

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

**EĞİK ELEKTRİK ALAN ALTINDA
GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM TELİNDEKİ
DONOR SAFSIZLIK ATOMLARININ
BAĞLANMA ENERJİLERİ**

**Serkan KILIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI
2009**

T. C.
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİK ELEKTRİK ALAN ALTINDA GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM TELİNDEKİ
DONOR SAFSIZLIK ATOMLARININ BAĞLANMA ENERJİLERİ

Serkan KILIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI

Danışman : Doç. Dr. Esin KASAPOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu çalışma jürimiz tarafından, Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. İsmail SÖKMEN

Üye : Prof. Dr. Hüseyin SARI

Üye : Doç. Dr. Esin KASAPOĞLU

ONAY

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

..../..../2009

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan 'Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım kılavuzu' adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
1 GİRİŞ	1
1.2 Saf Yarıiletkenler	4
1.3 Katkılı Yarıiletkenler	6
2 SAFSIZLIK ATOMLARI	7
2.1 Verici Safsızlık Atomları	7
2.2 Alıcı Safsızlık Atomları	8
3 DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER	10
3.1 Giriş	10
3.2 Eğik Elektrik Alan Altında GaAs/Ga _{1-x} Al _x As Kuantum Telindeki Donorların Bağlanma Enerjisi	10
4 SONUÇ VE TARTIŞMA	41
5 KAYNAKLAR	42
6 ÖZGEÇMİŞ	44

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****EĞİK ELEKTRİK ALAN ALTINDA GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM TELİNDEKİ
DONOR SAFSIZLIK ATOMLARININ BAĞLANMA ENERJİLERİ****Serkan KILIN****Cumhuriyet Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Fizik Bölümü****Danışman : Doç. Dr. Esin KASAPOĞLU**

Bu çalışmada, eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0,7}Al_{0,3}As kare ve dikdörtgen kuantum tellerindeki donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisi tel boyutu, elektrik alan şiddeti, eğim açısı ve donör safsızlık atomunun yerine bağlı olarak etkin kütle yaklaşımında varyasyonel olarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlar, donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin tel boyutları arttıkça azaldığını, büyük tel boyutlarında bağlanma enerjisinin elektrik alana çok duyarlı olduğunu ve eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisinin arttığını gösterir.

ANAHTAR KELİMELER : Donör safsızlık atomları, Kuantum teli, Elektrik alan

SUMMARY**MSc Thesis****BINDING ENERGIES OF DONOR IMPURITIES IN GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs
QUANTUM WIRE UNDER THE TILTED ELECTRIC FIELD****Serkan KILIN****Cumhuriyet University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Physics****Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU**

In this study, the ground state binding energy of donor impurity in square and rectangular GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As quantum wires under the tilted electric field as a function of the wire dimension, the electric field strength, tilt angle and donor position has been investigated by using a variational technique within the effective mass approximation. The results show that, as the wire dimensions increase, the ground state binding energy of donor impurity decreases, the impurity binding energy becomes more sensitive to the electric field strength in the large wire dimensions and as the tilt angle increases the binding energy increases.

KEYWORDS: Donor impurities, Quantum wire, Electric field.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumu belirlemede bana yardımcı olan, tezi hazırladığım süre boyunca her türlü desteğini ve yardımını benden esirgemeyen tez danışman hocam sayın Doç. Dr. Esin Kasapoğlu'na teşekkür ederim.

Yine bu çalışma süresince bana yardımcı olan hocam sayın Prof. Dr. Hüseyin Sarı'ya ayrıca çalışmam boyunca büyük özveride bulunan aileme ve ev arkadaşım Alper Zeytun'a teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1-1.(a)	T = 0 K de yarıiletkenlerin band yapısı	4
Şekil 1-1.(b)	T > 0 K de yarıiletkenlerin band yapısı	4
Şekil 1-2.	Yarıiletkenlerde elektronların ve boşlukların elektrik alan altındaki davranışı	5
Şekil 2-1.(a)	As (+5) atomu katkılanmış Si (+4) atomu	7
Şekil 2-1.(b)	Donor enerji seviyesi	7
Şekil 2-2.(a)	Al (+3) atomu katkılanmış Si (+4) atomu	8
Şekil 2-2.(b)	Akseptör enerji seviyesi	8
Şekil 3-1.	GaAs/GaAlAs kuantum telinin şematik gösterimi	11
Şekil 3-2	Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga _{0.7} Al _{0.3} As kare kuantum telinin ($x_i = z_i = 0$) merkezinde yerleşen donor safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi	18
Şekil 3-3	F = 0, F = 50 kV/cm ve F = 150 kV/cm için elektronun taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi	19
Şekil 3-4	Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga _{0.7} Al _{0.3} As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donor safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi	20
Şekil 3-5	Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga _{0.7} Al _{0.3} As kare kuantum telinin sınırında ($x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$) yerleşen donor safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi	21
Şekil 3-6 (a)	$L_z=100\text{Å}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga _{0.7} Al _{0.3} As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = z_i = 0$ konumuna yerleşen donor safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi	23

- Şekil 3-6 (b) $L_x=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = z_i = 0$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi 23
- Şekil 3-7 $F = 0, F = 50 \text{ kV/cm}$ ve $F = 150 \text{ kV/cm}$ için elektronun taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi 24
- Şekil 3-8 (a) $L_z=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4, z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi 26
- Şekil 3-8 (b) $L_x=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4, z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi 26
- Şekil 3-9 (a) $L_z=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/2, z_i = -L_z/2$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi 28
- Şekil 3-9 (b) $L_x=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/2, z_i = -L_z/2$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi 28

- Şekil 3-10 (a) $L=50\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi 30
- Şekil 3-10 (b) $L=150\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi 30
- Şekil 3-11 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumunda yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi 31
- Şekil 3-12 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumunda yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi 32
- Şekil 3-13 (a) $L_x=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları (L_z) için eğim açısına göre değişimi 33
- Şekil 3-13 (b) $L_z=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları (L_x) için eğim açısına göre değişimi 33

- Şekil 3-14 (a) $L_z=100\text{\AA}$ ve $L_x=50\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi 36
- Şekil 3-14 (b) $L_z=100\text{\AA}$ ve $L_x=150\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi 36
- Şekil 3-15 (a) $L_x=100\text{\AA}$ ve $L_z=50\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi 38
- Şekil 3-15 (b) $L_x=100\text{\AA}$ ve $L_z=150\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi 38
- Şekil 3-16 (a) $L_z=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları (L_x) için eğim açısına göre değişimi 40
- Şekil 3-16 (b) $L_x=100\text{\AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları (L_z) için eğim açısına göre değişimi 40

1.GİRİŞ

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri metal ve yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Bu malzemelerin iletkenlikleri; sıcaklık, optik uyarılmalar ve katkılama ile büyük ölçüde değişir. Yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinin dış etkilerle belirgin bir şekilde değişebilir olması elektronik cihaz yapımında tercih nedenidir.

Bir yarıiletkeni metal ve yalıtkanlardan ayıran en temel özelliklerden birisi enerji bant aralığıdır. Bu aralık, yarıiletken tarafından yayılan veya soğurulan ışığın dalga boyu ile belirlenir. Örneğin, GaAs'ın enerji bant aralığı yaklaşık 1.43 eV dir ve bu değer yakın kırmızı ötesi bölgesindeki ışığın dalgaboyuna karşılık gelir. Bunun tersine GaP'ın bant aralığı yaklaşık 2.3 eV dir. Bu değer spektrumun yeşil bölgesine karşılık gelir. Yarıiletkenlerin bant aralıklarının değişimlerinin bir sonucu olarak spektrumun kırmızı ötesi ve görünür bölgesine düşen dalga boylarında ışık yayan diyotlar (LED ler) ve lazerler yapılabilir. Yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri katkı atomları ile de (impurity – safsızlık atomları) belirgin şekilde değişir.

Günümüzde yarıiletkenler devre elemanları yapımında çok sık kullanılmaktadır. Yarıiletkenlerin devre elemanı olarak kullanılması, elektronik teknolojinin hızlı gelişmesini sağlamış ve katıhal fiziği üzerine yapılan çalışmaların artmasına neden olmuştur. Yarıiletkenlerin uygulama alanında tercih edilmesinin temel nedeni, yarıiletken devre elemanlarının çok küçük hacimler içerisine yerleştirilebilir olması, söz konusu yarıiletkenlerin yasak bant aralıklarının küçük olması ve istenilen özelliklerde bir devre elemanı yapılmasına imkân vermesidir. Örneğin; nanoteknoloji, atomik veya moleküler boyuttaki maddelerin mühendisliği yapılarak yepyeni özelliklerinin açığa çıkarılmasıdır. Nanometre, metrenin milyarda birini temsil eder. İnsan saç telinin çapı 100.000 nm, bir toplu iğne başı 1 mm dir. 1 nm içerisine ancak 2–3 atom sığdırılabilir. Yaklaşık 100 ya da 1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir devre elemanı oluşturulur. Bir aygıtta kullanılan malzemenin boyutu küçüldükçe çalışma hızı da artar ve o malzemenin yeni özellikleri ortaya çıkar. Boyutlar nanometre ölçeklerine yaklaşırken malzemenin fiziksel özellikleri kuantum mekaniğinin kontrolüne girer, elektron durum-

larının fazı ve enerji spektrumunun kesikli yapısı daha belirgin hale gelir. Daha da önemlisi, malzemeyi oluşturan atom sayıları 100' ler düzeyine inince, atomsal yapının geometrisi, hatta atom sayısının kendisi bile fiziksel özelliklerin belirlenmesinde etken olur. Nanoölçeklerdeki bir yapıya yeni eklenen her atomun fiziksel özelliklerde neden olduğu değişiklikler, bu atomun cinsine, nanoyapının türüne ve geometrisine bağlı olarak belirginleşir. Örneğin; nano yapının iletkenliği, o yapıya tek bir atom eklense bile değişebilmektedir. Benzer şekilde, nanoölçeklerde atomlar arası bağ yapısı da değişikliğe uğrayabilmekte; mekanik olarak malzeme güçlenirken ya da zayıflarken, elektronik olarak iletkenlik özelliği tümüyle değişebilmektedir. Örneğin, yarıiletken olarak bilinen ve çağımızın en önemli malzemesi olan silisyumdan yapılan bir telin çapı nanometreye yaklaşırken tel iletken bir karakter sergiler.

Tasarlanan yeni elektronik devre elemanlarının modellenmesi sistemlerin ayarlanabilir fiziksel özellikleri temel alınarak yapılmaktadır. Yarıiletkenlerin kristal yapılarının incelenmesi sayesinde yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri belirlenebilmektedir. Bu nedenle bilim adamları çalışmalarını bu yapay modeller üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Bu çalışmalar 1970'lerin ortasından itibaren IBM de çalışan Esaki ve Tsu önderliğinde güç kazanmıştır[1]. MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) gibi büyütme teknikleri yarıiletken fiziği ve teknolojisinde önemli etkiler yapmıştır. Epitaksiyel olarak yapılan büyütme yöntemleri ile son derece değişik yapılar oluşturulabilmektedir. Örneğin, iki $Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken tabakası arasına GaAs tabakası oluşturularak tekli kuantum kuyuları, bu tabakaların periyodik tekrarlanması halinde çoklu kuantum çukurları veya tabaka kalınlıkları ayarlanarak oluşturulabilen süper örgüler, bu yöntemlerle kolayca elde edilebilmektedir.

Yapılan çalışmalarda önce yük taşıyıcılarının bir yöndeki hareketleri kısıtlanarak iki boyutlu kuantum kuyuları geliştirilmiştir. Daha sonra ise kuşatılma boyutları artırılarak bir boyutlu kuantum telleri ve sıfır boyutlu kuantum kutuları yapılmıştır. Geliştirilen sistemlerde boyut azaldıkça yani kuşatma arttıkça fiziksel

özellikleri belirleyen parametreler ayarlanabilir duruma gelmektedir. Bu sayede özel fonksiyonlara sahip aletler tasarlanmaktadır.

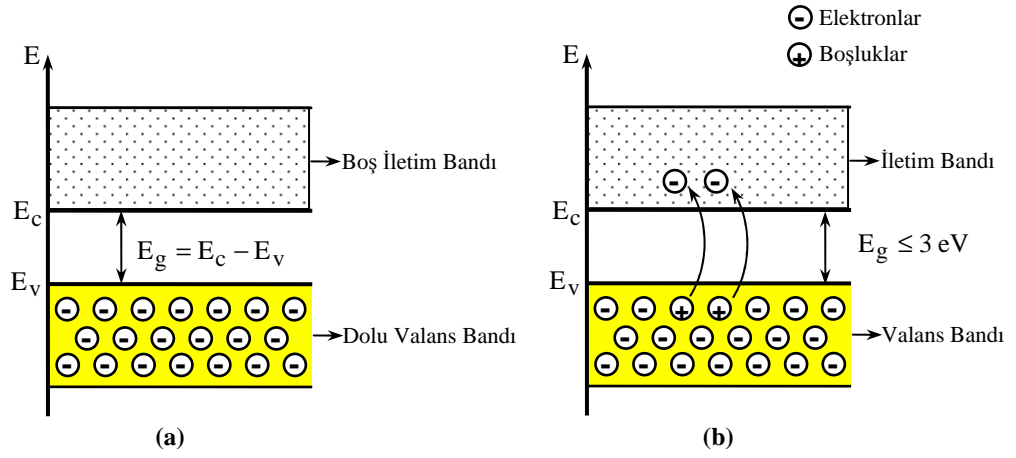
Yukarıda adı geçen düşük boyutlu sistemlerin külçe yapılara göre üstünlüğü bu sistemlerdeki boyut farklılığından kaynaklanır. Düşük boyutlu sistemler üzerine ilk çalışmalar Esaki ve Tsu tarafından yapılmıştır. Daha sonra Dingle ve arkadaşları çok dar heteroyapılarda soğurma olayını incelediler [2]. İki boyutlu sistemlerin özellikleri konusunda temel sayılabilecek bir çalışmada Ando, Fowler ve Stern tarafından yapılmıştır [3].

Düşük boyutlu sistemlerde son derece dar ve iyi tanımlanmış enerji düzeylerini elde etmek mümkündür. Buna ek olarak bu sistemlerde elektron (veya boşluk) yoğunluğu istenildiği gibi değiştirilebilir. Düşük boyutlu sistemlerin ilginç olmaları elektronik özelliklerinden kaynaklanır. Ayrıca yarıiletken mikroyapılar, elektronik cihazların hızlarının artırılmasında da çok önemli etkilere sahiptir. Bu devre elemanlarının boyutlarının çok küçük olması elektron iletimi için gereken net zamanı doğal olarak çok kısaltır. Bu nedenle çok daha küçük elektronik cihazların oluşturulması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Katkılı yarıiletken heteroyapılar da uygulama alanında yeni olanaklar sağlarlar. Örneğin, bu yapılarda mobilite, modülasyon katkılama ile artırılabilir. Bu yöntem ile engel karakterinde olan bölge katkılanır, engeldeki donörler iyonlaşarak bu bölgeden çukura doğru hareket ederler ve orada kuşatılırlar. Bu şekilde yük taşıyıcıları ve safsızlık iyonları ayrılmış olurlar. Böylece düşük sıcaklıklarda mobilitayı azaltan safsızlık saçılması ortadan kalkmış olur.

1.2. SAF YARIİLETKENLER

Her katının karakteristik bir enerji band yapısı vardır. Katılardaki band yapılarının çeşitliliği, elektrik iletiminde belirleyici özellikler taşır.

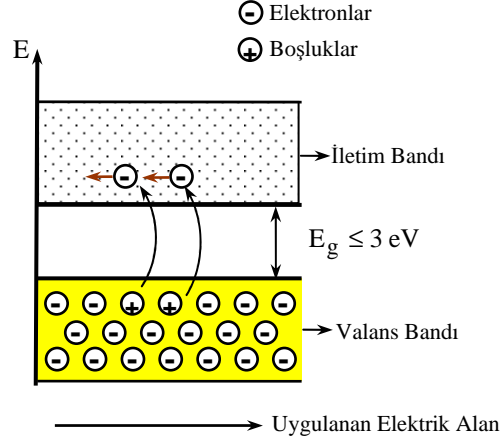


Şekil 1-1 (a) $T = 0$ K de yarıiletkenlerin band yapısı, (b) $T > 0$ K de yarıiletkenlerin band yapısı

Düşük sıcaklıklarda Şekil 1-1 (a) da görüldüğü gibi yarıiletkenin tüm elektronları değerlik bandındadır. İletim bandında hiç elektron bulunmadığı için bir yalıtkan gibi davranır. Yarıiletkenlerin en belirgin özelliği; iletkenliklerinin, iyi iletkenlerle yalıtkanlar arasında oluşu ve sıcaklığın artmasıyla artışıdır. Şekil 1-1 (b) de sıcaklığın artmasıyla valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına geçerler ve iletme katılırlar geride pozitif yüklü boşluklar bırakırlar. Bu şekilde yarıiletkenlerde elektronlar ve boşluklar olmak üzere iki tip yük taşıyıcı elde edilir.

Yarıiletkenleri yalıtkanlardan ayıran en önemli özellik, yasak enerji aralığının $E_g < 3$ eV olmasıdır, yalıtkanlarda ise bu aralık çok büyüktür ($E_g \sim 5$ eV) dolayısıyla yalıtkanlarda elektronların değerlik bandından iletim bandına geçme olasılıkları hemen hemen hiç yoktur. Yarıiletkenlerde elektriksel iletimin gerçekleşmesi, elektronların değerlik bandından herhangi bir etkenle (ısı, sıcaklık, basınç v.b) iletkenlik bandına geçmesi ile mümkündür. Elektronların iletim bandına

geçmeleri sonunda, valans bandında bıraktıkları yüklü parçacıklara hole (boşluk) denir. Boşluklar pozitif yüklü taneciklerdir ve elektrik alanı altında elektronlara zıt yönde hareket ederler.



Şekil 1-2 Yarıiletkenlerde elektronların ve boşlukların elektrik alan altındaki davranışı

İdeal bir yarıiletkende, örgü kusurları ve yabancı atomların oluşturdukları safsızlıklar yoktur. Bu tip yarıiletkenler katkısız veya saf yarıiletkenler olarak bilinir. Saf yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu n , boşluk yoğunluğu p olmak üzere; $n = p = n_i$ olacaktır.

n_i : Yarıiletkendeki saf taşıyıcıların yoğunluğudur.

Saf yarıiletkenlerde akım iletimine katkıda bulunan elektron veya boşluk sayısı az olduğundan aygıt yapımında nadir olarak kullanılır.

1.3 KATKILI YARIİLETKENLER

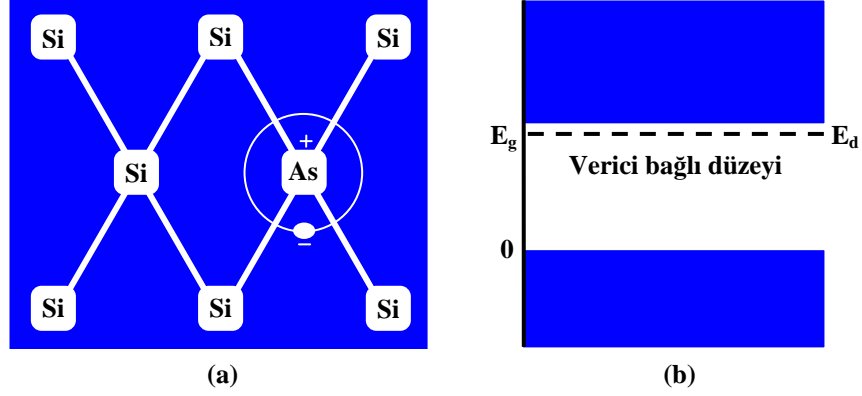
Saf yarıiletkenlerde akım iletimine katkıda bulunan elektron veya boşluk yoğunluğunu artırmak için kullanılan en yaygın yöntem, yarıiletken içerisine kristalin örgü yapısını bozmayacak bir şekilde safsızlık atomu (impurity) katmaktır. Yarıiletken içine safsızlık atomu katma işlemine “katkılama” bu tip yarıiletkenlere “katkılı yarıiletken” denir. (Örneğin Si içine $1/10^5$ oranında Bor katıldığında saf Silisyumun oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği 10^3 oranında artacaktır). Yarıiletkenlerde katkılama sonucu katkı atomunun cinsine bağlı olarak n-tipi ya da p-tipi yarıiletken oluşturmak mümkündür. Yarıiletkenlerde katkılama sonucu elektronik ve optik özellikleri istenilen şekilde ayarlanabilen devre elemanları yapılmasına imkân vermesi nedeniyle teknolojide geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Yarıiletken içerisine safsızlık atomu katkılayarak ilettime katılan elektron ya da boşluk sayısı artırılarak elektriksel iletkenliği artırılır. Saf yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri, katkı atomlarının cinsine ve konsantrasyonuna bağlı olarak belirgin ölçüde değişmektedir.

Bir yarıiletken kristal yapısında bulunan yabancı atomlar veya kristal yapı bozukluğu, yasak enerji bölgesinde lokalize ara enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur (Şekil 2-1(a) ve Şekil 2-2(a) de görüldüğü gibi).

2. SAFSIZLIK ATOMLARI

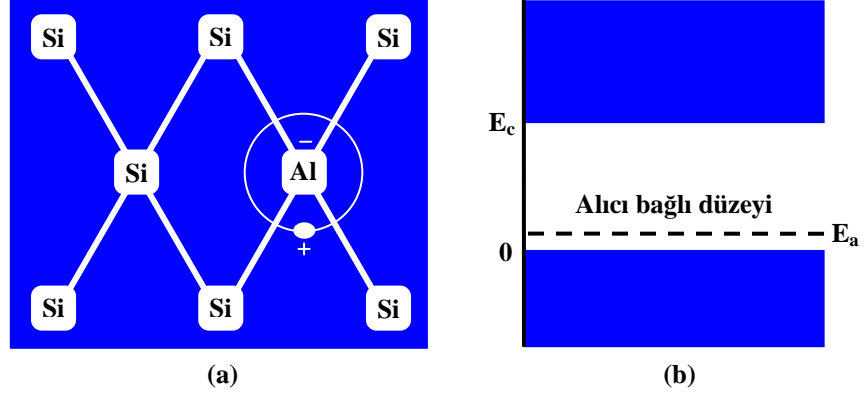
2.1 Verici Safsızlık Atomları



Şekil 2-1 (a) As(+5) atomu katkılanmış Si(+4) atomu; (b) Donor enerji seviyesi

Dört değerlik elektronuna sahip Si kristali içerisine, beş değerlik elektronuna sahip As atomu, kristalin örgü yapısını bozmayacak şekilde katkılanırsa, beş bağ elektronlu bu atomunun dört elektronu Si atomunun dört elektronu ile çiftli kovalent bağ yapar ve bir valans elektronu boşa kalır. Boşta kalan bu elektron $\frac{e^2}{\epsilon|\vec{r}|}$ Coulomb potansiyelinde hareket eder (ϵ dielektrik sabitidir). Her katkı atomu başına serbest kalan bu tek elektronun bağlanma enerjisi çok küçük olup, serbest elektron gibi davranır. Bu sebeple oda sıcaklığında iletkenlik bandında bulunur. Kristale karıştırılan beş bağ elektronlu atomlara (As), elektron verici anlamına gelen “donor” ve bu donor atomlarının iletkenlik bandına yakın olan enerji seviyesine “donor seviyesi” yeni oluşan katkılı yarıiletken ise “n-tipi yarıiletken” denir.

2.2 Alıcı Safsızlık Atomları



Şekil 2-2 (a) Al(+3) atomu katkılanmış Si(+4) atomu; (b) Akseptör enerji seviyesi

Ge veya Si kristaline üç bağ elektronlu (B, Ga, Al) atomlar katıldığında, yapılacak her bir “elektron çifti” bağı için bir elektron eksik kalacak veya başka bir deyişle bağ başına bir boşluk meydana gelecektir. Böyle bir kristale elektrik alan uygulanırsa komşu atomlardaki elektronlardan biri kolayca bu elektron boşluğunu doldurur ve böylece boşluk yer değiştirmiş olur. Boşluğun gittiği yerdeki komşu atomların elektronlarından biri yine elektron boşluğunu doldurabilir. Bu şekilde de elektron boşluğunun hareketi ile elektrik akımının taşınması gerçekleşir. Sonuçta boşluklar valans bandında bulunacak yabancı atomlar negatif yüklenerek iyonize olacaktır. Kristale karıştırılan üç bağ elektronlu yabancı atomlara elektron alıcı veya “akseptör” akseptörlerin valans bandına yakın olan enerji seviyesine “akseptör seviyesi” yeni oluşan katkılı yarıiletkeneye ise “p-tipi yarıiletken” denir. Şekil 2-2 (a) da Al atomu üç valans elektronuna sahiptir. Dörtlü kovalent bağını tamamlayabilmek için Si-Si bağından bir elektron Silisyum valans bandında bir boşluk bırakır. Bu pozitif boşluk iletkenliğe katılır. Al atomuna alıcı denir, çünkü iyonlaşmış durumda bir elektron almıştır. T = 0 K de boşluk bağlıdır, ancak sıcaklık arttıkça serbest duruma geçer.

Alıcı ve vericinin her ikisinde de enerji seviyesi yasak enerji aralığına düşmektedir. Bu bölge band modeline göre, elektronun bulunamayacağı bir yerdedir. Bunda bir çelişki yoktur, çünkü burada ki enerji seviyesi kristalin değil alıcı ve vericinin enerji seviyesidir. Bunlar safsızlık durumlarını temsil eder.

3. DÜŞÜK BOYUTLU SİSTEMLER

3.1 GİRİŞ

Külçe metal ve yarıiletkenlerde elektronlar üç-uzaysal doğrultuda da serbest bir şekilde hareket ederler. Elektronların hareketi belli doğrultularda kısıtlanırsa o zaman sistemin boyutu indirgenmiş olur. Kuantum teorisine göre; yarıiletkenlerin boyutu bir parçacığın de Broglie dalgaboyu ($\lambda = h/p$) mertbesinde olursa kuantum etkileri gözlenebilir. Bir yarıiletkenin bir uzaysal doğrultudaki boyutu parçacığın de Broglie dalgaboyu mertbesinde ise yarıiletkene kuantum kuyusu denir. Parçacığın hareketinin iki boyutta kuşatıldığı bir yarıiletkene kuantum teli denir ve bu yapılarda kuantum etkileri iki uzaysal doğrultuda gözlenir. Parçacığın hareketinin üç-uzaysal doğrultuda da kuşatıldığı kuantum etkilerinin gözlemlendiği yapılara da kuantum kutuları denir.

Yukarda sözü edilen bu düşük boyutlu sistemlerin hem elektronik hemde optik cihazlardaki uygulamaları ve ilginç fiziksel özelliklerinden dolayı yoğun bir şekilde çalışılmıştır [4-9]. Kuantum tellerinden yapılan cihazların optik ve iletim özellikleri safsızlık atomlarının varlığından dolayı belirgin bir şekilde değiştiği için bu yapılardaki safsızlık atomlarının elektronik ve optik özellikler üzerindeki etkileri de yoğun bir şekilde araştırılmıştır [10-15].

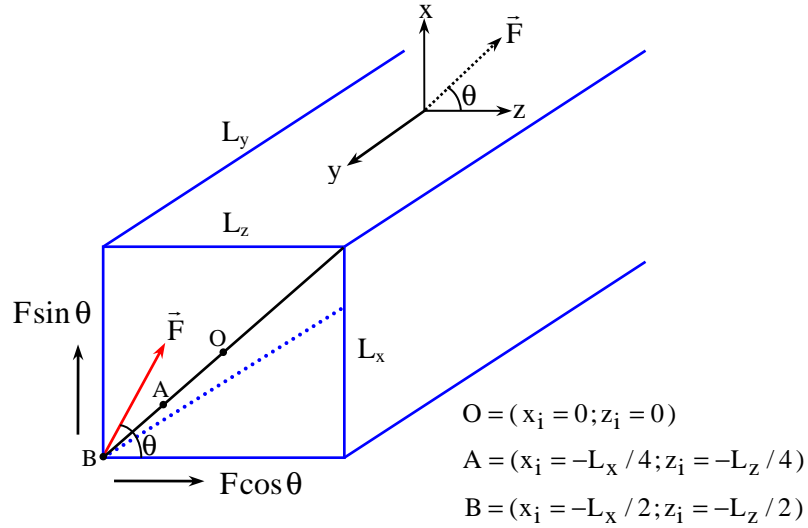
3.2 EĞİK ELEKTRİK ALAN ALTINDA KARE GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs KÜANTUM TELİNDEKİ DONORLARIN BAĞLANMA ENERJİSİ

Son yıllarda, kristal büyütme teknolojisinde gelişmeler bir – boyutlu kuantum tellerinin üretilmesine olanak sağlamıştır. Kuantum telleri, fotodetektör ve optoelektronik cihazlar [16–23] gibi farklı cihaz uygulamalarına olanak sağladığı için hem deneysel hem de teorik olarak yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Bilindiği gibi safsızlık atomları yarıiletken cihazlarda önemli bir rol oynar ve yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde artırır. Bu nedenle kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi düşük boyutlu sistemlerde

hidrojenik safsızlık atomları yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Kuantum tellerindeki safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerinde telin geometrik biçimi, safsızlık atomunun yeri, elektrik alan, manyetik alan ve basınç gibi dış alanların etkisi araştırılmıştır [24–37]. Bir kristalin büyütme doğrultusunda elektrik alan uygulanması taşıyıcı dağılımının kutuplanmasına (polarizasyon) neden olur ve cihazın çıkış şiddetini artırmak ve kontrol etmede kullanılan kuantum enerji durumlarının kaymasına neden olur.

Çalışmamızın bu kısmında, şematik gösterimi Şekil 3-1 de verilen kare GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs kuantum telindeki donör safsızlık atomlarının taban durum bağlanma enerjileri üzerine eğik olarak uygulanan elektrik alan, donör safsızlık atomunun konumu ve tel boyutlarının etkisi etkin kütle yaklaşımında varyasyonel olarak incelendi.



Şekil 3-1 GaAs/GaAlAs kuantum telinin şematik gösterimi

Etkin kütle yaklaşımında, kare kuantum telinde eğik elektrik alan altında kuşatılan bir elektron için Hamiltonian

$$H = \frac{\vec{p}^2}{2m_e^*} + V(x) + V(z) - \frac{e^2}{\epsilon_0 |\vec{r}|} + eF(x \sin \theta + z \cos \theta) \quad (3.1)$$

biçiminde verilir.

Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi, \vec{p} momentum operatörü, e elektronun yükü, F elektrik alan şiddeti, θ elektrik alanın z - eksenine ile yaptığı açı, $V(x)$, $V(z)$ x ve z doğrultularındaki sonlu kuşatma potansiyelleri, \vec{r} elektron ile donör atomu arasındaki uzaklık $\left(r = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2 + (z_e - z_i)^2} \right)$ ve ϵ_0 ortamın dielektrik sabitidir.

x ve z doğrultularındaki kuşatma potansiyellerinin fonksiyonel formu sırası ile

$$V(x) = \begin{cases} V, & x \leq -\frac{L_x}{2} \\ 0, & -\frac{L_x}{2} < x < \frac{L_x}{2} \\ V, & x \geq \frac{L_x}{2} \end{cases} \quad V(z) = \begin{cases} V, & z \leq -\frac{L_z}{2} \\ 0, & -\frac{L_z}{2} < z < \frac{L_z}{2} \\ V, & z \geq \frac{L_z}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

biçimindedir.

Denklem (3.1) deki Hamiltonian'de tüm uzunluklar $a_B = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{m_e^* e^2}$ Bohr yarı-

çapı, tüm enerji terimlerinde $R = \frac{m_e^* e^4}{2\epsilon_0^2 \hbar^2}$ Rydberg, ve $\tilde{F} = F \frac{a_B}{10 \text{Ryd}}$ cinsinden yazılır

larsa boyutsuz Hamiltonian

$$\tilde{H} = -\frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} - \left[\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{z}^2} \right] + \tilde{V}(\tilde{x}) + \tilde{V}(\tilde{z}) - \frac{2}{\sqrt{(\tilde{x}_e - \tilde{x}_i)^2 + (\tilde{y}_e - \tilde{y}_i)^2 + (\tilde{z}_e - \tilde{z}_i)^2}} + \tilde{F}(\tilde{x} \sin \theta + \tilde{z} \cos \theta) \quad (3.3)$$

şeklinde olur. Parçacık y doğrultusunda serbest olduğundan $y_i = 0$ olur ve yeni Hamiltonian,

$$\tilde{H} = -\frac{\partial^2}{\partial \tilde{y}^2} - \left[\frac{\partial^2}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{z}^2} \right] + \tilde{V}(\tilde{x}) + \tilde{V}(\tilde{z}) - \frac{2}{\sqrt{(\tilde{x}_e - \tilde{x}_i)^2 + \tilde{y}^2 + (\tilde{z}_e - \tilde{z}_i)^2}} + \tilde{F}\tilde{x} \sin \theta + \tilde{F}\tilde{z} \cos \theta \quad (3.4)$$

biçiminde elde edilir.

Elektron ve safsızlık atomu için Schrödinger denklemi

$$\tilde{H}\tilde{\Phi}(\tilde{x}, \tilde{z}, \tilde{y}, \alpha) = \tilde{E}\tilde{\Phi}(\tilde{x}, \tilde{z}, \tilde{y}, \alpha) \quad (3.5)$$

biçimindedir ve dalga fonksiyonu

$$\tilde{\Phi}(\tilde{x}, \tilde{z}, \tilde{y}, \alpha) = \tilde{\Psi}(\tilde{x})\tilde{\Psi}(\tilde{z})\varphi(\tilde{y}, \alpha) \quad (3.6)$$

ile verilir. α varyasyon parametresi olmak üzere y doğrultusundaki dalga fonksiyonu,

$$\varphi(\tilde{y}, \alpha) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \left(\frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\tilde{y}^2}{\alpha^2}} \quad (3.7)$$

olarak kullanılmıştır. z doğrultusunda ise, genişliği L olan sonsuz potansiyel kuyusunun öz fonksiyonlarından oluşan çözümler baz olarak kullanıldı. Sözü edilen bazlar, genel formda,

$$\Psi_n(\tilde{z}) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cos\left[\frac{n\pi}{L}\tilde{z} - \delta_n\right] \quad (3.8)$$

biçimindedir. δ_n , L genişliğindeki sonsuz kuyunun öz fonksiyonlarındaki tek veya çift özdeğere karşı gelen faz farkı olmak üzere,

$$\delta_n = \begin{cases} 0 & n - \text{tek ise} \\ \frac{\pi}{2} & n - \text{çift ise} \end{cases} \quad \text{değerlerini alır.} \quad (3.9)$$

Burada z doğrultusundaki çözümler

$$\tilde{\Psi}(\tilde{z}) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \tilde{\Psi}_n(\tilde{z}) \quad (3.10)$$

biçimindedir. Elektron ve safsızlık atomu için x doğrultusundaki $\tilde{\Psi}_n(\tilde{x})$ dalga fonksiyonunu elde etmek için bu doğrultudaki özdeğer denklemi tam olarak çözülebilir.

Böylece sistemin toplam enerjisi,

$$\min_{\alpha} \langle \tilde{\Phi} | \tilde{H} | \tilde{\Phi} \rangle = \tilde{E} \quad (3.11)$$

eşitliğinden hesaplanır ve \tilde{E} özdeğerini minimum yapan varyasyon parametresi bulunur. Buna göre denklem (3.11)'den

$$\begin{aligned}
\langle \tilde{\Phi} | \tilde{H}_y | \tilde{\Phi} \rangle &= \frac{1}{\alpha^2} \\
\langle \tilde{\Phi} | \tilde{H}_x | \tilde{\Phi} \rangle &= \tilde{E}_x \\
\langle \tilde{\Phi} | \tilde{H}_z | \tilde{\Phi} \rangle &= \tilde{E}_z
\end{aligned} \tag{3.12}$$

olmak üzere Hamiltonian'ın beklenen değeri,

$$\langle \tilde{H} \rangle = \frac{1}{\alpha^2} + \tilde{E}_x + \tilde{E}_z - \left\langle \tilde{\Phi} \left| \frac{2}{\sqrt{(\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + \tilde{y}^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}_i)^2}} \right| \tilde{\Phi} \right\rangle \tag{3.13}$$

olarak bulunur. Taban durumunda bulunan safsızlık atomunun bağlanma enerjisi

$$\tilde{E}_B = \tilde{E}_x + \tilde{E}_z - \langle \tilde{H} \rangle \tag{3.14}$$

ile verilir. Denklem (3.13) ve denklem (3.14) den bağlanma enerjisi

$$\begin{aligned}
\tilde{E}_B &= -\frac{1}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\Psi}(\tilde{x})|^2 d\tilde{x} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{\Psi}(\tilde{z})|^2 d\tilde{z} \\
&\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-2\tilde{y}^2/\alpha^2}}{\sqrt{(\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + \tilde{y}^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}_i)^2}} d\tilde{y}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

biçiminde elde edilmiş olur. Denklem (3.15)'deki Coulombic terimin integralini almak için;

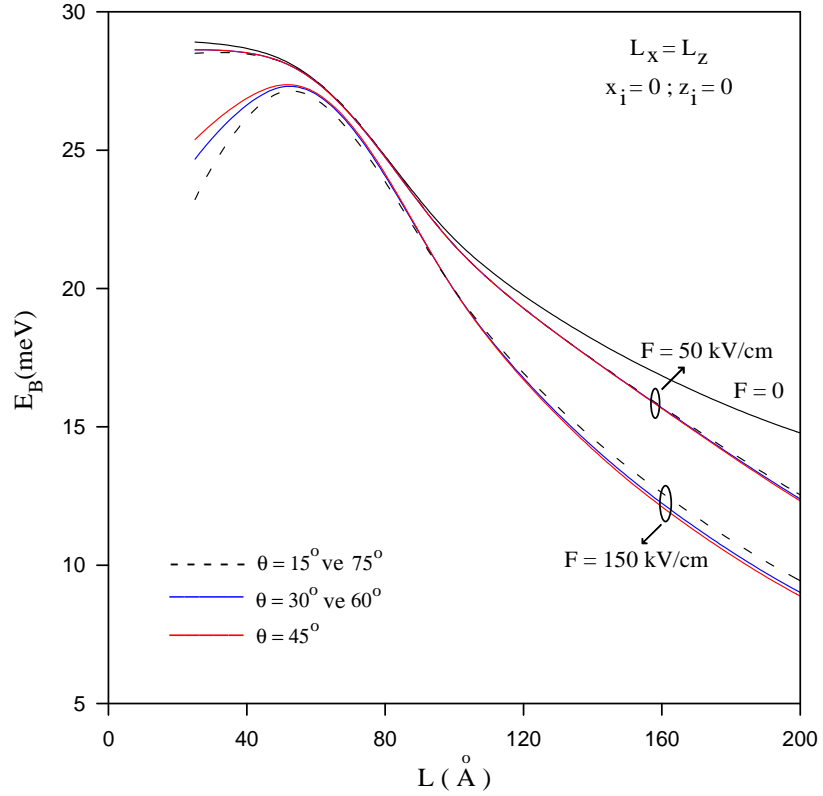
$$\begin{aligned}
&\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-2\tilde{y}^2/\alpha^2}}{\sqrt{(\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + \tilde{y}^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}_i)^2}} d\tilde{y} \\
&= e^{(\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}_i)^2 / \alpha^2} \text{BesselK} \left[0, (\tilde{x} - \tilde{x}_i)^2 + (\tilde{z} - \tilde{z}_i)^2 / \alpha^2 \right]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada BesselK ikinci tip Bessel fonksiyonudur. Hesaplamalarda kullanılan fiziksel parametrelerin değeri, $m_e = 0.067m_0$, $\epsilon_0 = 12.5$, $a_B = 165,591 \text{ \AA}$, $R = 3.47369 \text{ meV}$, $V = 228 \text{ meV}$ dir. Bu parametreler alüminyum konsantrasyonun $x \cong 0.3$ olarak alındığı GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heteroyapıları için uygun değerlerdir.

Şekil 3-2’de kare kuantum telinin ($L = L_x = L_z$), merkezinde yerleşen ($x_i = z_i = 0$) donor safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için verilmiştir. Burada görüldüğü gibi tel boyutu arttıkça bağlanma enerjisi bir maksimuma ulaşınca kadar artar ve sonra azalmaya başlar. Bağlanma enerjisinin maksimum olduğu L değerleri için sistem yarı-iki boyutlu karaktere sahiptir ve elektron ile safsızlık atomunun aynı düzlemde bulunma olasılığı fazladır. Çok büyük L değerlerinde ise geometrik kuşatma zayıflar ve safsızlık atomunun bağlanma enerjisi üç boyutlu sistemdeki değerine yaklaşır. Çünkü tel boyutu arttıkça elektron ile safsızlık atomunun aynı düzlemde bulunma olasılığı azalacağından bağlanma enerjisi azalır. Çok küçük L değerlerinde ise elektron çok enerjik olduğundan tünelleme olayı gözlenerek potansiyel engelinden sızmalar artar ve sistem çok büyük L değerlerinde olduğu gibi yeniden üç boyutlu karaktere sahip olur. Dolayısıyla çok küçük L değerlerinde bağlanma enerjisi hızla külçe yapıdaki değerine yaklaşır. İki boyutlu yapılardan bir boyutlu yapılara geçildiğinde, sistemin geometrik kuşatmasının artması safsızlık atomu ile elektronun aynı düzlemde bulunma olasılığını artırır ve yapı daha kararlı bir duruma gelir. Bu nedenle kuantum telindeki safsızlık atomunun bağlanma enerjisi, kuantum kuyusundaki değerine göre yaklaşık olarak iki kat arttığı gözlenir.

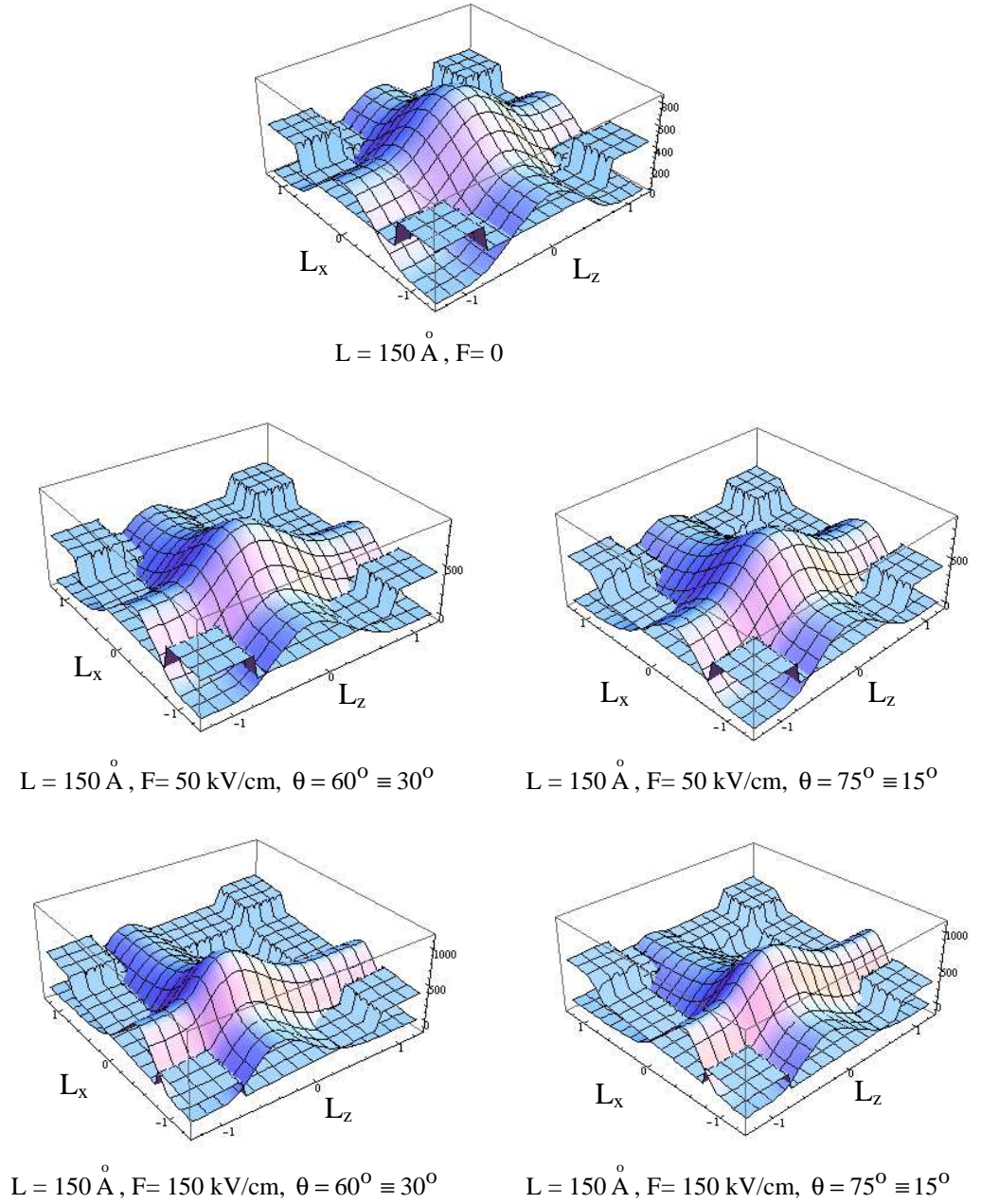
Bilindiği gibi, sisteme elektrik alan uygulandığı zaman elektronlar alana zıt yönde sürüklenirler (Şekil 3-3) ve tel merkezinde yerleşen safsızlık atomu ile elektronun aynı düzlemde bulunma olasılığı azaldığı için donor bağlanma enerjisi de azalır. Küçük L – değerlerinde elektronun enerjisi yeterince büyük olduğu için elektrik alanın yapının potansiyelinde yarattığı değişiklikten çok fazla etkilenmezken L – değeri büyüdükçe enerjisi azalan elektron hem x hemde z – doğrultularındaki kuantum kuyularının tabanına yerleşir ve bu nedenle elektrik alandan daha fazla etkilenirler. Yani kuantum tellerinin boyutları arttıkça, tel merkezinde yerleşen donor atomunun bağlanma enerjisinin elektrik alana duyarlılığı artar ve bağlanma enerjisi hızla azalır.

Ayrıca tel merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisi elektrik alanın uygulama açısından hemen hemen bağımsız ve birbirini 90° ye tamamlayan açılarda elektronun yapı içerisinde toplam geometrik kuşatması özdeş olduğu için bağlanma enerjileri eşit olacaktır.



Şekil 3-2 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin ($x_i = z_i = 0$) merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi

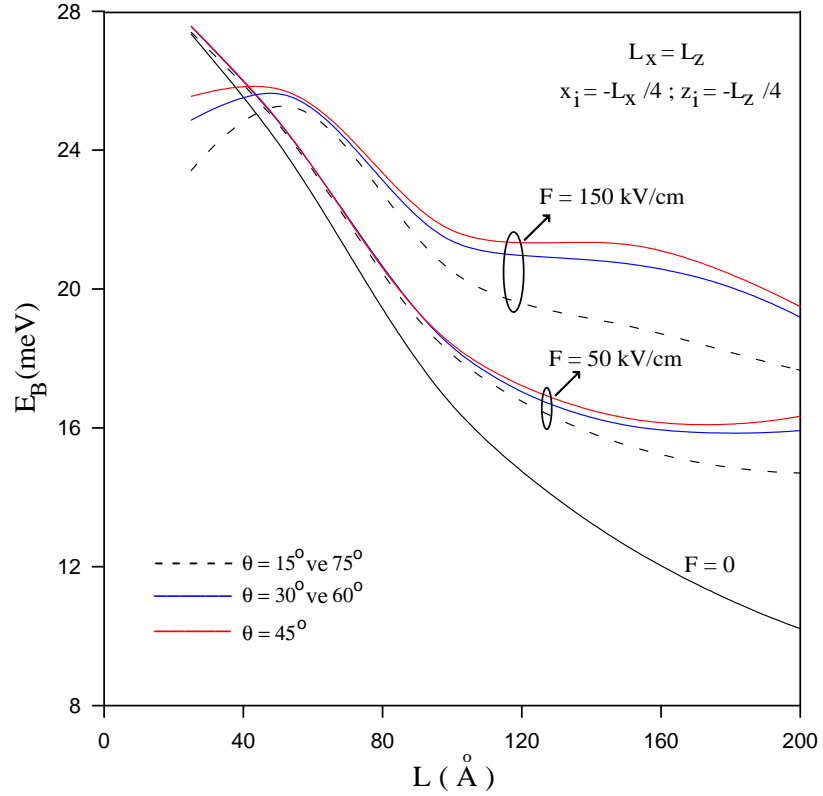
Şekil 3-3’de $L = 150 \text{ \AA}$ için elektronun taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi farklı açı ve farklı elektrik alan değerleri için verilmiştir. Elektrik alan kuantum teline $+x$ ve $+z$ yönünde uygulandığında, teli $-x$ ve $-z$ yönünde bükerek elektronların bükülme yönüne doğru itilmesine sebep olur. Dolayısıyla elektronların tel merkezinde bulunma olasılığının azalacağı görülür.



Şekil 3-3 $F = 0$, $F = 50 \text{ kV/cm}$ ve $F = 150 \text{ kV/cm}$ için elektronun taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi

Şekil 3-4'te kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumuna (Şekil 3-1 de belirtilen A noktası) yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için veril-

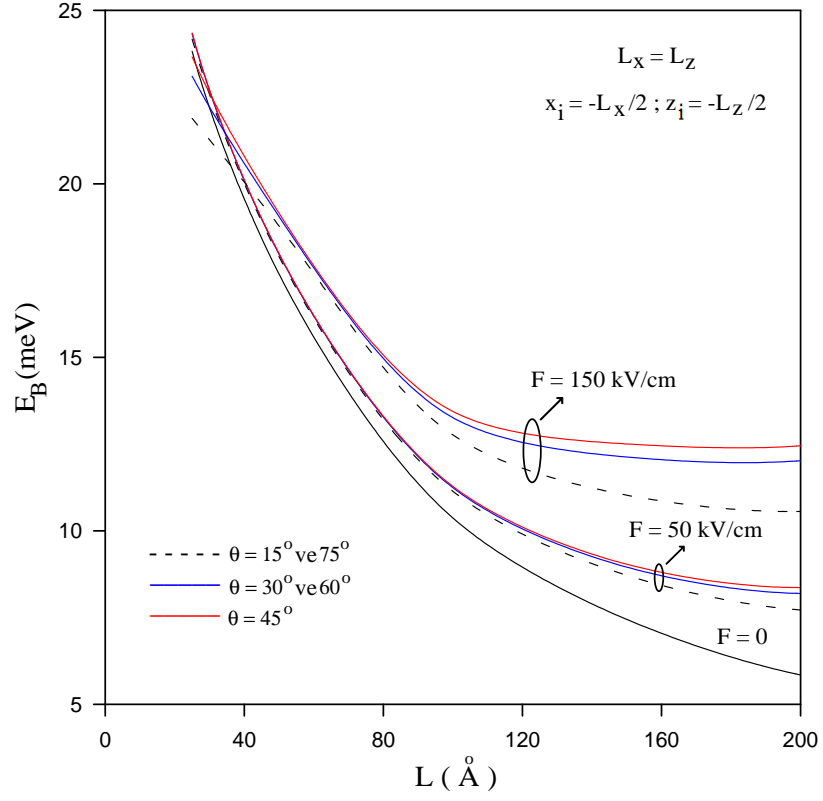
miştir. A noktasında bulunan donör atomu için bağlanma enerjisinin tel boyutuna göre değişimi özellikle küçük L değerlerinde tel merkezinde yerleşen donör atomu için benzer olmasına karşın, elektron elektrik alan arttıkça O noktasından (tel merkezin) A noktasına doğru süpürüldüğü için Şekil 3-2 nin aksine bağlanma enerjisi artar. Özellikle $F = 50 \text{ kV/cm}$ alan değerinde tel boyutu büyüdükçe elektronun A noktasında bulunma olasılığı arttığı için bağlanma enerjisi artar. Ayrıca A noktasındaki donör atomu için bağlanma enerjisinin elektrik alan şiddetine ve eğim açısına bağlılığı daha belirgindir.



Şekil 3-4 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi

Şekil 3-5'te kare kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumuna (Şekil 3-1 deki B noktası), yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için verilmiştir.

Beklendiği gibi tel sınırlarında (Şekil 3-1 deki B noktası) yerleşen donör safsızlık atomu için bağlanma enerjisi O ve A noktalarında yerleşen donör atomlarının bağlanma enerjisinden oldukça küçüktür. Ayrıca büyük tel boyutlarında ve büyük alan değerlerinde eğim açısına bağlılık merkezi donör atomu için elde edilen sonuçların aksine artmaktadır.

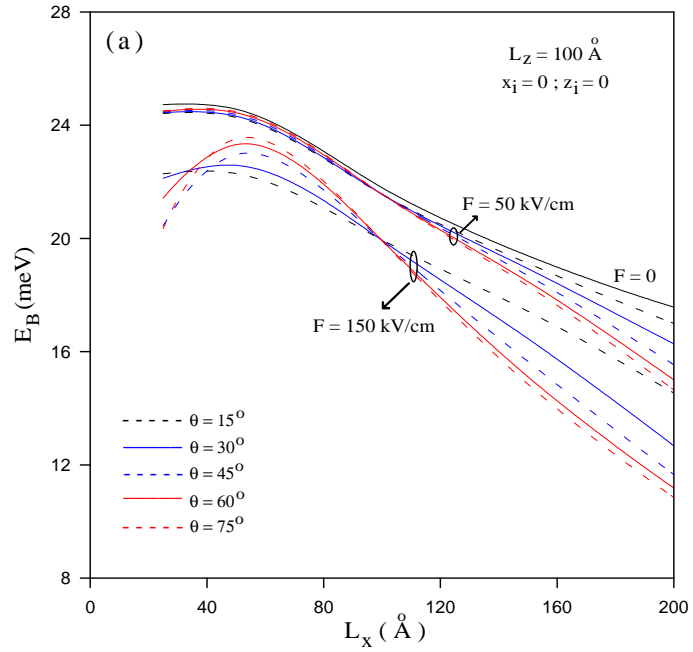


Şekil 3-5 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin sınırında ($x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$) yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına göre değişimi

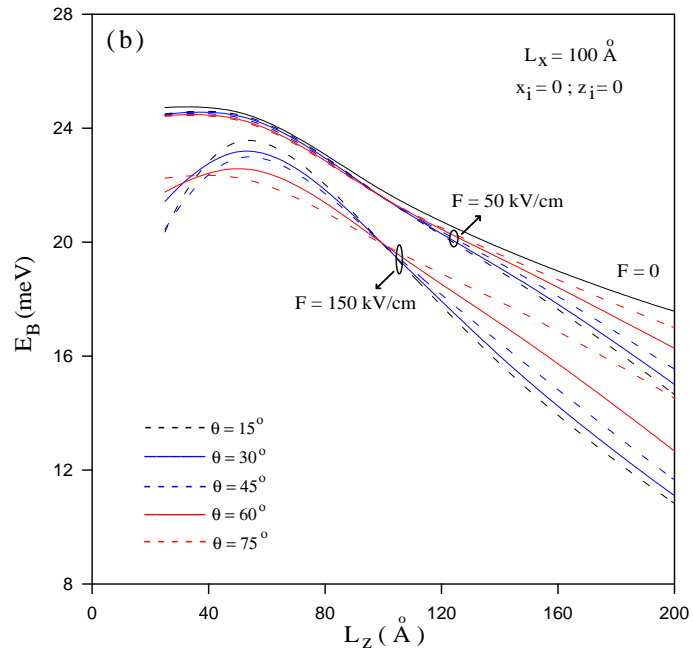
Şekil 3-6 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin ($L_x \neq L_z$) $x_i = z_i = 0$ (Şekil 3-1 deki O noktası) konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için verilmiştir. Tel merkezine yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisi tel boyutu arttıkça kare kuantum telinde olduğu gibi azalır. Düşük elektrik alan ve L değerlerinde bağlanma enerjisi açı değerlerinden bağımsız iken $L > 100 \text{Å}$ dan sonra donör bağlanma enerjisinin açığa bağımlılığı artmıştır. Elektrik alan şiddeti artırıldığında küçük L değerlerinde de donör bağlanma enerjisinin eğim açısına duyarlılığının arttığı görülür.

Şekil 3-6 (a) da $L_x < 100 \text{Å}$ geometrik kuşatma altında büyük açı değerlerinde bağlanma enerjisinin daha büyük, $L_x > 100 \text{Å}$ geometrik kuşatma altında ise büyük açı değerlerinde bağlanma enerjisinin daha küçük olduğu görülür.

Şekil 3-6 (b) de Şekil 3-6 (a) ya benzer özellik gösterir ancak $L_z < 100 \text{Å}$ geometrik kuşatma altında büyük açı değerlerinde bağlanma enerjisi küçük, $L_z > 100 \text{Å}$ geometrik kuşatma altında ise büyük açı değerlerinde bağlanma enerjisinin daha büyük olduğu görülür.

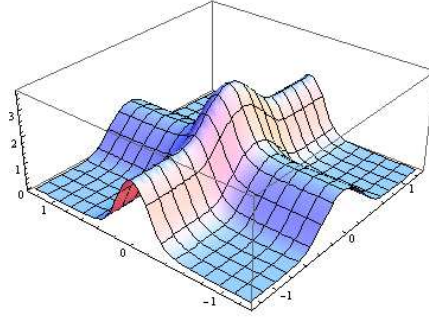


Şekil 3-6 (a) $L_z = 100 \text{ \AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = z_i = 0$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi

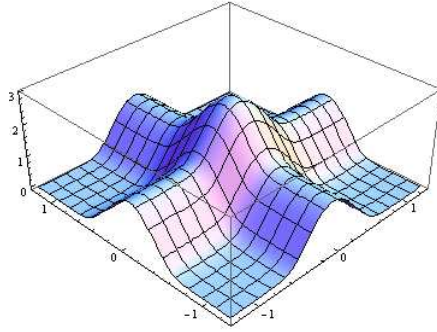


Şekil 3-6 (b) $L_x = 100 \text{ \AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = z_i = 0$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi

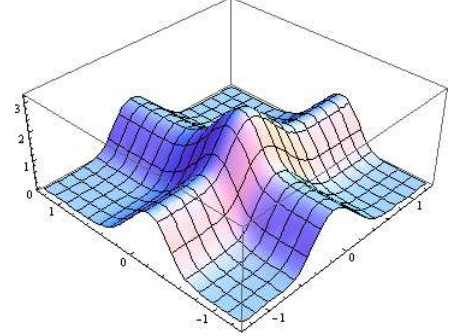
Şekil 3-7’de elektron taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi $\theta = 60^\circ$, farklı elektrik alan değerleri ve tel boyutları için verilmiştir. Beklendiği gibi Şekil 3-3 dekine benzer özellik gösterdiği görülmüştür.



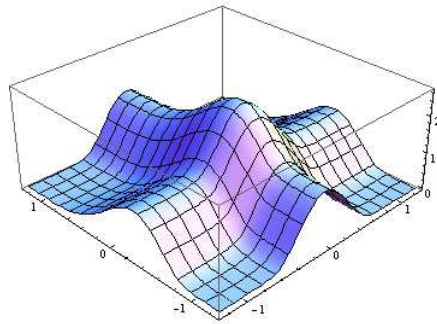
$$L_x = 50 \text{ \AA}, L_z = 100 \text{ \AA}, F = 0$$



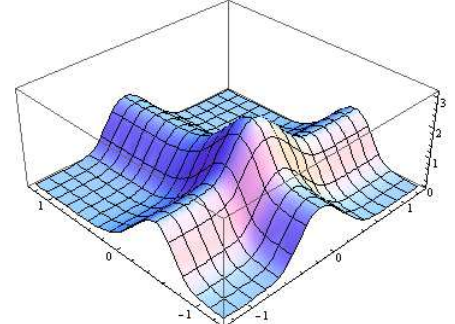
$$L_x = 50 \text{ \AA}, L_z = 100 \text{ \AA} \\ F = 50 \text{ kV/cm}, \theta = 60^\circ$$



$$L_x = 50 \text{ \AA}, L_z = 100 \text{ \AA} \\ F = 150 \text{ kV/cm}, \theta = 60^\circ$$



$$L_x = 150 \text{ \AA}, L_z = 100 \text{ \AA} \\ F = 50 \text{ kV/cm}, \theta = 60^\circ$$



$$L_x = 150 \text{ \AA}, L_z = 100 \text{ \AA} \\ F = 150 \text{ kV/cm}, \theta = 60^\circ$$

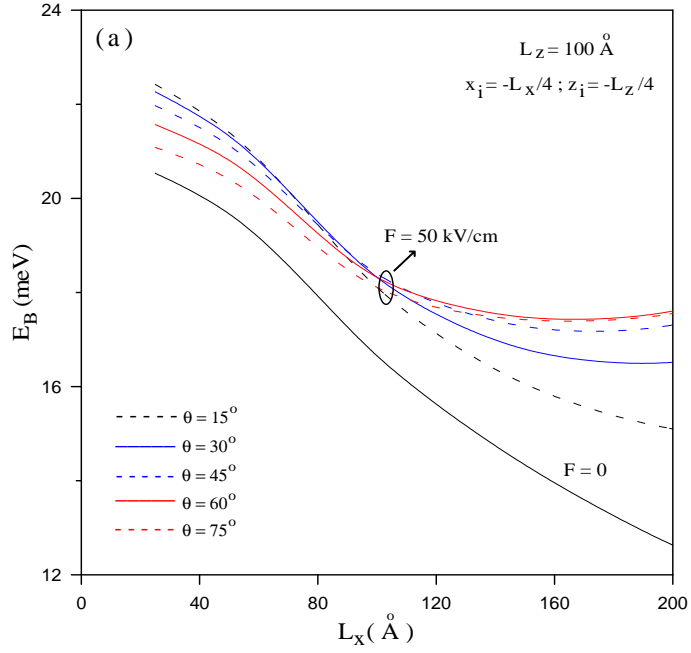
Şekil 3-7 F = 0, F = 50 kV/cm ve F = 150 kV/cm için elektronun taban durum dalga fonksiyonunun karesinin normalize konuma göre değişimi

Şekil 3-7 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin ($L_x \neq L_z$) $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ (Şekil 3-1 deki A noktası) konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için verilmiştir. Şekil 3-7 (a) ve (b) de görüldüğü gibi telin A noktasına yerleşen donör bağlanma enerjisinin tel boyutuna göre değişimi Şekil 3-2 dekine benzer olmasına rağmen açığa duyarlılık tel boyutu arttıkça artmaktadır. Hem elektrik alan şiddetinin artırılmasıyla daha etkili olması hemde yapıya eğik olarak uygulandığı için her iki doğrultuda da farklı etki yaratmasından (yani farklı oranlarda elektronları süpürmesi) dolayı belirtilen donör atomları konumları için bağlanma enerjisinin açığa duyarlılığı artmaktadır.

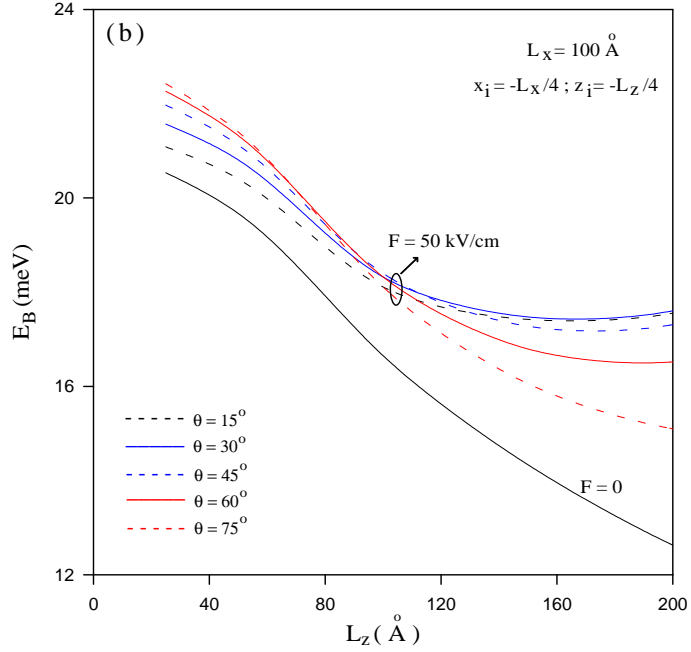
Tele uygulanan elektrik alan teli, elektrik alana ters yönde bükerek elektronları bükülme yönünde süpüreceğinden donör safsızlık atomu ile elektronların aynı düzlemde bulunma olasılığı artacağından alan altındaki bağlanma enerjisi $F = 0$ daki durumdan daha büyüktür.

Şekil 3-8 (a) da $L_x < 100 \text{ \AA}$ geometrik kuşatma altında küçük açı değerlerinde bağlanma enerjisi daha büyük, $L_x > 100 \text{ \AA}$ geometrik kuşatma altında ise küçük açı değerlerinde bağlanma enerjisini küçük olduğu görülmüştür.

Şekil 3-8 (b) de ise Şekil 3-8 (a) ya benzer özellik gösterir ancak $L_z < 100 \text{ \AA}$ geometrik kuşatma altında büyük açı değerlerinde bağlanma enerjisi büyük iken $L_z > 100 \text{ \AA}$ geometrik kuşatma altında büyük açı değerlerinde daha küçüktür.

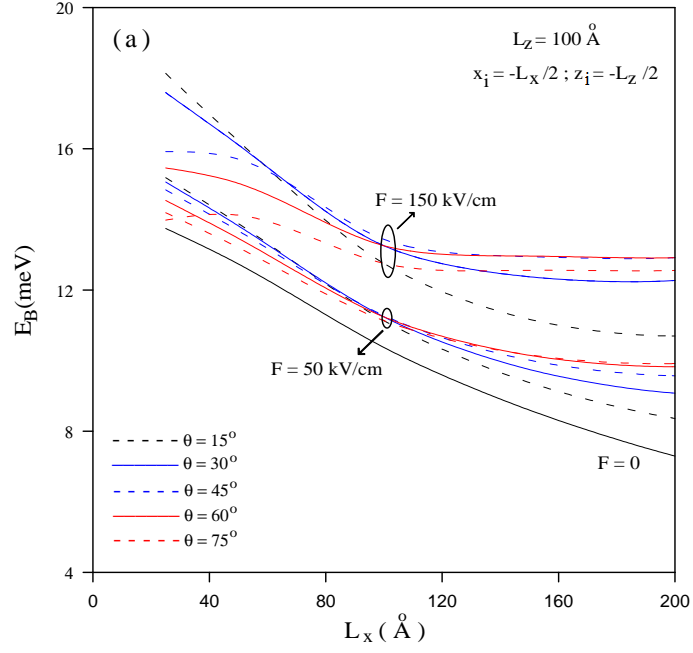


Şekil 3-8 (a) $L_z = 100 \text{ \AA}$ eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi

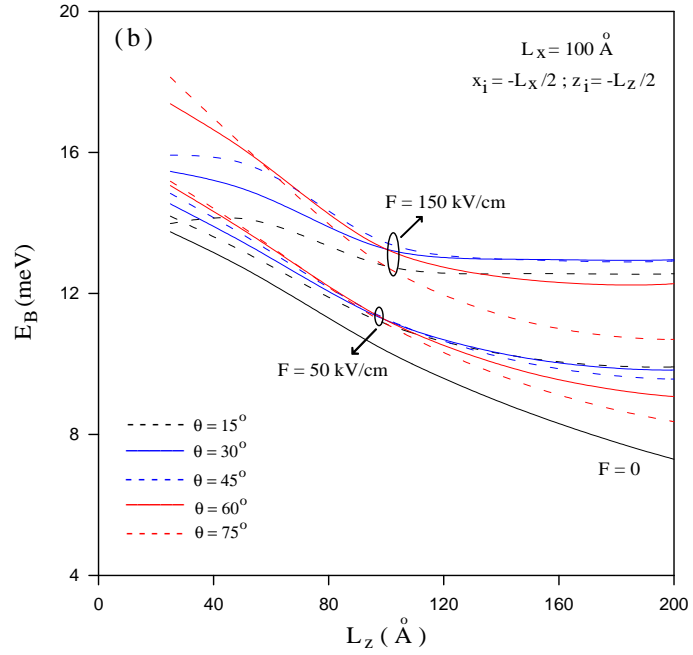


Şekil 3-8 (b) $L_x = 100 \text{ \AA}$ eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi

Şekil 3-8 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin ($L_x \neq L_z$) $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ (Şekil 3-1 deki B noktası) konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin tel boyutuna bağlı olarak değişimi farklı elektrik alan ve açı değerleri için verilmiştir. Şekil 3-8 (a) ve (b) de görüldüğü gibi telin B noktasına yerleşen donör bağlanma enerjisinin tel boyutuna göre değişimi Şekil 3-7 (a) ve (b) dekine benzer olmasına rağmen bağlanma enerjisinin değerinin daha düşük olduğu görülür. Ayrıca eğim açısına bağlı donör atomunun bağlanma enerjisi ise tam tersi bir özellik gösterir.



Şekil 3-9 (a) $L_z = 100 \text{ \AA}$ eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_x) göre değişimi



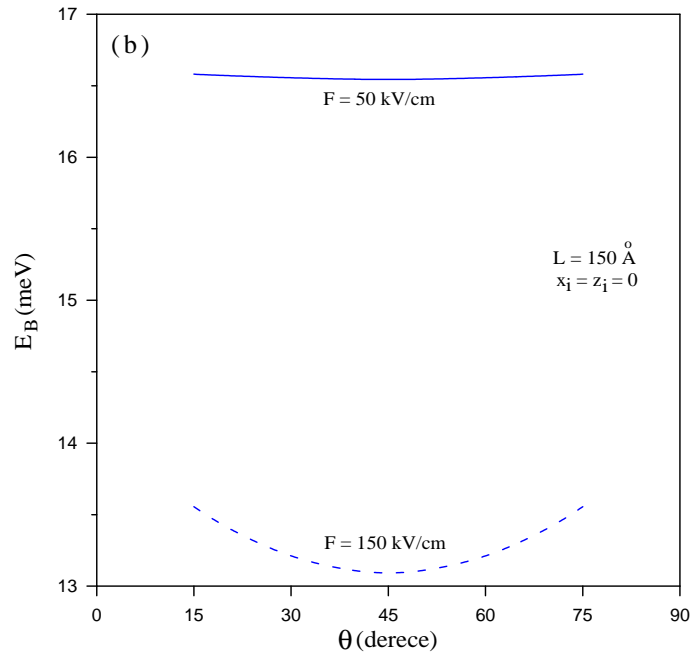
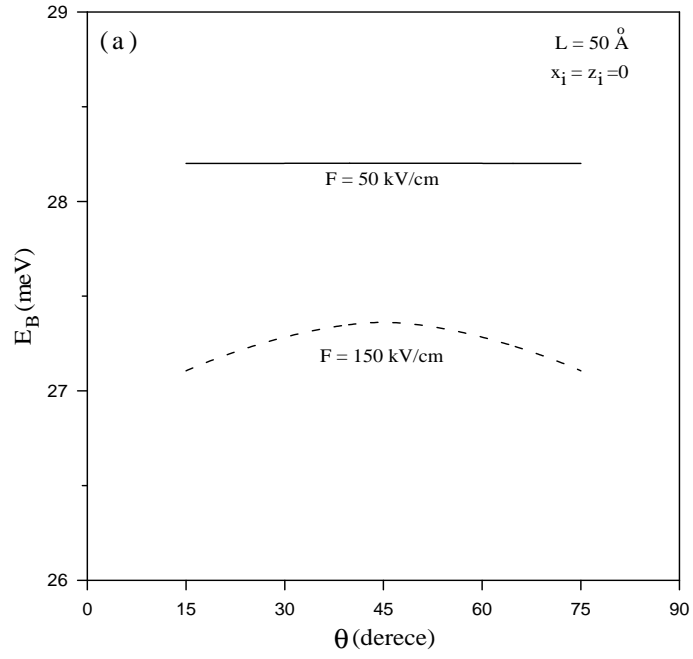
Şekil 3-9 (b) $L_x = 100 \text{ \AA}$ eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı açı ve alan değerleri için tel boyutlarına (L_z) göre değişimi

Şekil 3-10 (a) ve (b) de sırası ile eğik elektrik alan altındaki kare kuantum telinin merkezinde yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi $L = 50 \text{ \AA}$ ve $L = 150 \text{ \AA}$ için verilmiştir.

Şekil 3-10 (a) da $L = 50 \text{ \AA}$ tel boyutunda merkezi donör atomu için bağlanma enerjisi düşük alan değerlerinde eğim açısından bağımsızdır. Büyük alan değerlerinde ise bağlanma enerjisinin eğim açısına bağımlılığı biraz daha artar. Ayrıca $F = 150 \text{ kV/cm}$ alan değeri için merkezi donör atomunun bağlanma enerjisi $\theta = 45^\circ$ de en büyük değerini alır.

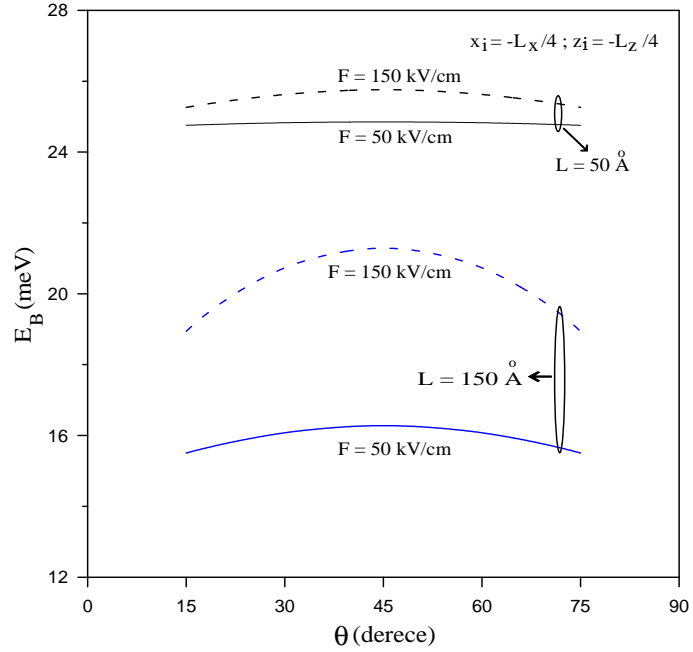
Şekil 3-10 (b) de $L = 150 \text{ \AA}$ tel boyutunda merkezi donör atomu için bağlanma enerjisi düşük alan değerlerinde Şekil 3-10 (a) daki gibi eğim açısından bağımsız iken büyük alan değerlerinde ise tam tersi bir özellik gösterir. Alan değeri artırıldığında parçacık telin bükülme yönüne doğru daha çok süpürülerek elektron ile safsızlık atomu aynı düzlemde bulunma olasılığı azalacağından Coulombic etkileşim azalır ve $\theta = 45^\circ$ de minimum değerine ulaşır.

Her iki şekilde de görüldüğü gibi birbirini 90° ye tamamlayan açılarda elektron her iki doğrultuda da aynı geometrik kuşatmanın etkisi altında kaldığı için bağlanma enerjileri eşittir.



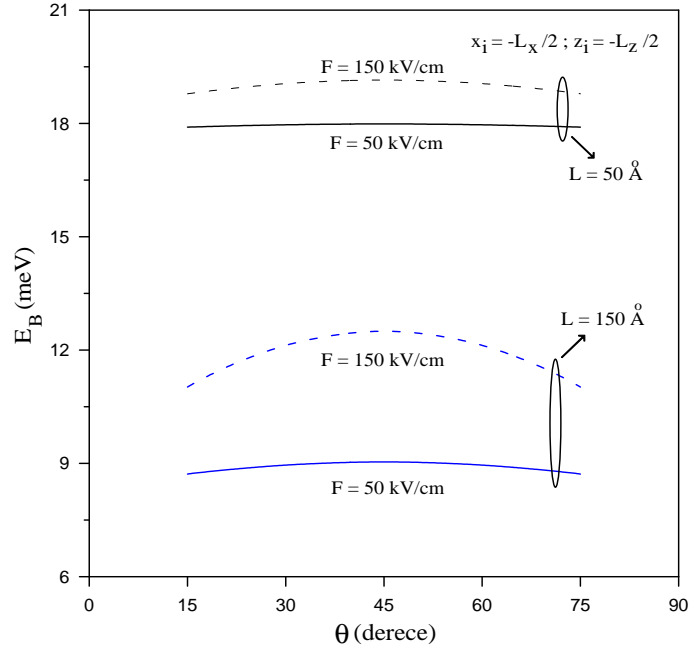
Şekil 3-10 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi: (a) $L = 50 \text{ \AA}$ ve $L = 150 \text{ \AA}$

Şekil 3-11 de kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumundaki (A noktası) donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farklı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi A noktasında yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisi, küçük tel boyutlarında eğim açısına ve elektrik alan şiddetine bağımlılığı yok denecek kadar az iken büyük tel boyutlarında elektrik alan şiddetine ve eğim açısına bağımlılığı özellikle büyük elektrik alan değerlerinde artar.



Şekil 3-11 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ konumunda yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi

Şekil 3-12 de kare kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumundaki (B noktası) donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farklı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi B noktasında yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisi Şekil 3-11 dekine benzer olmasına rağmen tel sınırında bulunan donör atomlarının bağlanma enerjisinin daha küçük olduğu görülür.

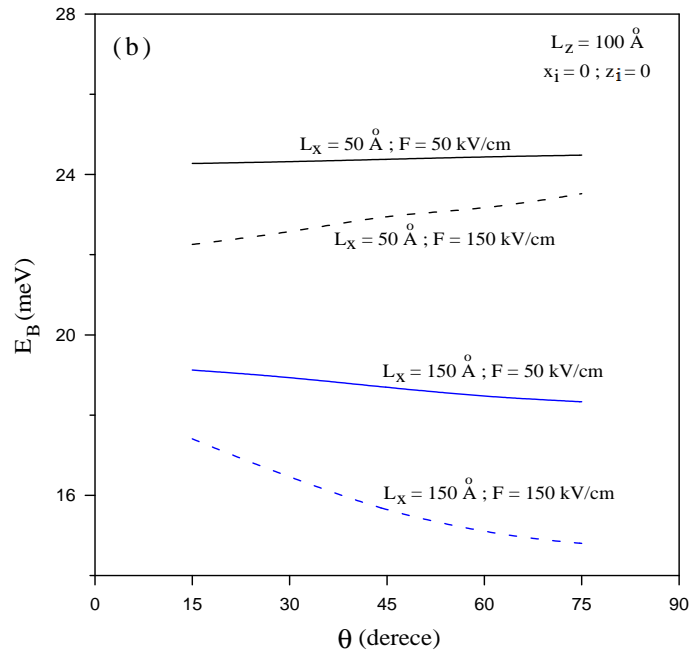
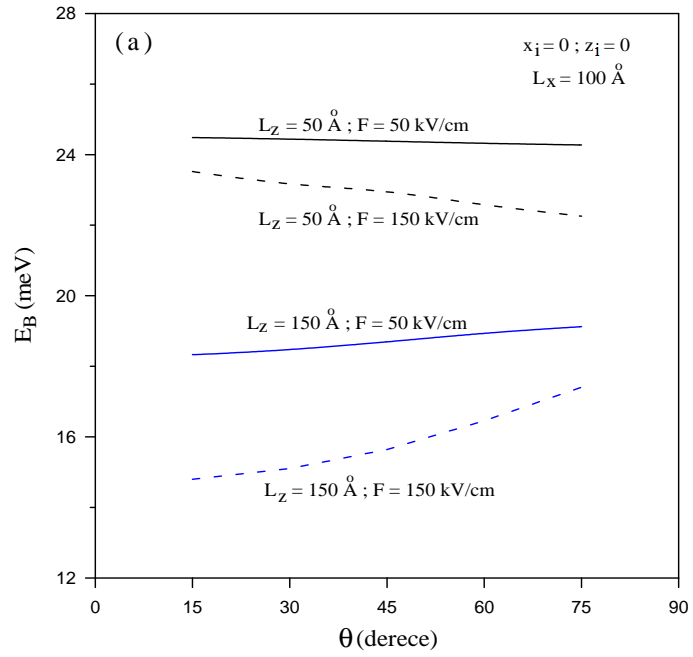


Şekil 3-12 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As kare kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ konumunda yerleşen donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi

Şekil 3-13 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin merkezinde (O noktası) yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farkı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir.

Şekil 3-13 (a) da $L_x = 100 \text{ \AA}$ ve $L_z = 50 \text{ \AA}$ tel boyutunda O noktasına yerleşen donör atomu için düşük alan değerlerinde bağlanma enerjisi eğim açısından bağımsız iken elektrik alan şiddeti artırıldığında eğim açısına bağımlılık artmaktadır. Elektrik alan şiddeti artırıldığında bağlanma enerjisi eğim açısı arttıkça azalır. L_z doğrultusundaki geometrik kuşatma artırıldığında küçük alan değerlerinde de bağlanma enerjisi açıya duyarlı hale gelirken eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisinin de arttığı görülür.

Şekil 3-13 (b) de ise Şekil 3-13 (a) dakine tam tersi bir özellik gösterir. $L_z = 100 \text{ \AA}$, $L_x = 50 \text{ \AA}$ tel boyutunda O noktasına yerleşen donör atomu için düşük alan değerlerinde bağlanma enerjisi eğim açısından bağımsızdır. Elektrik alan şiddeti artırıldığında eğim açısına bağımlılık artarken bağlanma enerjisi azalır. L_x doğrultusundaki kuşatma ve elektrik alan şiddeti artırıldığında, eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisi azalmıştır.

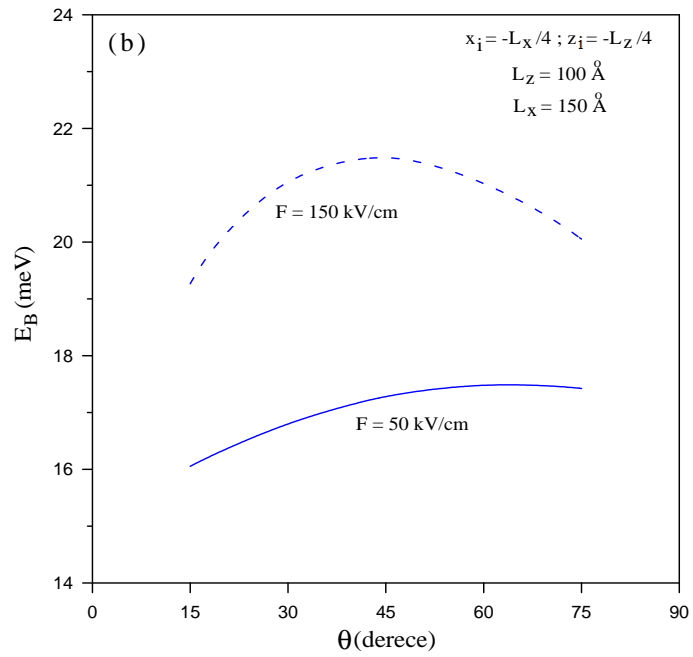
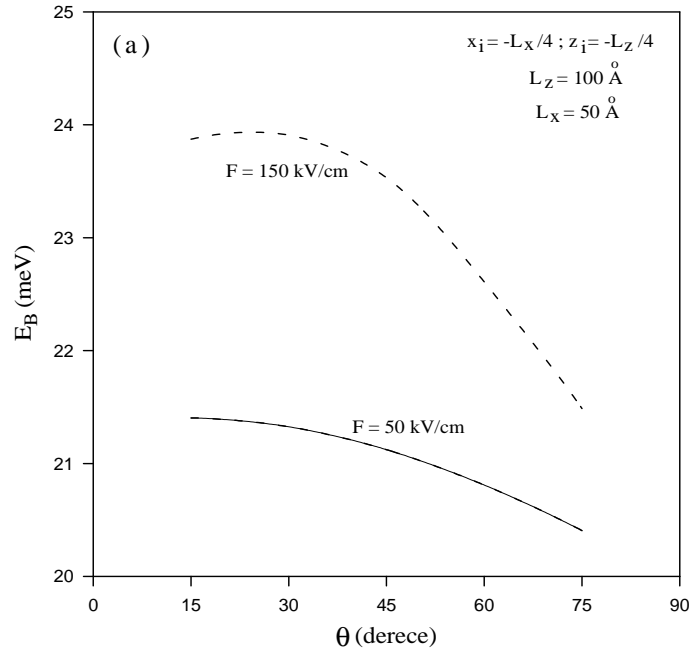


Şekil 3-13 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi: (a) $L_x = 100 \text{ \AA}$ ve (b) $L_z = 100 \text{ \AA}$

Şekil 3-14 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ (A noktası) konumuna yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farkı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir.

Şekil 3-14 (a) da x-doğrultusundaki kuşatma küçük olduğunda düşük elektrik alan şiddetinde bağlanma enerji eğim açısının artmasıyla azalır. Elektrik alan şiddeti arttırıldığında donör safsızlık atomlarının konumu gereği bağlanma enerjisi daha büyük olur ve eğim açısına daha duyarlı hale gelir. Eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisi hızla azalır.

Şekil 3-14 (b) de x-doğrultusundaki kuşatma arttırıldığında Şekil 3-14 (a) daki duruma ters özellik göstererek küçük alan değerlerinde eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisi artar. Elektrik alan şiddeti ve eğim açısı arttırıldıkça bağlanma enerjisi artar, $\theta \cong 45^\circ$ de maksimum değere ulaşır. Daha büyük açılarda ise donör bağlanma enerjisi tekrar azalmaya başlar.

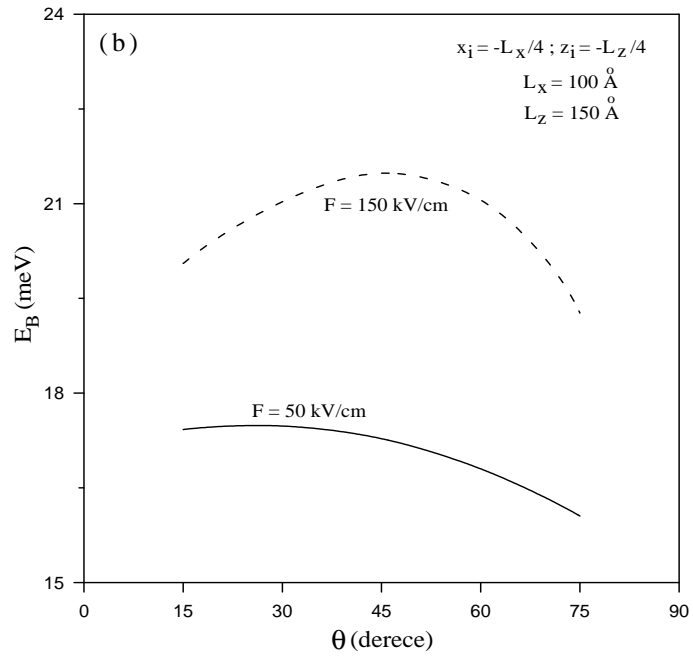
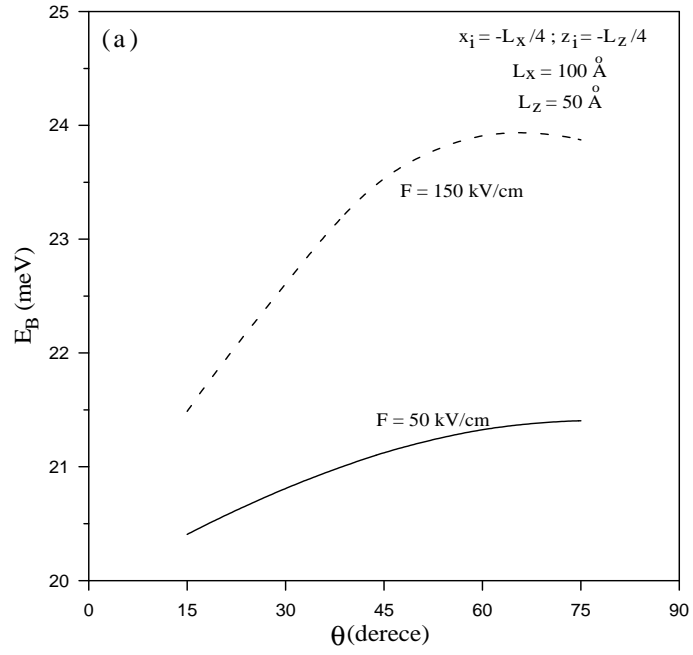


Şekil 3-14 $L_Z = 100 \text{ \AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi: (a) $L_X = 50 \text{ \AA}$ ve (b) $L_X = 150 \text{ \AA}$

Şekil 3-15 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/4$, $z_i = -L_z/4$ (A noktası) konumuna yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farkı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir.

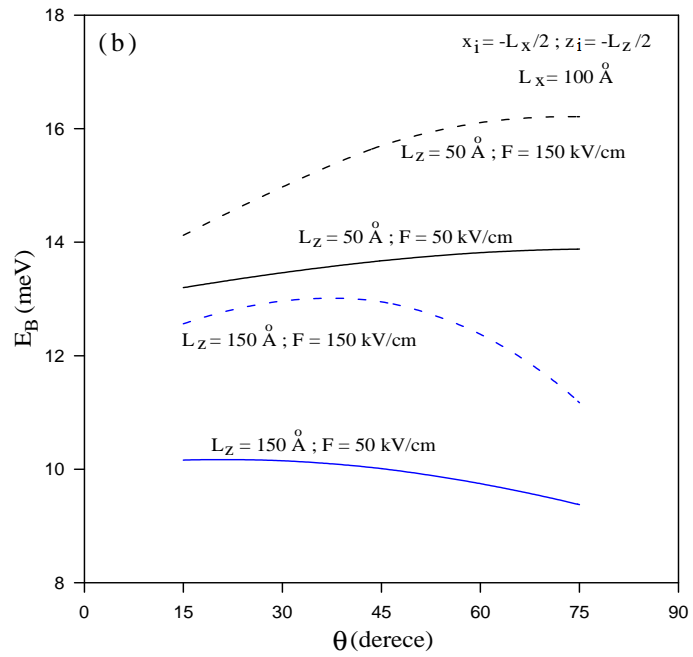
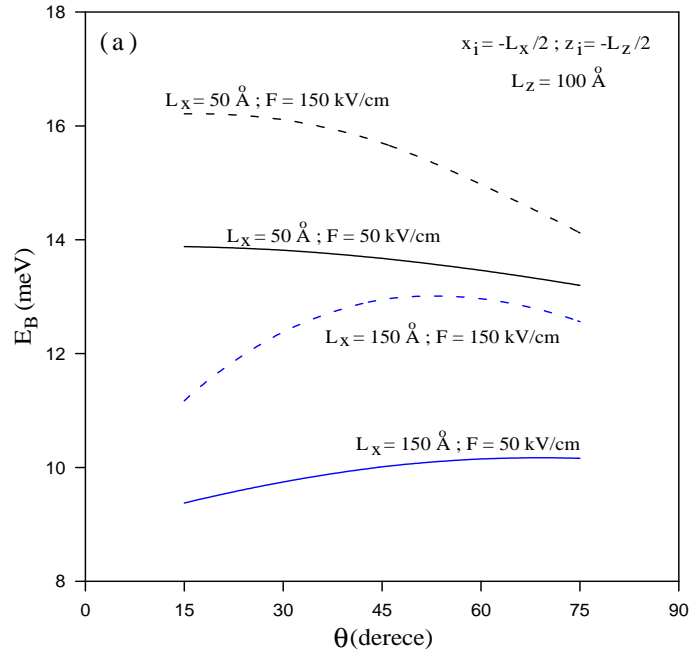
Şekil 3-15 (a) da z-doğrultusundaki kuşatma küçük olduğunda düşük elektrik alan şiddetinde bağlanma enerji eğim açısının artmasıyla artar. Elektrik alan şiddeti arttırıldığında donör safsızlık atomlarının konumu gereği bağlanma enerjisi daha büyük olur ve eğim açısına daha duyarlı hale gelir. Eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisi hızla artar.

Şekil 3-15 (b) de z-doğrultusundaki kuşatma arttırıldığında Şekil 3-15 (a) daki duruma ters özellik göstererek küçük alan değerlerinde eğim açısı arttıkça bağlanma enerjisi artar. Elektrik alan şiddeti ve eğim açısı arttırıldıkça bağlanma enerjisi artar, $\theta \cong 45^\circ$ de maksimum değere ulaşır. Daha büyük açılarda ise donör bağlanma enerjisi tekrar azalmaya başlar.



Şekil 3-15 $L_x = 100 \text{ \AA}$ için eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin A konumuna yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve eğim açısına göre değişimi: (a) $L_z = 50 \text{ \AA}$ ve (b) $L_z = 150 \text{ \AA}$

Şekil 3-16 (a) ve (b) de dikdörtgen kuantum telinin $x_i = -L_x/2$, $z_i = -L_z/2$ (B noktası) konumuna yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisinin eğim açısına göre değişimi farkı elektrik alan ve farklı tel boyutları için verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi B noktasında yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisi Şekil 3-14 ve Şekil 3-15 dekine benzer olmasına rağmen tel sınırında bulunan donör atomlarının bağlanma enerjisinin daha küçük olduğu görülür.



Şekil 3-16 Eğik elektrik alan altındaki GaAs/Ga_{0.7}Al_{0.3}As dikdörtgen kuantum telinin merkezinde yerleşen donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisinin farklı elektrik alan ve tel boyutları için eğim açısına göre değişimi: (a) $L_z = 100 \text{ \AA}$ ve $L_x = 100 \text{ \AA}$

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Kare ve dikdörtgen GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs kuantum telindeki donör safsızlık atomlarının taban durum bağlanma enerjileri üzerine eğik olarak uygulanan elektrik alan, donör safsızlık atomunun konumu ve tel boyutlarının etkisi etkin kütle yaklaşımında varyasyonel olarak incelendi.

Elde edilen sonuçlardan, bağlanma enerjisinin yapı parametrelerine, elektrik alan ve elektrik alan uygulama açısına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir.

Düşük kuşatma ve küçük elektrik alan altında donör bağlanma enerjisinin eğim açısına fazla duyarlı olmadığı gözlenirken, kuşatma ve alan şiddeti artırıldığında eğim açısının bağlanma enerjisi üzerindeki etkisinin arttığı gözlenmiştir. Kuşatma boyutu, elektrik alan ve eğim açısı değiştirilerek donör bağlanma enerjisi artırılıp azaltılabileceği görülmüştür. Bu durum kuantum tellerinin elektronik ve optik özelliklerini önemli ölçüde değiştirir, bu da uygulama alanında çok önemli sonuçlar oluşturur.

5. KAYNAKLAR

1. L. Esaki and R. Tsu “Superlattices and Negative Conductivity in Semiconductors” IBM Res. Note, (1969) RC-2414
2. R. Dingle, W. Wiegman and C. H. Henry, Phys. Rev. Lett (1974) 24, 593
3. T. Ando, A. B. Fowler and F. Stern, Rev. Mod. Phys. (1982) 54, 437
4. J.A. Brum, Solid State Commun. 54 (1985) 179.
5. J.W. Brown, H.N. Spector, Phys. Rev. B 35 (1987) 3009.
6. H. Akbas, S. Aktas, S.E. Okan, M. Ulas, M. Tomak, Phys. Status Solidi B 205 (1998) 537.
7. S.E. Okan, I. Erdogan, H. Akbas, Physica E 21 (2004) 91.
8. K. Ryczko, G. Sek, J. Misiewicz, Superlatt. Microstruct. 32 (2002) 73.
9. L. Zhang, J.J. Shi, Semicond. Sci. Technol. 20 (2005) 592.
10. I. Erdogan, O. Akankan, H. Akbas, Physica E 33 (2006) 83.
11. G.W. Bryant, Phys. Rev. B 29 (1984) 6632.
12. N. Porrás-Montenegro, J. Lo’pez-Gondar, L.E. Oliveira, Phys. Rev. B 43 (1991) 1824.
13. S. Aktas, F.K. Boz, S.S. Dalgıç, Physica E 28 (2005) 96.
14. X.T. An, J.J. Liu, J. Appl. Phys. 99 (2006) 123713.
15. A.L. Vartanian, M.A. Yeranosyan, A.A. Kirakosyan, Physica B-Condens. Matter 390 (2007) 256.
16. G. W. Bryan, Phys. Rev. B 31 (1985) 7812.
17. J. W. Brown, H. N. Spector, J. Appl. Phys. 59 (1986) 1179.
18. C. A. Duque, A. Montes, A. Morales, N.P. Montenegro, J. Phys. Condens. Matter 9 (1997) 5977.
19. A. Montes, C. A. Duque, N.P. Montenegro, J. Phys. Condens. Matter 10 (1998) 5351.
20. F.J. Betanjur, I.D. Mikhailoy, J.H. Marin, L. E. Oliveira, J. Phys. Condens. Matter 10 (1998) 7283.
21. F.J. Betanjur, I.D. Mikhailov, L. E. Oliveira, J. Phys. D. Appl. Phys. 31 (1998) 3391.

22. M. Ulas, H. Akbas, M. Tomak, *Phys. Stat. Sol. (b)* 200 (1997) 67.
23. E. Niculescu, A. Gearba, G. Cone, C. Negutu, *Superlattices Microstruct* 29 (2001) 319.
24. V. Narayani, B. Sukumar, *Solid State Commun.* 90 (1994) 575
25. A. Montes, C. A. Duque, N. Porrás-Montenegro, *J. Appl. Phys.* 81 (1997) 7890.
26. H. Zhou, Z. Y. Deng, *J. Phys. Condens. Matter* 9 (1997) 1241.
27. A. Montes, C. A. Duque, N. Porrás-Montenegro, *J Appl. Phys.* 84 (1998) 1421.
28. B. Sakumar, N. Navaneethakrishnan, *Phys. Rev. B* 41 (1990) 129111.
29. S. Aktas, S. E. Okan, H. Akbas, *Superlattices Microstruct.* 30 (2001) 129.
30. S. Aktas, F. K. Boz, S. S. Dalgıç, *Physica E* 28 (2005) 96.
31. A. Zounoubi, K. El Messaoudi, I. Zorkani, A. Jorio, *Superlattices Microstruct.* 30 (2001) 189.
32. C. A. Duque, A. Montes, A.L. Morales, *Physica B* 302 (2001) 84.
33. X. T. An, J. J Liu, *J. Appl. Phys.* 99 (2006) 123713.
34. E. Niculescu, A. Gearba, G. Cone, C. Negutu, *Superlattices Microstruct.* 29 (2001) 84.
35. Z. Xiao, J. Zhu, F. He, *Phys. Status Solidi (b)* 191 (1995) 401.
36. A. A. Avetisyan, A. P. Djotyan, E.M. Kazaryan, B. G. Poghosyan, *Phys. Status Solidi (b)* 225 (2001) 423.
37. P. Villamil, C. Cabra, N. Porrás-Montenegro, *J. Phys.: Condens. Matter* 17 (2005) 5049.

6 ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serkan KILIN
Doğum Yeri ve Yılı : Ankara–1980
Medeni Durumu : Bekâr
İş Adresi : Eski Kale Mah. Hoca İmam
Sokak No: 20
Tek Rota Fen Dershanesi
SİVAS
İş Tel : 0346–2220707
Lisans (2000–2005) : Kırıkkale Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü
Yüksek Lisans (2005–2009) : Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı