birinci uyarılmış enerji seviyesi (1-2) arasındaki fark açı değerlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.29 $F=0$ elektrik alan ile $B=10$ T manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



Şekil 4.30 $F=0$ elektrik alan ile $B=15$ T manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



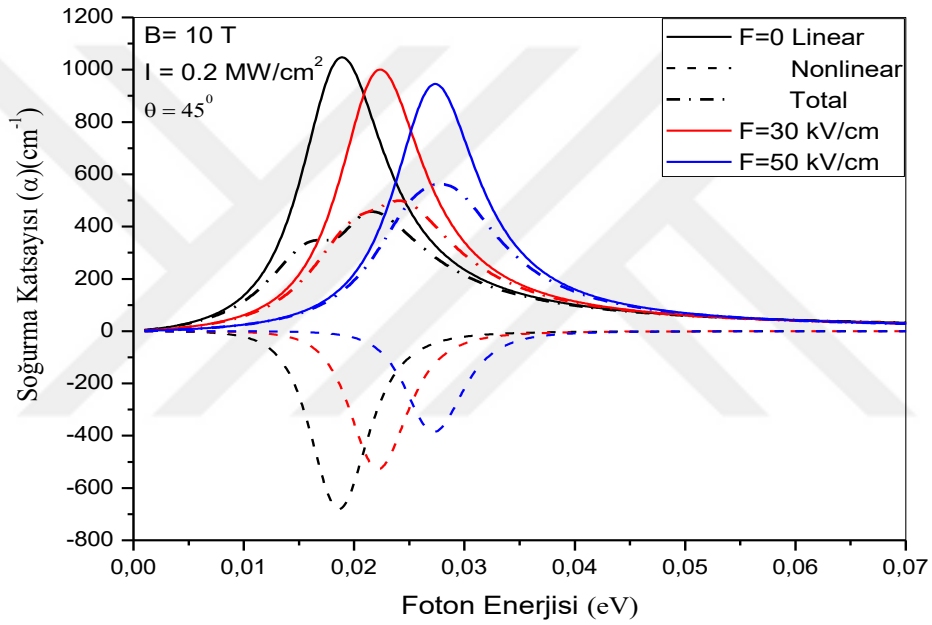
Şekil 4.31 $F=0$ elektrik alan ile $B=20 \text{ T}$ manyetik alan altında farklı açı değerleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.

Şekil 4.29 – Şekil 4.31 eğik manyetik alan altında beş kuantum kuyusunun altbandlararası 1-2 enerji geçişi için lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayılarının açığa bağlı olarak değişimi görülür. Bu grafikleri incelediğimizde manyetik alanın değişen büyüklüğüne karşılık 45° 'den 60° 'ye lineer soğurma katsayısı pik değeri neredeyse sabit kalırken lineer olmayan soğurma katsayısı ise azalmakta ve buna bağlı olarak da toplam soğurma katsayısı artmaktadır. Aynı zamanda bu geçişler sırasında toplam soğurma katsayısında oluşan çiftlenim etkisi giderek azalmaktadır. Eğik manyetik alan altında 60° 'den 75° 'ye geçişlerde hem lineer soğurma katsayısı hem de lineer olmayan soğurma katsayısı artmaktadır. Lineer soğurma katsayısındaki artış lineer olmayan soğurma katsayısındaki negatif artıştan fazla olmasından dolayı toplam soğurma katsayısı, küçük açı değerlerine göre artmakta ve toplam soğurma katsayısı üzerinde oluşan çiftlenim etkisi azalmaktadır. İncelenen tüm bu durumlarda açı değerinin artışı ile birlikte soğurma spektrumu grafiğin sağına doğru kaymaktadır. Çizelge-2 de verildiği üzere eğiklik açısı arttıkça ΔE değeri de artmaktadır. Böylelikle eğiklik açısının artmasıyla soğurma spektrumu maviye kayar.

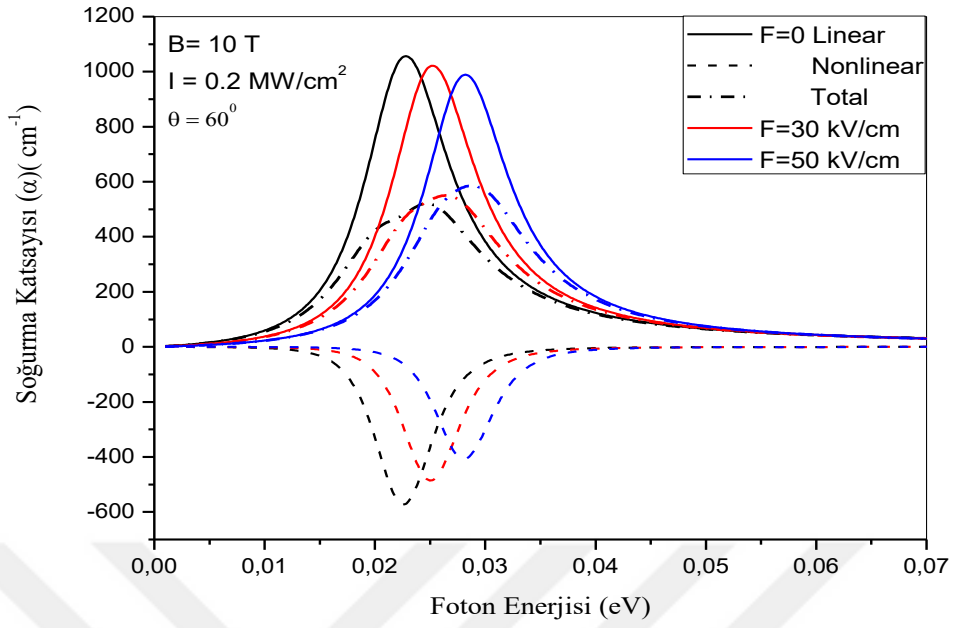
4.7. Elektrik Alanın Optik Soğurma Katsayıları Üzerindeki Etkisi

Beş kuantum kuyusuna elektrik alan uygulanmasıyla yapının simetrisi bozulur. Elektrik alan uygulanması kuyu parametrelerini değiştirmezken enerji seviyeleri arasındaki farkı çok az değiştirmektedir.

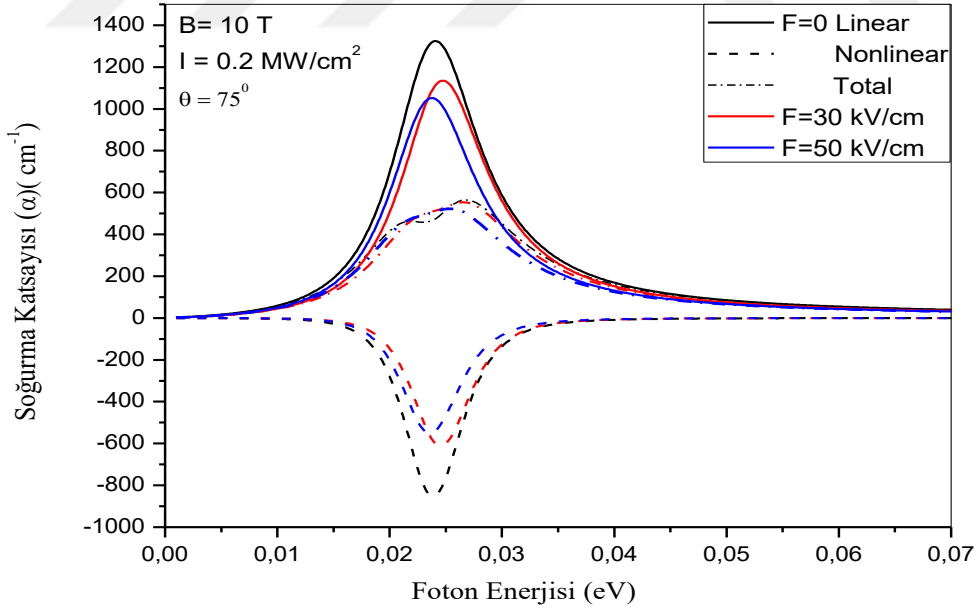
Bu bölümde, $I=0,2 \text{ MW/cm}^2$ ışık şiddeti ve 10 T, 15 T ve 20 T manyetik alan altında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunda farklı açı değerlerine karşılık $F=0$, $F=30 \text{ kV/cm}$ ve $F=50 \text{ kV/cm}$ elektrik alan büyüklüklerine göre sistemin lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları incelendi.



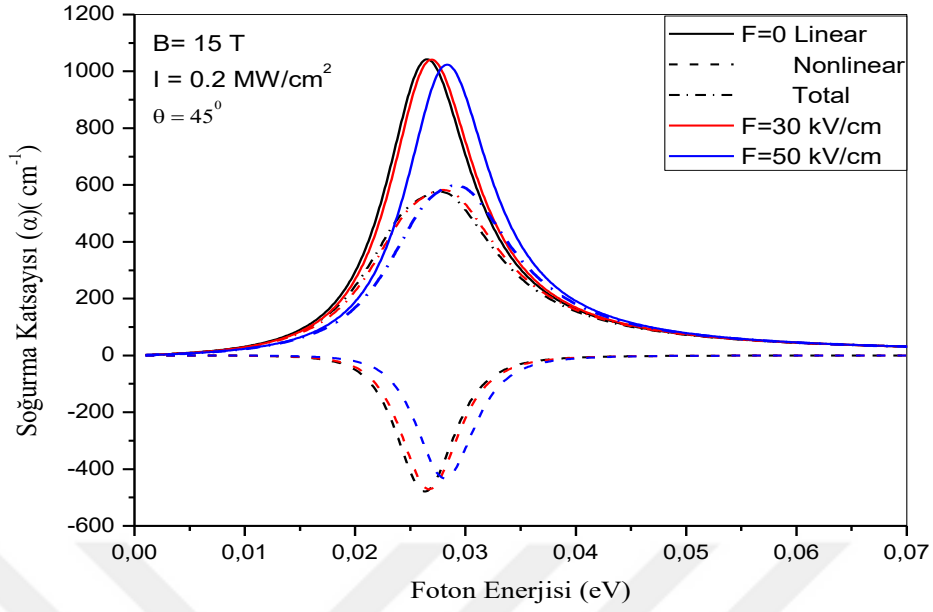
Şekil 4.32 B=10 T manyetik alan ve 45° açı altında F=0, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



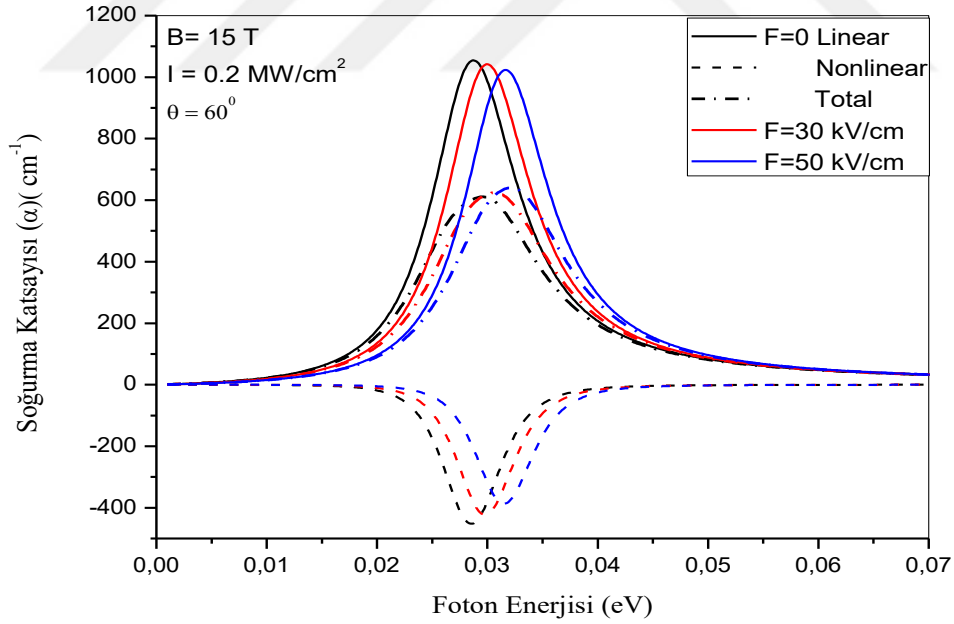
Şekil 4.33 $B=10$ T manyetik alan ve 60° açı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



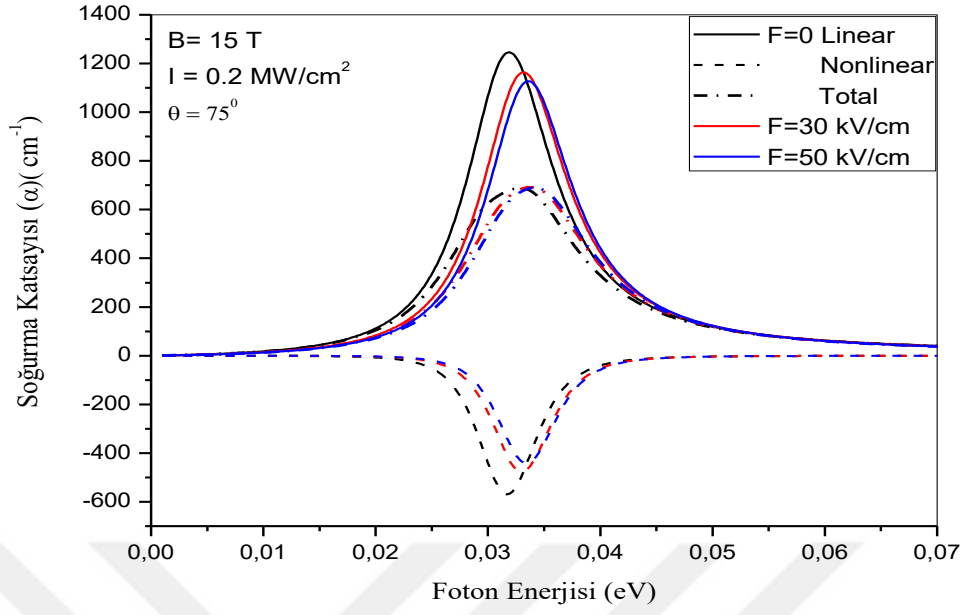
Şekil 4.34 $B=10$ T manyetik alan ve 75° açı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



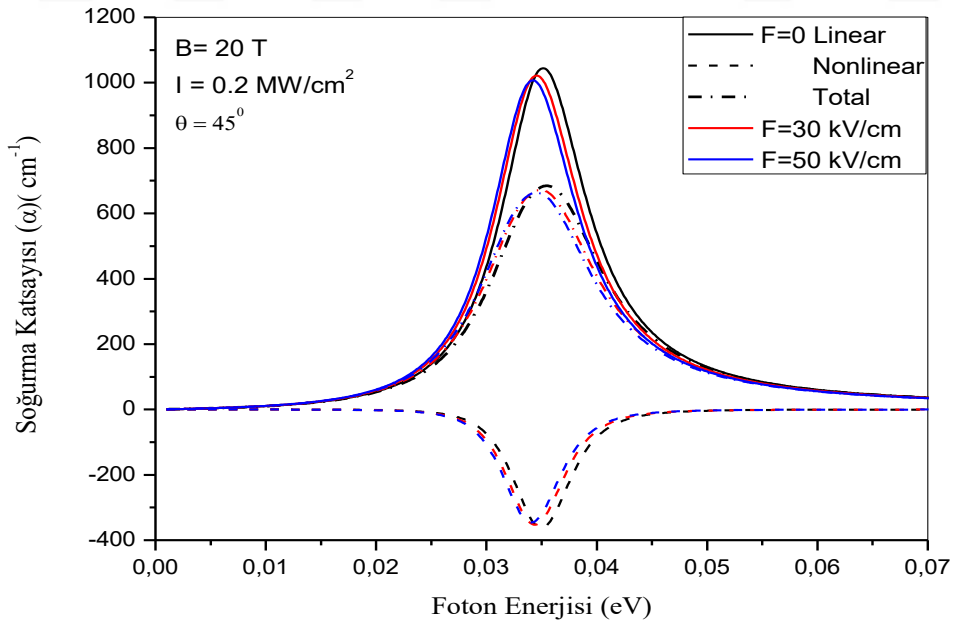
Şekil 4.35 $B=15$ T manyetik alan ve 45° açı altında $F=0$, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



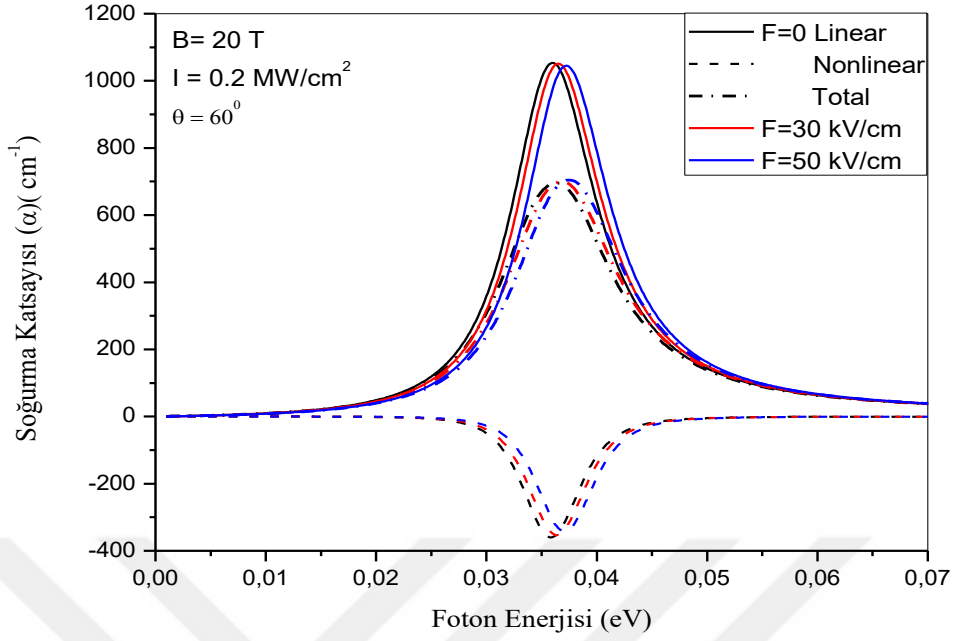
Şekil 4.36 $B=15$ T manyetik alan ve 60° açı altında $F=0$, 30 ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



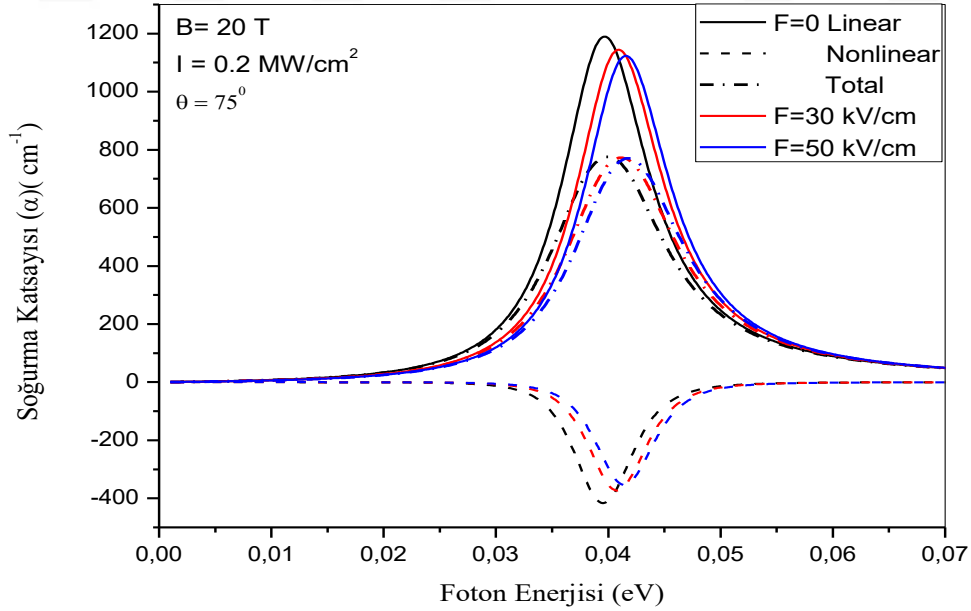
Şekil 4.37 $B=15 \text{ T}$ manyetik alan ve 75° açılı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



Şekil 4.38 $B=20 \text{ T}$ manyetik alan ve 45° açılı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.

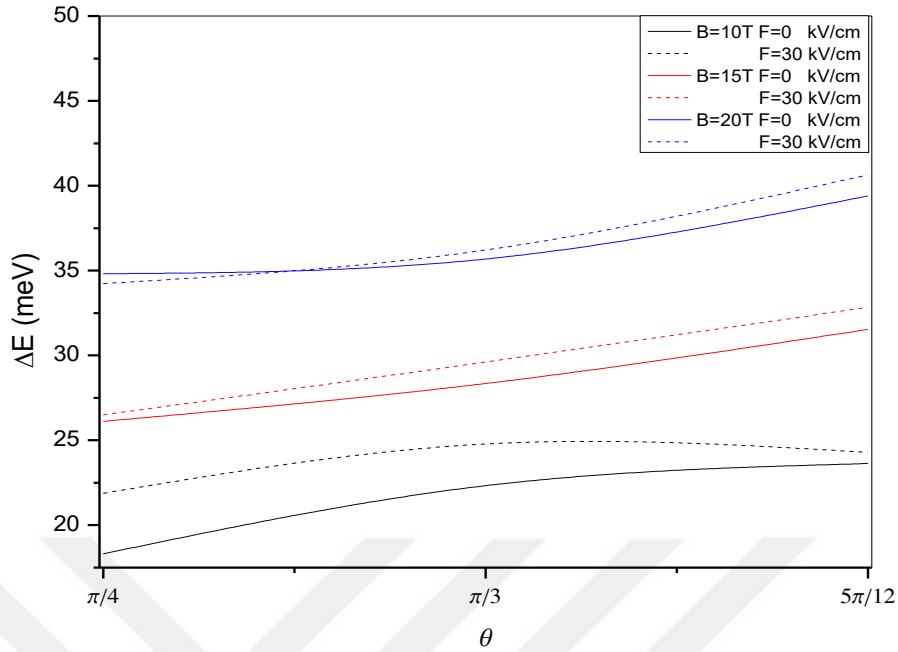


Şekil 4.39 $B=20$ T manyetik alan ve 60° açı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.



Şekil 4.40 $B=20$ T manyetik alan ve 75° açı altında $F=0, 30$ ve 50 kV/cm elektrik alanları için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı değişimleri.

Şekil 4.32 – Şekil 4.40 eğik manyetik alan altındaki GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu için farklı elektrik alanlara karşılık foton enerjisi ve lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları arasındaki değişimleri gösterir. Şekil 4.32 – Şekil 4.33 incelendiğinde lineer ve lineer olmayan soğurma katsayılarının pik değerleri azalırken toplam soğurma katsayısı artmıştır. Aynı zamanda toplam soğurma piki üzerindeki çiftlenim etkisi artan elektrik alan değerleriyle azalmaktadır. Bu grafiklerde elektrik alanın artışıyla birlikte elektronik enerji seviyeleri arasındaki fark artmakta ve bu durum sonucunda soğurma spektrumunda maviye kayma görülmektedir. Şekil 4.34’de B=10 T ve 75° altında elektrik alanın F=0 dan 30kV/cm değerine artmasıyla birlikte $\Delta E'$ nin çok küçük değerde artışı sonucu soğurma spektrumunda maviye kayma görülürken elektrik alanın 50 kV/cm değerinde ise $\Delta E'$ nin azalmasıyla kırmızıya kayma görülmektedir. Aynı zamanda toplam soğurma katsayısı pikinde azalma meydana gelirken çiftlenim etkisi yok olmaktadır. Şekil 4.35 – Şekil 4.37’de elektrik alanın artması sonucu lineer ve lineer olmayan soğurma katsayısı pikinde azalma ve soğurma spektrumunda maviye kayma görülmektedir. Ayrıca, toplam soğurma katsayısında artış görülürken, aynı zamanda pik üzerindeki çiftlenim etkisi ortadan kalkmaktadır. Şekil 4.38’ de elektrik alanın artması sonucu lineer ve lineer olmayan soğurma katsayısı pik değerleri azalırken elektrik alanla $\Delta E'$ nin azalması sonucu da soğurma spektrumunda kırmızıya kayma görülmüştür. Aynı zamanda toplam soğurma katsayısı pikinde, artan elektrik alanla, çok az bir azalma oluşmaktadır. Şekil 4.39 – Şekil 4.40’ de elektrik alanın artması sonucu lineer ve lineer olmayan soğurma katsayısı pik değerlerinin azaldığı, toplam soğurma katsayısı pikinde çok küçük artışla birlikte $\Delta E'$ nin artışı sonucu da soğurma spektrumunda maviye kayma görülmektedir.



Şekil 4.41 Elektrik ve eğik manyetik alanın artışına bağlı olarak 1-2 enerji seviyeleri arasındaki enerji farkının (ΔE) manyetik alanın x- eksenine göre yaptığı açıya göre değişimi.

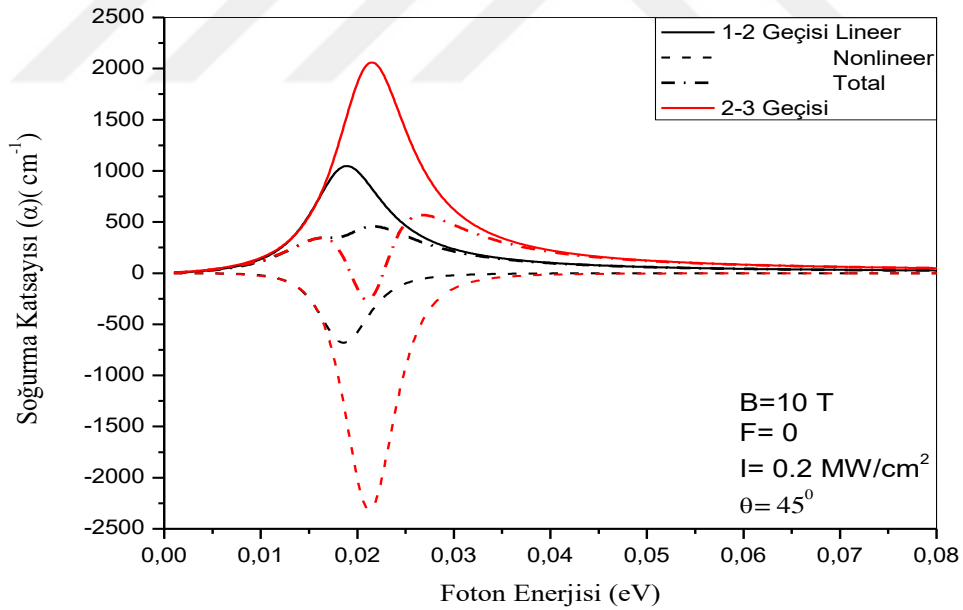
Elektrik ve eğik manyetik alanın artışına bağlı olarak 1-2 enerji seviyeleri arasındaki ΔE enerji farkının eğiklik açısına göre değişimi Şekil 4.41’de görülmektedir. Şekil 4.41’de verilen grafiğe göre $F=0$ iken sistem üzerine uygulanan manyetik alanın artması ile ΔE enerji farklarının arttığı görülmektedir. Ayrıca açı değerinin artması sonucu da 1-2 elektronik enerji seviyeleri arasındaki enerji farkları her bir artan manyetik alan değerine karşılık artmaktadır. Bu artış $B=10$ T için artan açı değeriyle yavaş bir artış, $B=15$ T’de doğrusal ve $B=20$ T için ise yavaşlayan bir artış olarak izlenmektedir. Bu ΔE artışı soğurma spektrumunda maviye kaymanın sebebini oluşturmaktadır (Şekil 4.29 – Şekil 4.31). $F=30$ kV/cm elektrik alan uygulanması, 10 T manyetik alan değerinde alansız duruma göre daha büyük ΔE değerleri ile başlayıp artan açı değerleri ile bu artış alansız değerine yaklaşmaktadır. 15 T grafiğine bakıldığında, artan açı değerleri ile alansız ($F=0$) durumdaki grafiklerle paralel olmak üzere büyük ΔE değerleri ile seyretmektedir. Her iki manyetik alan değerinde elektrik alanın varlığı ΔE değerini büyüttüğü için soğurma spektrumunda maviye kaymanın sebebini oluşturmaktadır (Bakınız Şekil 4.32 – Şekil 4.37). Bununla birlikte 20 T manyetik alanda elektrik alanın varlığı ile birlikte 45° ’den 60° ’ye kadar sırasıyla $\Delta E_{F=30} < \Delta E_{F=0}$, $\Delta E_{F=30} = \Delta E_{F=0}$ ve $\Delta E_{F=30} > \Delta E_{F=0}$ olduğundan soğurma

spektrumunda önce kırmızıya kayma yaklaşık 53° 'den sonra ise maviye kayma görülmektedir(Bakınız Şekil 4.38 – Şekil 4.40).

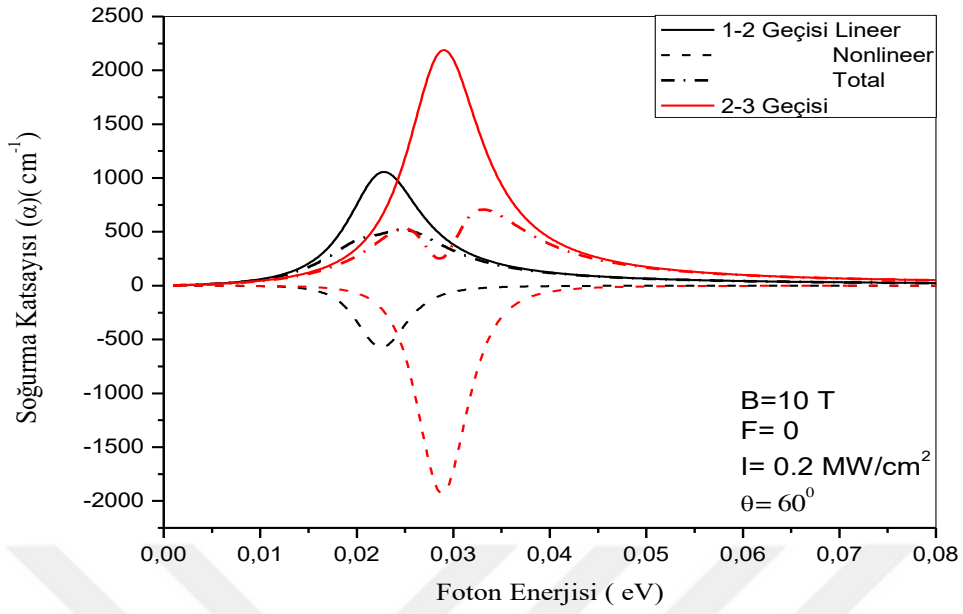


5. TEK-TEK VEYA ÇİFT-ÇİFT ENERJİ SEVİYELERİ ARASINDAKİ GEÇİŞLER

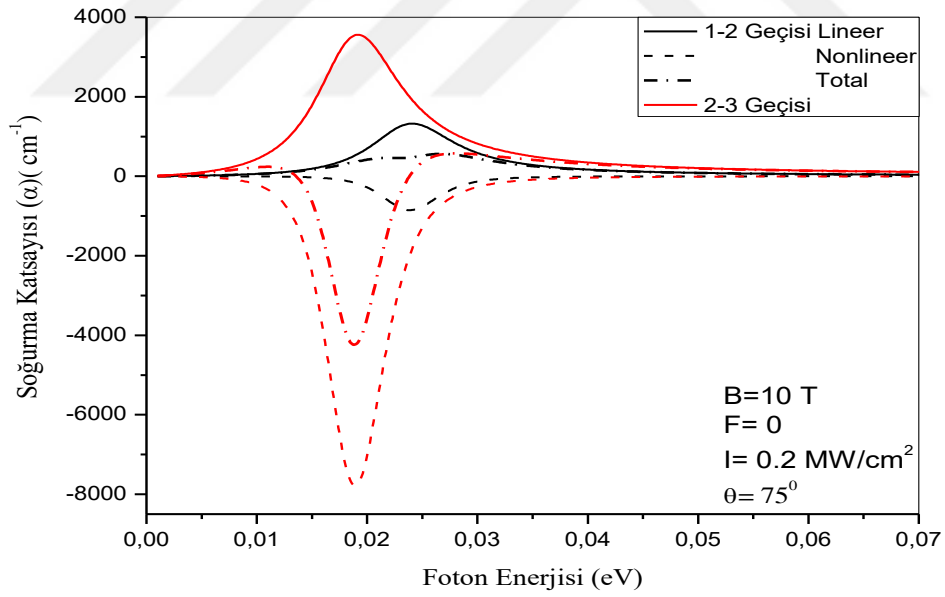
Elektrik ve eğik manyetik alan altında beş kuantum kuyusunun optik özellikleri Bölüm 4’ de incelendi. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıya elektrik alan uygulanmadığında eğik manyetik alanın varlığı yapının simetrikliğini bozmaz. Simetrik yapılarda tek-tek veya çift-çift elektronik enerji geçişlerinde zarf dalga fonksiyonları aynı paritede olmasından dolayı dipol matris elemanı bu geçişler için yoktur. Bu sebepten simetrik yapılarda 1-2, 2-3 gibi elektronik enerji geçişleri izinli iken tek-tek (Örn:1-3) ve çift- çift (Örn:2-4) geçişler izinli değildir[25]. Sisteme elektrik alanın uygulanmasıyla yapının simetrikliği bozulur ve yasaklı olan geçişler izinli hale gelir. Bu bölümde manyetik alanın sırasıyla 10 T, 15 T ve 20 T değerleri için artan açı değerlerine karşılık önce elektrik alan yokken izinli olan tek-çift geçişler (1-2 ve 2-3) daha sonra elektrik alan uygulanmasıyla izinli hale gelen tek-tek ve çift-çift geçişler (1-3 ve 2-4) için lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları incelendi.



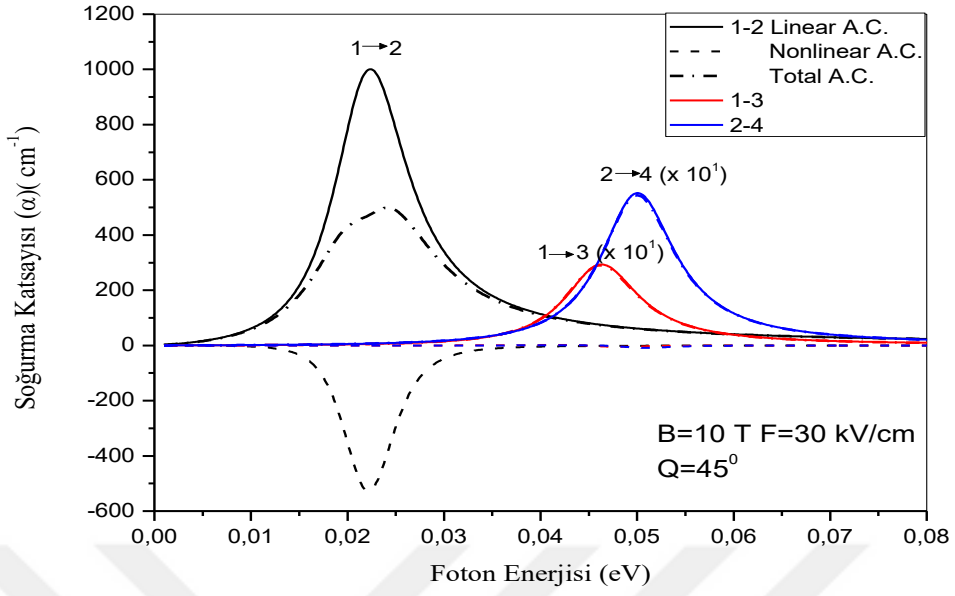
Şekil 5.1 B=10 T manyetik alan ve F=0 elektrik alan altında θ=45° de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.



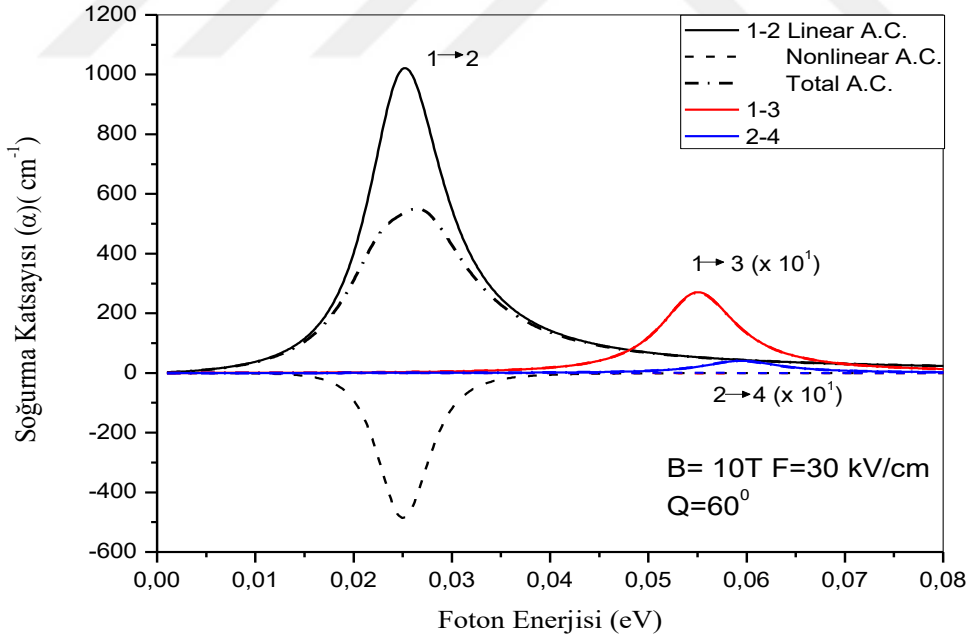
Şekil 5.2 $B=10$ T manyetik alan ve $F=0$ elektrik alan altında $\theta=60^\circ$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.



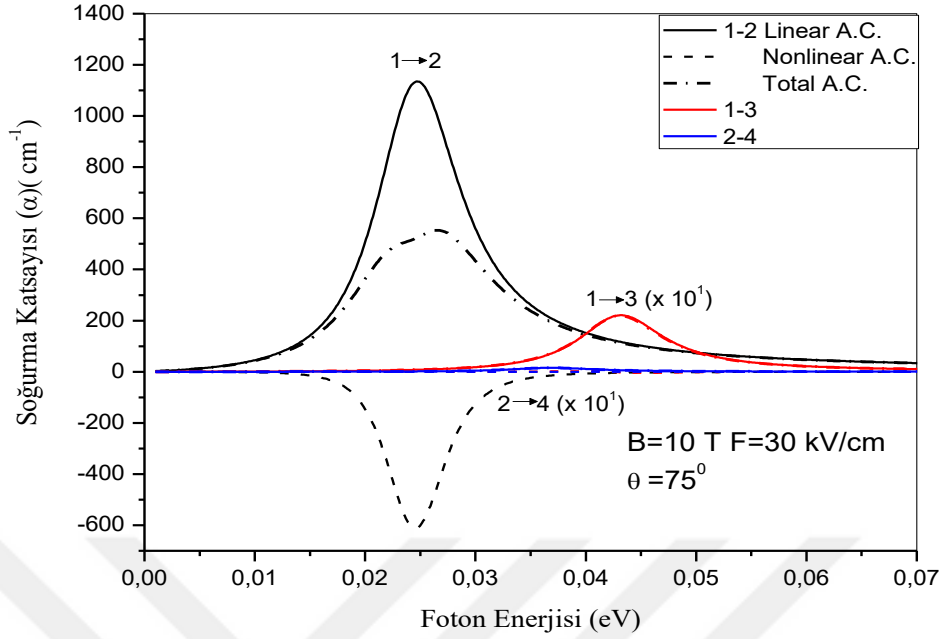
Şekil 5.3 $B=10$ T manyetik alan ve $F=0$ elektrik alan altında $\theta=75^\circ$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.



Şekil 5.4 $B=10$ T manyetik alan ve $F=30$ kV/cm elektrik alan altında $\theta=45^\circ$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.



Şekil 5.5 $B=10$ T manyetik alan ve $F=30$ kV/cm elektrik alan altında $\theta=60^\circ$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.



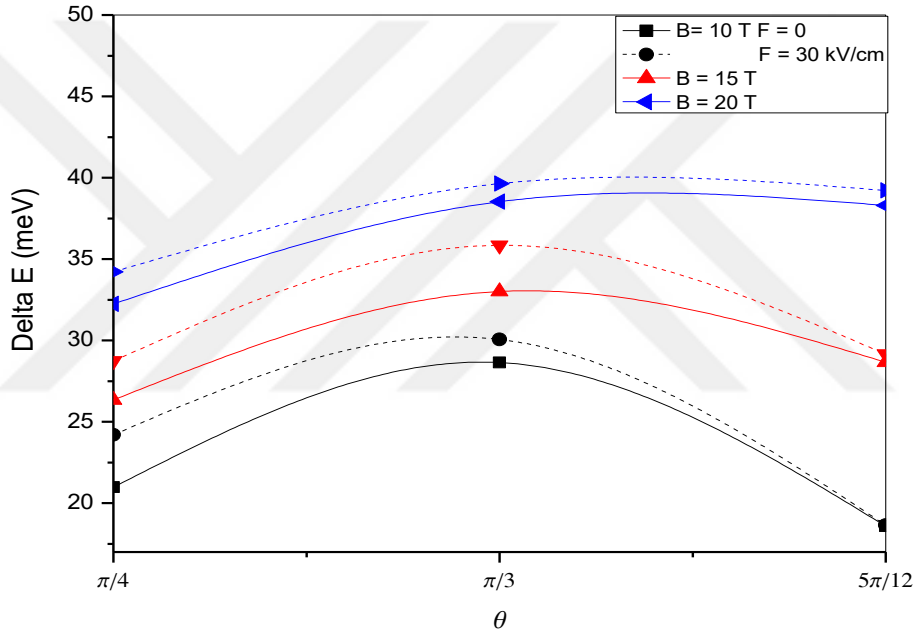
Şekil 5.6 $B=10$ T manyetik alan ve $F=30$ kV/cm elektrik alan altında $\theta=75^\circ$ de izinli elektronik enerji geçişleri için foton enerjisinin fonksiyonu olarak lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları değişimi.

Şekil 5.1 – Şekil 5.6’ da $B=10$ T eğik manyetik alan değerinde GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusunun $F=0$ ve $F=30$ kV/cm elektrik alanları için tüm izinli elektronik enerji geçişlerinin foton enerjisine karşılık lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayılarındaki değişimleri gösterildi.

Şekil 5.1 – Şekil 5.3’ de elektrik alan yokken $B=10$ T eğik manyetik alan değerine göre 1-2 ve 2-3 elektronik enerji geçişleri izinli olduğu halde tek-tek (1-3) ve çift-çift (2-4) geçişler izinli değildir. Şekil 5.4 – Şekil 5.6’ da verildiği üzere sisteme $F=30$ kV/cm büyüklüğünde elektrik alan uygulanmasıyla sistemin simetrisi bozularak yasaklı olan geçişler izinli hale gelmektedir ve 1-3 ve 2-4 elektronik enerji geçişleri çok küçük olduğundan 1-2 enerji geçişleri ile arasında karşılaştırma yapabilmek için bu geçişlerin büyüklükleri 10 kat artırılarak çizilmiştir ($\times 10^1$).

Şekil 5.1 – Şekil 5.3 incelendiğinde elektrik alan yokken ve 10 T’ lık eğik manyetik alan mevcutken 1-2 ve 2-3 elektronik enerji seviyeleri arasındaki geçişlerde lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayılarının pik değerlerinin tümü birlikte görülmektedir. Ancak Şekil 5.4 – Şekil 5.6’da 1-3 ve 2-4 elektronik enerji geçişlerinde lineer olmayan soğurma katsayısının değerinin neredeyse sıfır olmasından dolayı lineer ve toplam

soğurma katsayılarının çakışık olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 5.1 – Şekil 5.3’ de manyetik alanın eğiklik açısının artmasına bağlı olarak 1-2 elektronik enerji geçişinde soğurma spektrumunda maviye kayma ve 2-3 geçişinde ise açı değerinin artışıyla önce maviye daha sonra kırmızıya kayma görülmektedir. Şekil 5.4 – Şekil 5.6’da B=10 T eğik manyetik alan ve F=30 kV/cm büyüklüğünde elektrik alan altında eğiklik açısının artmasına bağlı olarak 1-2 enerji geçişi için soğurma spektrumunda önce maviye sonra çok az miktarda kırmızıya kayma görülmektedir. Bununla birlikte eğiklik açısının artışı 1-3 ve 2-4 enerji geçişlerinde soğurma katsayıları piklerinin küçülerek soğurma spektrumunda önce maviye kayma daha sonra kırmızıya kayma görülmektedir.



Şekil 5.7 Eğik manyetik alan altında beş kuantum kuyusunun farklı elektrik ve eğiklik açısı altında 2-3 enerji geçişleri için enerji seviyeleri arasındaki farkın (ΔE) eğiklik açısına (θ) bağlı değişimi.

Şekil 5.7’ de 10 T, 15 T ve 20 T manyetik alan ve sırasıyla F=0 ve F=30 kV/cm elektrik alan değerlerinde 2-3 elektronik enerji geçişleri için ΔE ’ ye karşılık eğiklik açısı grafiği çizilmiştir. Şekil 5.7’ de elektrik alan yokluğunda 10 T, 15 T ve 20 T da artan açı değerlerine karşılık ΔE değerlerinde 45° ’den 60° ’ye kadar artış olurken 60° ’den 75° ’ye doğru ise azalma görülmektedir. Buna bağlı olarak da ilk olarak soğurma spektrumunda maviye kayma daha sonra kırmızıya kayma görülmektedir. Bu kayma miktarı manyetik alanın artan değerleriyle azalmaktadır. Elektrik alanın uygulanmasıyla 45° ve 60° ’ de her bir manyetik alan değeri için ΔE değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak bu durum

75⁰'ye doğru giderken azalmakta 75⁰'de manyetik alanın 10 T değeri için aynı olurken 15 T ve 20 T değerlerinde çok yakın değerdedir. Bu yüzden elektrik alanının varlığı alansız durumdakine göre önce maviye sonra kırmızıya kayma davranışı sadece artan ΔE değerleri ile tekrar etmektedir.



6. IŞIK ŞİDDETİNE BAĞLI OLARAK TOPLAM SOĞURMA KATSAYISI ÜZERİNDE OLUŞAN SATURASYON DURUMU

Lineer soğurma katsayısı $\alpha^1(w)$, lineer olmayan soğurma katsayısı $\alpha^3(w, I)$ ve toplam soğurma katsayısı $\alpha(w, I)$ olarak tanımlanır. Sistem üzerine gönderilen ışık şiddetine bağlı olarak soğurma katsayıları Denklem 4.3 - Denklem 4.5' de verildi. Toplam soğurma katsayısının büyüklük olarak lineer soğurma katsayısının yarısına eşit olduğu ışık şiddetine saturasyon yoğunluğu (I_s) denir. Saturasyon yoğunluğu, kuantum kuyularının karakteristik bir özelliğini ifade eder. Bundan dolayı bu çalışmanın son kısmında saturasyon yoğunluğu incelendi. Saturasyon yoğunluğunun ışık şiddetine bağlı fonksiyonu[7,26];

$$I_s = \varepsilon_0 n_R c \left(\frac{(E_2 - E_1 - \hbar w)^2 + (\hbar \Gamma_{12})^2}{|2M_{12}|^2} \right) \quad [6.1]$$

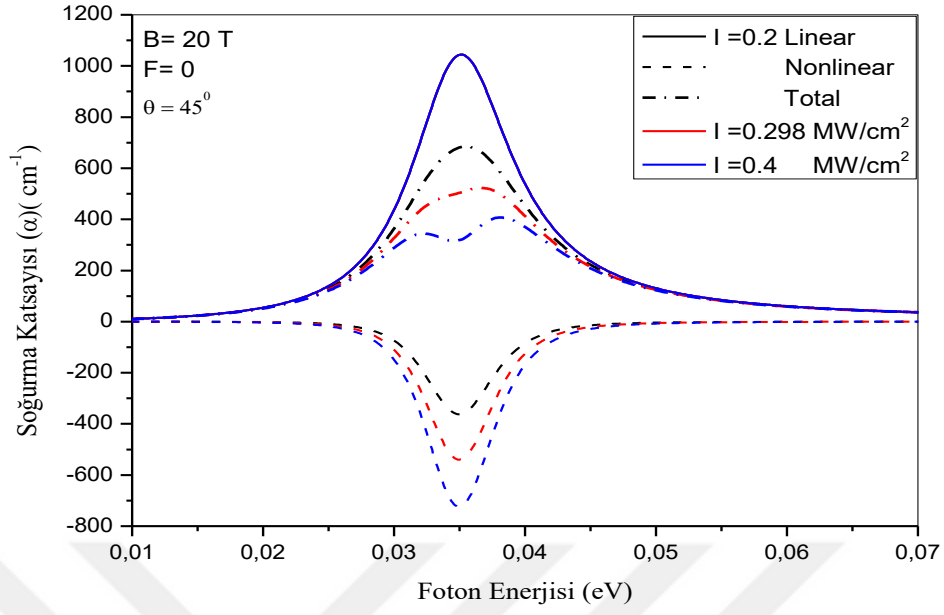
olarak tanımlanır. Burada M_{12} dipol matris elemanıdır. Dipol matris elemanı, zarf dalga fonksiyonlarına bağlı, boyutsuz $M_{ij} = |\langle \phi(\tilde{\zeta})_i | \tilde{\zeta} | \phi(\tilde{\zeta})_j \rangle|$ olarak tanımlanır.

$$\tilde{\zeta} = \tilde{u} + 2\tilde{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{a_H} (z_0' - z') + 2 \left(\frac{1}{\hbar \omega} \frac{a_H}{\sqrt{2}} eF \cos \theta \right) \quad [6.2]$$

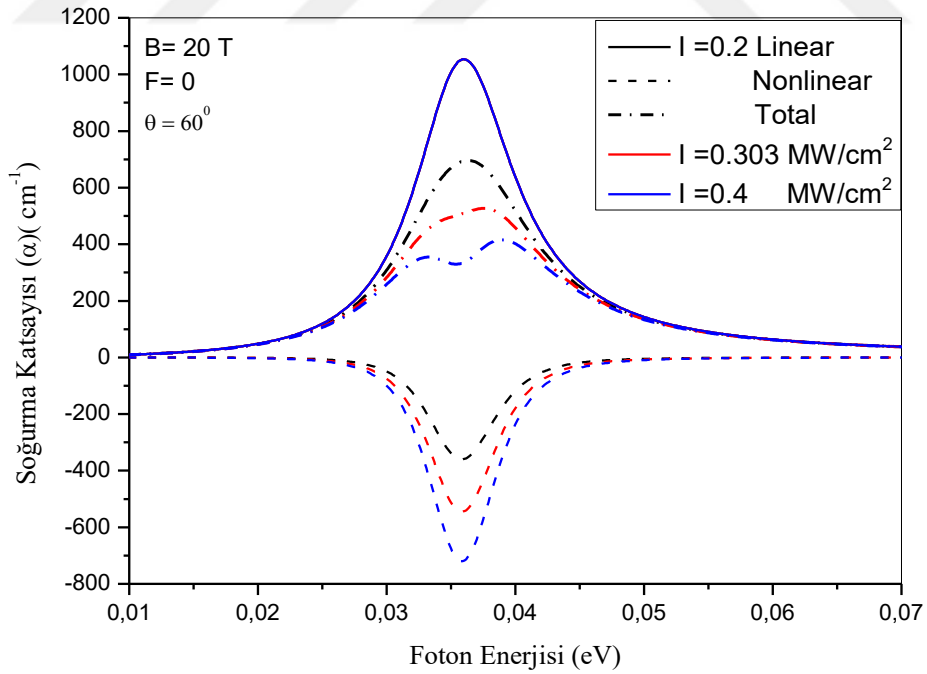
olarak tanımlamıştık. Saturasyon yoğunluğunda, lineer olmayan soğurma katsayısı $\alpha^3(w, I)$, lineer soğurma katsayısının yarısına $-\alpha^1(w)/2$ eşittir. $\alpha(w, I) = \alpha^1(w) + \alpha^3(w, I)$ eşitliğinden dolayı toplam soğurma katsayısı $\alpha(w, I)$ 'da lineer soğurma katsayısının yarısına $\alpha^1(w)/2$ eşit olur[7].

Elektrik ve eğik manyetik alan altında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusuna $I=0,2 \text{ MW/cm}^2$ büyüklüğünde ışık şiddetini uygulayarak oluşan lineer, üçüncü dereceden lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları önceki bölümlerde detaylıca incelendi.

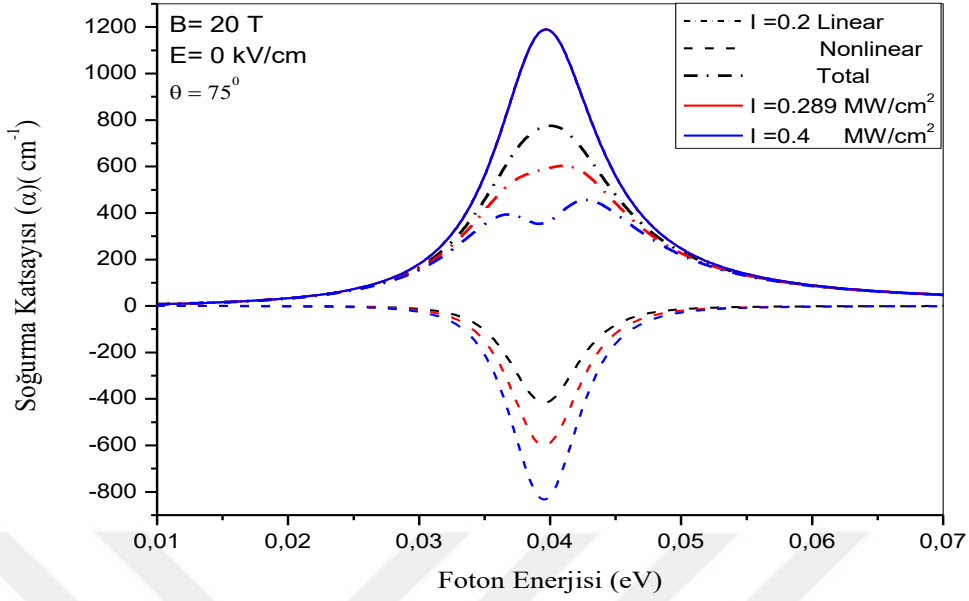
Bu bölümde ise, $B=20 \text{ T}$ manyetik alan ve $\theta = 45^0, 60^0$ ve 75^0 açılar altında potansiyel yüksekliği $V_0 = 225 \text{ meV}$, kuyu genişliği $L_w = 80 \text{ \AA}$ ve bariyer genişliği $L_b = 15 \text{ \AA}$ olan GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık soğurma katsayıları incelendi.



Şekil 6.1 $F=0$ elektrik alan, $B=20$ T manyetik alan ve 45° açılı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.



Şekil 6.2 $F=0$ elektrik alan, $B=20$ T manyetik alan ve 60° açılı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.



Şekil 6.3 $F=0$ elektrik alan, $B=20$ T manyetik alan ve 75° açılı altında beş kuantum kuyusu için ışık şiddetinin farklı değerlerine karşılık gelen foton enerjisine göre soğurma katsayıları.

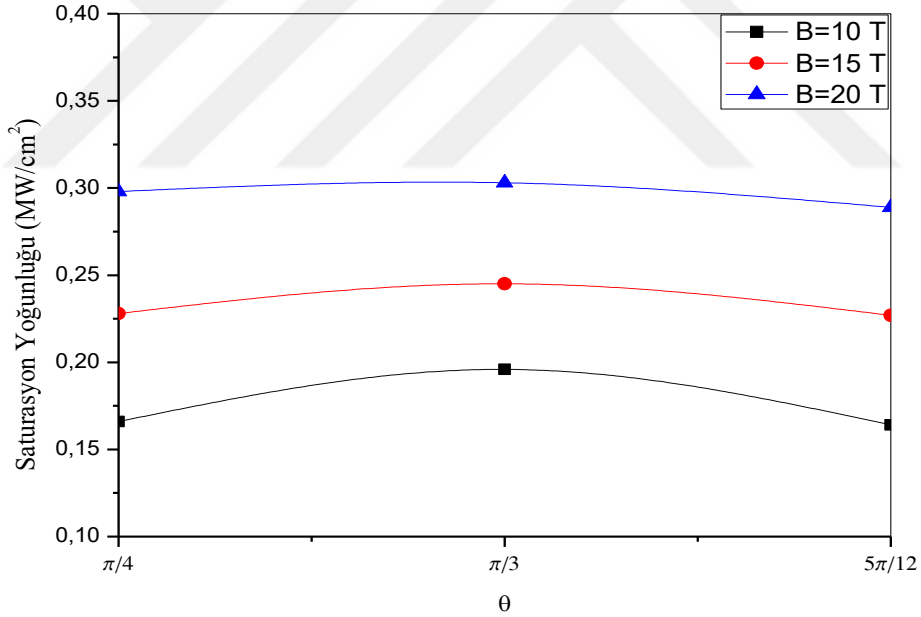
Şekil 6.1 – Şekil 6.3’de elektronun 1-2 elektronik enerji düzeyleri arasında geçişi için ışık şiddetinin farklı değerlerine ($I=0.2, 0.298, 0.303, 0.289$ ve 0.4 MW/cm^2) karşılık foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak soğurma katsayıları gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde lineer soğurma katsayısının pik değeri artan ışık şiddetine bağlı olarak değişmemektedir. Lineer soğurma katsayısı ışık şiddetinden bağımsızken lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları ise ışık şiddetine bağlı olduğu daha önce belirtildi. Şekil 6.1 – Şekil 6.3’ de lineer soğurma katsayılarının değerinin değişmediği görülürken ışık şiddetinin artışı sonucu lineer olmayan soğurma katsayısının arttığı ve buna bağlı olarak da toplam soğurma katsayısının pik değerinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda ışık şiddetinin artmasıyla toplam soğurma katsayısı üzerindeki çiftlenim etkisi de artmaktadır. Artan ışık yoğunluğu belli değere ulaştığında kuantum kuyusundaki saturasyon durumu soğurma spektrumunda gözlenmektedir. Şekil 6.1’ de $B=20$ T, $F=0$ ve 45° altında 1040 cm^{-1} değerindeki lineer soğurma katsayısının pik değerinin yarıya indiği 520 cm^{-1} değerindeki toplam soğurma pikini veren $I=0.298$ MW/cm^2 ışık şiddeti, saturasyon yoğunluğunu (I_s) verir. Şekil 6.2’ de $B=20$ T, $F=0$ ve 60° altında soğurma spektrumundaki saturasyon durumu incelendiğinde lineer soğurma katsayısı pik değeri 1052 cm^{-1} ’ nin yarıya (526 cm^{-1}) indiği toplam soğurma katsayısı piki $I_s= 0.303$ MW/cm^2 ışık şiddeti yoğunluğunda görülmektedir. Şekil 6.3’ de açılı değerinin artmasıyla 75° ’ de saturasyon

yoğunluğu, 1200 cm^{-1} lineer soğurma katsayısı pik değerinin yarıya indiği 600 cm^{-1} toplam soğurma katsayısının pik değerinin görüldüğü $I_s = 0.289 \text{ MW/cm}^2$ dir.

Saturasyon Yoğunluğu	B=10 T			B=15 T			B=20 T		
	45°	60°	75°	45°	60°	75°	45°	60°	75°
I_s (MW/cm ²)	0,166	0,196	0,164	0,228	0,245	0,227	0,298	0,303	0,289

Çizelge-3 1-2 enerji geçişi için saturasyon yoğunluğunun manyetik alan ve eğiklik açısına bağlı olarak değişimi.

Çizelge-3' de $|2M_{12}|^2$ dipol matris elemanına bağlı olarak, manyetik alan ve açı değerlerine karşılık saturasyon yoğunluğu değerleri verildi. Çizelge-3' e göre sabit açı altında manyetik alan arttıkça saturasyon yoğunluğu artarken sabit manyetik alan altında ise açı değeri 45° den 75° ye arttıkça önce artmakta daha sonra ise azalarak 45° deki değerine yaklaşmaktadır.



Şekil 6.4 1-2 enerji geçişleri için saturasyon yoğunluğunun manyetik alan ve eğiklik açısına göre değişimi.

Denklem 6.1' de verildiği üzere saturasyon yoğunluğu, $|2M_{12}|^2$ dipol matris elemanına bağlıdır. Denklem 6.2 incelendiğinde $|2M_{12}|^2$ 'nin manyetik uzunluk ve açı değerine bağlı olduğu görülür. Manyetik alanın ve eğiklik açısının değişimi ile birlikte $|2M_{12}|^2$ dipol matris elemanı da değişir. Şekil 6.4' de görüldüğü üzere manyetik alan ve

eğiklik açısının değişimiyle $|2M_{12}|^2$ ne bağlı olarak saturasyon yoğunluğu da değişmektedir.



7. SONUÇLAR

Bu çalışmada örgü sabitleri birbirine çok yakın olan yarıiletken malzemeler kullanılarak oluşturulan GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu üzerinde çalışıldı. Bu çalışmada ilk olarak eğik manyetik alan altında çoklu kuantum kuyusu için Schrödinger denklemi ortagonal dönüşüm uygulanarak değişkenlerine ayrılabilir hale getirildi ve enerji özdeğerleri bulundu. Sisteme uygulanan elektrik ve eğik manyetik alanlar altında izinli bandıçi geçişler incelendi.

Yapılan çalışmalar sonucunda kuyu parametrelerinin manyetik alan ve eğiklik açısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Kuyu ve bariyer genişlikleri artan manyetik alan ile artarken eğiklik açısının artması ile daralmaktadır. Kuyu potansiyel yüksekliği ise artan manyetik alan ve eğiklik açısının artışına bağlı olarak düşer. Bu durum sonucunda enerji düzeyleri arasındaki fark ise değişmektedir. Manyetik alan ve eğiklik açısının değişimine göre ΔE değeri artar veya azalır. Buna bağlı olarak da soğurma spektrumunda maviye veya kırmızıya kaymalar görülür. Sistem üzerine uygulanan manyetik alanın veya eğiklik açısının artması sonucu kuyu içerisinde bulunan enerji seviyelerinin (taban durum enerji seviyesi hariç) uzaysal kuşatmanın etkin olduğu kuyu potansiyel yüksekliğinin üstünde, parabolik potansiyelin etkin olduğu bölgeye geçtiği görülmüştür. Manyetik alan ve eğiklik açısının yeteri kadar artması sonucu kuyu içerisindeki “bağlı durum” sayısı azalarak sadece tek “bağlı durum” kaldığı görülürken diğer düzeyler “genişletilmiş düzey” formuna yükselmiştir.

Kuyu parametreleri elektrik alandan bağımsızdır. Ancak elektrik alan uygulanmasıyla yapının başlangıçtaki simetrikliği bozulmuştur ve kuyu merkezinden ($z_0=0$ 'dan) 2β değeri kadar sağa kaydığı görülmüştür.

Bu çalışmanın ikinci kısmında GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapıdaki beş kuantum kuyusu 0.2 MW/cm² şiddetinde ışık altında (1-2) elektronik enerji geçişleri için lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayıları incelenmiştir. Manyetik alanın artması sonucu kuyu genişliğinin artmasıyla enerji düzeyleri tabana yaklaşırken eğiklik açısının artması sonucunda kuyu genişliği daralarak enerji düzeyleri kuyu tabanından uzaklaşır. Manyetik alanın ve eğiklik açısının artması ile potansiyel yükseklik düşer ve kuyu içerisindeki bağlı durumlar uzaysal kuşatmadan kurtulurlar. Yapıya dışardan uygulanan elektrik ve manyetik alanlar ile eğiklik açısının değişkenliğiyle elektronik enerji geçişleri arasındaki fark artabilir veya azalabilir. ΔE değerinin artması veya

azalması sonucunda ise soğurma spektrumunda maviye veya kırmızıya kayma görülür. ΔE değerinin bu şekilde değişkenlik göstermesi manyetik alanın büyüklük ve yönünü değiştirilmesi ile kontrol edilebilir soğurma spektrumu oluşturulabileceği bu durumda yeni bir yarıiletken malzeme büyütülmeksizin ayarlanabilir optoelektronik cihazların yapılabilirliğine yol açabilecektir.

Bu çalışmanın üçüncü kısmında elektrik alan uygulamanın sistem üzerindeki etkisi ve sonuçları incelendi. Elektrik alanın yokluğunda 1-2 ve 2-3 enerji geçişleri izinli olduğu halde tek-tek (1-3) ve çift-çift (2-4) enerji geçişlerinin izinli olmadığı görüldü. Sistem üzerine $F=30$ kV/cm'lik elektrik alan uygulandığında sistemin simetrikliği bozularak yasaklı olan geçişlerin izinli hale geldiği gösterilmiştir.. Ayrıca 2-3 enerji geçişleri için enerji farkı (ΔE) karşılaştırıldığında, manyetik alanın veya elektrik alanının artmasıyla ΔE değerinin arttığı ve soğurma spektrumunda maviye kaymanın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte eğiklik açısının artmasıyla ΔE değerindeki farkın değişkenlik gösterdiği ve soğurma spektrumunda maviye veya kırmızıya kaymaların olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın son kısmında ise sistem üzerine gönderilen ışık şiddetinin lineer, lineer olmayan ve toplam soğurma katsayısı üzerindeki etkisi ve saturasyon durum yoğunluğu incelendi. Işık şiddetinin artmasıyla lineer soğurma katsayısının değişmediği ancak lineer olmayan soğurma katsayısının arttığı ve buna bağlı olarak da toplam soğurma katsayısının azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda ışık şiddetinin artmasıyla toplam soğurma katsayısı üzerinde çiftlenim etkisinin (bleaching effect) meydana geldiği bulunmuştur. Işık şiddetinin belli bir değere ulaşmasıyla soğurma spektrumunda saturasyon durumu gözlemlendi. Sisteme uygulanan manyetik alan büyüklüğüne ve eğiklik açısına bağlı olarak saturasyon yoğunluğu $|2M_{12}|^2$ dipol matrisine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Işık şiddeti kuyu parametrelerini değiştirmedeğinden sabit eğik manyetik alan ve elektrik alan altında enerji seviyeleri arasındaki farkın değişmediği ve buna bağlı olarak da soğurma spektrumunda maviye veya kırmızıya kaymanın gerçekleşmediği görülmektedir.

Sonuç olarak; yarıiletkenlerin elektronik kimliği olan enerji düzeyleri arasındaki fark dıştan uygulanan manyetik alan, elektrik alan veya manyetik alanın x- eksenini ile yaptığı açığa bağlı olarak azaltılabilir veya arttırılabilir. Aynı zamanda bu etkenlere ve ışık şiddetine bağlı olarak da yarıiletkenlerin optik özellikleri değiştirilebilir. Günümüzde yarıiletkenlerin bu özelliklerinden dolayı optik aygıt yapımında kullanımı iletkenlere göre daha çok tercih edilmekte ve gün geçtikçe uygulama alanları artmakta ve

geliştirilmektedir. Bu nedenle GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs yarıiletken heteroyapılı sistemler, elektronik cihazlar, optik aygıtlar, optik depolama (CD vb.), lazerler, LED ler, telekomünikasyon gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Fox M.**(2001).Katıların Optik Özellikleri. Nobel Akademik Yayıncılık (Çeviri: Aydoğan, Ş.). 2014, Ankara, 116s.
- [2] **Sökmen I., Sarı H., Elagöz S., Ergün Y. ve Erzin S.**(1995). Superlatt, Microstruct. 17, 3s.
- [3] **Ergün Y., Sökmen I., Sarı H., Elagöz S., ve Arıkan M.Ç.**(1997).The Orbit Centre Dependence Of The Energy Levels İn A Single Quantum Well Under External Tilted Magnetic And Electric Fields. Semicond. Sci, Technol, 12, 802s.
- [4] **Amca R., Ergün Y., Sökmen İ., Sarı H.** (2000). Electronic Energy Spectra İn A Multiple Quantum Well Within External Electric And Tilted Magnetic Fields. Semicond. Sci. Technol, 15,1087-1092.
- [5] **Ozbakır R.** (2018). Optical Properties Of The Single Quantum Well Under The Electric And Tilted Magnetic Fields, Canadian Journal of Physics. Can. J. Phys. 96, 999–1003.
- [6] **Goncalvez Da Silva C.E.T., Mendez E.E.** (1988). Resonant Tunneling Via Landau Levels İn GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heterostructures. Phys. Rev. B. 38, 3994; **Shutz P.A. ve Tejedor C.** (1990). Resonant Tunneling Through Landau Levels İn Quantum Wells İn The Presence Of İnelastic – Scattering Brodening. Phys. Rev. B41, 3053.
- [7] **Karabulut I., Atav U., Safak H. ve Tomak M.** (2007)., Linear And Nonlinear İntersubband Optical Absorptions İn An Asymmetric Rectangular Quantum Well. Eur. Phys, J. B., 55, 283–288.
- [8] **Mitin V.V., Kochelap V. A. and Stroscio M. A.**(1999). Quantum Heterostructures: Microelectronics And Optoelectronics, Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] **Davies J. H.**(1999). The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction, Cambridge Universty Press, Cambridge.45s.
- [10] **Balkan N. ve Erol A.**(2005). Çevremizdeki Fizik. Tübitak Popüler Bilim Kitapları. Ankara, 975, 40s.
- [11] **Özek F.** (1998). Katıhal Elektronıği. A.Ü.F.F.52,12s.
- [12] **Serway R.A. , Beichner R.J.**(2000). Fen ve Mühendislik İçin FİZİK-3. Palme Yayıncılık. (Çeviri: Çolakoğlu K.). 2005, Ankara, 1419-1421s.
- [13] **Wagner J.S.**(2006). The Nonlinear Optical Properties of GaAs/AlAs Superlattice Core Waveguides at Telecommunications Wavelengths. Universty Toronto.
- [14] **Fox M.**(2001). Optical Properties Of Solids. Oxford University Pres. New York.135.
- [15] **West, L.C. and Eglash, S.J.**(1985). First Observation Of An Extremely Large-Dipole İnfrared Transition Within The Conduction Band Of A GaAs Quantum Well. Applied Physics Letters.46, 1156-1158.
- [16] **Unlu S.,Karabulut I., Safak H.**(2006),Linear And Nonlinear İntersubband Optical Absorption Coefficients And Refractive İndex Changes İn A Quantum Box With Finite Confining Potential. Physica E.33,319-324.

- [17] **Ungan F., Mora-Ramos M.E., Duque C.A., Kasapoğlu E., Sari H., Sökmen İ.**(2014), Linear And Nonlinear Optical Properties In A Double Inverse Parabolic Quantum Well Under Applied Electric And Magnetic Fields. *Superlattices Microstruct.* 66,129-135.
- [18] **Kasapoğlu E., Duque C.A., Sari H., Sökmen İ.**(2011), Intense Laser Field Effects On The Linear And Nonlinear Intersubband Optical Properties Of A Semi-Parabolic Quantum Well. *The European Physical Journal B.* 82,13-17.
- [19] **Kasapoglu E., Sari H., Sökmen I.**(2001), Intersubband Optical Absorption In A Quantum Well Under A Tilted Magnetic Field. *Superlattices and Microstructures*, Vol. 29, No. 1, 25-32.
- [20] **Abramowitz M. and Stegun I.A.** (1964). *Handbook Of Mathematical Functions.* 503, Dover, New York.
- [21] **Yeşilgul U., Ungan F., Kasapoğlu E., Sari H., Sökmen I.**(2011) The Linear And Nonlinear Intersubband Optical Absorption Coefficients And Refractive Index Changes In A V-Shaped Quantum Well Under The Applied Electric And Magnetic Fields. *Superlattices and Microstructures.*, 50,400-410.
- [22] **Ungan F., Kasapoğlu E., Sökmen I.**(2011), Intersubband Optical Absorption Coefficients And Refractive Index Changes In Modulation-Doped Asymmetric Double Quantum Well. *Solid State Communications.*, 151,1415-1419.
- [23] **Baskoutas S., Garoufalis C., Terzis A.F.**(2011), Linear And Nonlinear Optical Absorption Coefficients In Inverse Parabolic Quantum Wells Under Static External Electric Field., *Eur. Phys. J. B.*, 84, 241-247.
- [24] **Karabulut I., Baskoutas S.**(2008), Linear And Nonlinear Optical Absorption Coefficients And Refractive Index Changes In Spherical Quantum Dots: Effects Of Impurities, Electric Field, Size, And Optical Intensity. *J. Appl. Phys.* 073512, 103.
- [25] **Amca R.**(2000), Elektrik ve Eğik Manyetik Alan Altındaki Süperörgülerde Elektronik Enerji Düzeyleri, C.Ü. Fen Bilimleri Fizik Ana Bilim Dalı (Doktora Tezi), Sivas.
- [26] **Kasapoğlu E., Sakiroğlu S., Ungan F., Yesilgul U., Duque C.A., Sökmen İ.**(2017), Optical Properties Of The Tietz- Hua Quantum Well Under The Applied External Fields. *Physica B.*, 526,127-131.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Veli AKTAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 26.03.1986
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Yeni Mahalle 16. Sok. No:27 Aktaş Apt. Kat:1/1 Sivas
E-posta Adresi	veli.198658@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Lisesi, 2004.
Lisans	<ul style="list-style-type: none">• Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, 2008.• Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Kamu Yönetimi Bölümü,2017.
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2019.

İş Tecrübesi

Özel Birikim Dershanesi	Fizik Öğretmeni, 2008 – 2010
Milli Eğitim Bakanlığı	Ücrt. Öğretmen, 2011, 2012-2013
Özel Piramit Etüt Merkezi	Fizik Öğretmeni, 2011 – 2012

Kongreler ve Bildiriler

Uluslararası	Ozbakır R., Aktaş V., Optical Properties of GaAs/GaAlAs Multiple Quantum Wells Under The External Fields, 4.th International Conference on
--------------	--

Engineering and Natural Science (ICENS 2018) May 2-6,2018,Kiev, UKRAINE.

Uluslararası

Ozbakır R., Aktaş V., Effects of the Electric and Tilted Magnetic Fields on Linear and Nonlinear Optical Absorption Coefficients, International Black Sea Coastline Countries Symposium - II, Full Texts Book, 2019, ISBN-978-605-7695-29-1, 419-424.

