

MANYETİK ALAN ALTINDA ÇİFT KUANTUM
KUYUSUNDAKİ DONOR SAFSIZLIK ATOMLARI
ÜZERİNDE HİDROSTATİK BASINÇ VE SICAKLIK
ETKİLERİ

HARUN CANPOLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
2009

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK ALAN ALTINDA ÇİFT KUANTUM
KUYUSUNDAKİ DONOR SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDE
HİDROSTATİK BASINÇ VE SICAKLIK ETKİLERİ

HARUN CANPOLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. ESİN KASAPOĞLU

SİVAS
2009

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin SARI

Üye: Doç. Dr. Esin KASAPOĞLU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Yavuz TÜRKAY

ONAY

Bu tez çalışması, .../.../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANYETİK ALAN ALTINDA ÇİFT KUANTUM KUYUSUNDAKİ DONOR SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDE HİDROSTATİK BASINÇ VE SICAKLIK ETKİLERİ

HARUN CANPOLAT

Cumhuriyet Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

2009

Danışman: Doç. Dr. ESİN KASAPOĞLU

Bu çalışmada, büyütme doğrultusuna paralel olarak uygulanan manyetik alanın varlığındaki GaAs-Ga_{0.7}Al_{0.3}As çift kuantum kuyusundaki donör safsızlık atomlarının bağlanma enerjileri üzerine hidrostatik basınç ve sıcaklığın eş zamanlı etkileri farklı kuyu ve engel boyutları, safsızlık atomunun konumu ve manyetik alan değerleri için etkin kütle yaklaşımında varyasyon tekniği kullanılarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlar; belirli bir sıcaklık değeri için basınçtaki artış, safsızlık atomunun bağlanma enerjisini artırırken sıcaklıktaki artışın bağlanma enerjisini azalttığını, bağlanma enerjisi üzerine manyetik alan etkisinin basınç etkisinden daha fazla olduğunu gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Çift Kuantum Kuyusu, Manyetik Alan, Basınç, Sıcaklık

SUMMARY

MSc Thesis

HYDROSTATIC PRESSURE AND TEMPERATURE EFFECTS ON DONOR IMPURITIES IN DOUBLE QUANTUM WELL UNDER THE MAGNETIC FIELD

HARUN CANPOLAT

Cumhuriyet University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

2009

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. ESİN KASAPOĞLU

In this study, simultaneous effects of pressure and temperature on donor impurity binding energy in GaAs-Ga_{0.7}Al_{0.3}As double quantum well in the presence of the magnetic field which is applied along the growth direction for different well and barrier dimensions, donor impurity positions and the magnetic fields values have been studied by using a variational technique within the effective-mass approximation. The result show that an increment in temperature result in a decrement in donor impurity binding energy while an increment in the pressure for the same temperature enhances the binding energy and the pressure effects on donor binding energy are lower than those due to the magnetic fields

Keywords: Double Quantum Well, Magnetic field, Hydrostatic pressure, Temperature.

TEŐEKKÖR

Konu seçiminde ve çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. ESİN KASAPÖĐLU' na, değerli katkılarını hiçbir zaman unutmayacağım arkadaşım Arş. Gör. Ercan KILIÇARSLAN'a, bu güne gelmemde büyük emekleri olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	i
ŞEKİLLER TABLOSU	ii
1. GİRİŞ.....	1
2. KUANTUM KUYULARI.....	4
3. MANYETİK ALAN ALTINDA ÇİFT KUANTUM KUYUSUNDAKİ DONOR SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDE HİDROSTATİK BASINÇ VE SICAKLIK ETKİLERİ.....	6
3. 1 GİRİŞ.....	6
4. SONUÇ	22
KAYNAKLAR.....	23
ÖZGEÇMİŞ.....	26

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 3.1: Çift kuantum kuyusunun şematik gösterimi.....	11
Şekil 3. 2(a): Kuyu genişliği $L_W (0) = 50 \text{ \AA}$, engel genişliği $L_b (0) = 25 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi	12
Şekil 3. 2(b): Kuyu genişliği $L_W (0) = 50 \text{ \AA}$, engel genişliği $L_b (0) = 75 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi	13
Şekil 3.3(a): Dielektrik sabitinin sıcaklık basınca bağlı değişimi	15
Şekil 3.3(b): Elektronun taban durum enerjisinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi	16
Şekil 3.3(c): Etkin kütleinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi.....	17
Şekil 3.3(d): Potansiyel yüksekliğinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi	18
Şekil 3.4(a) Kuyu genişliği $L_W (0) = 100\text{\AA}$ engel genişliği $L_b (0) = 25\text{\AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi	19
Şekil 3.4(b) Kuyu genişliği $L_W (0) = 100\text{\AA}$ engel genişliği $L_b (0) = 75\text{\AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi	20

1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri metal ve yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Bu malzemelerin iletkenlikleri; sıcaklık, optik uyarılmalar ve katkılama ile büyük ölçüde değişir. Yarı iletkenlerin bu özelliği yani 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 dalga boyuna 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 elmanı olarak kullanılması, elektronik teknolojisinin 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. 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 durumlarının 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; nanoyapının 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 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 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.

2. KUANTUM KUYULARI

Heteroyapı farklı yarıiletkenlerin birbirine eklenmesi (birbiri üzerine büyütülmesi) ile oluşturulur. A ve B gibi farklı bant aralıklarına sahip olan iki yarıiletken büyütme teknikleriyle bir araya getirilirken;

i) Kullanılan yarıiletkenlerin örgü sabitleri birbirine çok yakın seçilir. Malzemeler benzer örgü yapısında seçildiği için örgü sabiti Vegard yasasına uyar. A_xB_{1-x} alaşımı için örgü sabiti;

$$a_{\text{alaşım}} = x a_A + (1 - x)a_B \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada x A yarıiletkeni için konsantrasyon, a_A ve a_B sırası ile A ve B yarıiletkenlerinin örgü sabitidir.

ii) Alaşımın band yapısını hesaplamak oldukça zordur. Çünkü alaşımı oluşturan malzemeler kusursuz bir örgüye sahip olsalar da alaşım kusursuz bir örgüye sahip değildir. Atomlar gelişigüzel yerleşmişlerdir ve periyodik değildirler. E_g^A ve E_g^B sırası ile A ve B yarıiletkenlerinin yasak enerji aralığı olmak üzere alaşımın enerji aralığı

$$E_g^{\text{alaşım}} = xE_g^A + (1 - x)E_g^B \quad (2.2)$$

eşitliğinden hesaplanır

Çoğu alaşımın özellikleri yaklaşık olarak alaşımın her bir bileşeninin kendi özelliğinin lineer ortalaması olarak verilir. Eğer alaşımın oluşma süreci iyiye, örgü sabiti ve enerji aralığı için verilen denklemler geçerlidir.

Heteroyapıyı oluşturan küçümlerin benzer yapıda olmaları, uygulamada önemli sonuçların alınmasını sağlar. Aynı zamanda bu koşul ile elektron dalga vektörünün ara yüzeyde değişmemesi de kabul edilmiş olur. Bu yöntemle heteroyapıyı oluşturan bir yarıiletkenin kristal potansiyeli ile elektronik yapısının ara yüzey düzlemine kadar değişmediği kabul edilir. Ara yüzeyde elektronik yapı

ve kristal potansiyel aniden diğerk külçenin özelliklerini sergileyecek biçimde değışir. Zaten teknolojik uygulamada önemli olan yarıiletkenlerin çoğı aynı simetri grubuna sahip olduklarından, heteroyapı için kabul edilen şartlar sağlanmış olur.

Yapı bileşenlerinin elektronik bant yapısına ve diğerk fiziksel parametrelere bağılı olarak, ara yüzeyde bant süreksizliğı meydana gelir. Bu süreksizlik, iletim ve valans bantları kenarında basamak fonksiyonu ile tanımlanır. Bu basamak yüksekliğine bant süreksizliğı (band-offset) adı verilir. Örgü sabitleri birbirine yakın yarıiletkenlerin oluşturduğu heteroyapılarda, yarıiletkenlerin temel bant aralığı direkt ise, bant süreksizliğı kuantum çukuru modeli ile temsil edilir. Yarıiletken mikroyapı uygulamalarının çoğunda basit heteroyapılar esas alınır. Uygulamada GaAs ve GaAlAs materyalleri sıkça kullanılır. Alüminyum konsantrasyonunun % 30- 35 dolayında alındığı yapılarda iletim bandındaki engel yüksekliğinin büyük olmasına karşın, alaşım direk bant özelliğini korur.

Kuantum kuyuları yarıiletken fiziğinin en önemli uygulama alanlarından biridir. İki boyutlu bir geometriye sahiptir. Elektronlar ve holler iki boyutta serbestçe hareket ederler. Üçüncü boyuttaki hareket, deneysel olarak değıştirilebilen kuyuda sınırlıdır. Çift kuantum kuyuları da fotodedektör, elektro-optik anahtarlar ve tera-Hertz osilatörleri gibi opto-elektronik cihazlara uygulanabilirliklerinden dolayı yoğun bir şekilde çalışılmıştır [2-17]. Literatürde; cihaz tasarlamada, cihazların çıkış şiddetini ayarlamak ve kontrol etmek için kullanılabilen ayarlanabilir optik özelliklerinden dolayı geleneksel çift kare kuantum kuyularının yanı sıra çift üçgen, çift parabolik, çift ters parabolik ve çift graded gibi farklı biçimli kuantum kuyuları da yoğun olarak çalışılmıştır [18 -24]. Ayrıca, elektrik ve manyetik alan gibi dış alanlar sözü edilen düşük boyutlu sitemlerin fiziksel özelliklerini anlamak için önemli bir araç olmuştur. Sistemin büyütme doğrultusuna paralel olarak uygulanan elektrik alan yük taşıyıcılarının kutuplanmasına ve kuantumlanmış enerji düzeylerinin kaymasına neden olur. Yük taşıyıcılarının enerji spektrumunda meydana gelen bu değışiklikler cihaz tasarlama ve cihazın performansını artırmada oldukça önemlidir [25].

3. MANYETİK ALAN ALTINDA ÇİFT KUANTUM KUYUSUNDAKİ DONOR SAFSIZLIK ATOMLARI ÜZERİNDE HİDROSTATİK BASINÇ VE SICAKLIK ETKİLERİ

3.1 GİRİŞ

Bir yarıiletkenin en önemli karakteristiği bant yapısıdır. Elektrik alan, manyetik alan veya hidrostatik basınç gibi dış pertürbasyonlar hem külçe hemde düşük boyutlu heteroyapıların elektronik ve optik özelliklerini belirgin ölçüde değiştirir. Örneğin; hem tek hem de çift GaAs/GaAlAs kuantum kuyularındaki donör safsızlık atomuna ait soğurma spektrumunda yarıiletkenin bant aralığının basınca bağlı olarak kırmızıya, sıcaklığa bağlı olarak ta maviye kaydığı gözlenmiştir [26]. Bu nedenle hidrostatik basıncın düşük boyutlu yarıiletkenlerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi teorik ve deneysel olarak yoğun bir şekilde çalışılmıştır [27-32]. Yapılan çalışmalar hidrostatik basıncın tek, simetrik ve asimetrik çift kuantum kuyularındaki donör safsızlık atomlarının bağlanma enerjisini artırdığını, göstermiştir [33-36].

Bu çalışma'da, şematik gösterimi Şekil 3.1 de verilen GaAs / Ga_{0.7}Al_{0.3}As çift kuantum kuyusundaki donör safsızlık atomlarının taban durum bağlanma enerjileri üzerinde hidrostatik basınç ve sıcaklığın eşzamanlı etkileri, büyütme doğrultusuna (z-yönü) paralel olarak uygulanan manyetik alana, kuyu ve engel genişliklerine bağlılığı etkin kütle yaklaşımının da varyasyonel olarak hesaplandı.

Etkin kütle yaklaşımında, sistemin basınç ve sıcaklığa bağlı Hamiltonian'ı

$$H = -\frac{1}{2m_e(P,T)} \left(\vec{p}_e + \frac{e}{c} \vec{A}(\vec{r}) \right)^2 + V(z,P,T) - \frac{e^2}{\epsilon(P,T)\vec{r}} \quad (3.1)$$

ile verilir. Burada P (kbar) hidrostatik basınç, T(K) sıcaklık, \vec{p}_e elektron momentumu, e elektronun yükü, V(z,P,T) elektron için z-doğrultusundaki basınç

ve sıcaklığa bağlı kuşatma potansiyeli, $m_e^*(P, T)$ elektronun basınç ve sıcaklığa bağlı etkin kütlesi,

\vec{r} elektron ve safsızlık atomu arasındaki uzaklık ($r = \sqrt{\rho^2 + (z - z_i)^2}$),
 $\rho (= \sqrt{x^2 + y^2})$ (x-y) düzleminde elektron ve safsızlık atomu arasındaki uzaklık,

$\epsilon(P, T)$ basınç ve sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti ve $\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{2}(\vec{B} \times \vec{r})$ vektör potansiyelidir. Manyetik alan büyütmeye doğrultusuna (z doğrultusuna) paralel olarak uygulanmıştır, yani $\vec{B} = (0, 0, B_0)$. Uygulanan manyetik alanı tanımlamak için vektör potansiyeli $\vec{A} = (-\frac{B}{2}y, \frac{B}{2}x, 0)$ biçiminde seçilmiştir. Dielektrik sabiti ve elektronun etkin kütlesinin kuyu ve engeldeki farklılıkları özellikle GaAs/GaAlAs kuantum kuyularının küçük boyutlarında önemlidir. Bu nedenle çalışmamızda bu farklılıklar göz önünde bulundurulmamıştır.

Elektron için basınç ve sıcaklığa bağlı etkin kütlesi [37,38]

$$m_e(P, T) = \frac{m_0}{1 + E_p^\Gamma \left[\frac{2}{E_g^\Gamma(P, T)} + \frac{1}{E_g^\Gamma(P, T) + \Delta_0} \right]} \quad (3.2)$$

ile verilir. Burada m_0 serbest elektronun kütlesi, $E_p^\Gamma = 7.51$ eV, $\Delta_0 = 0.341$ eV and $E_g^\Gamma(P, T)$, GaAs kuantum kuyusunun Γ - noktasındaki basınç ve sıcaklığa bağlı enerji aralığıdır [37] ve $E_g^\Gamma(0, T) = 1.519 - (5.405 \times 10^{-4} T^2) / (T + 204)$ eV olmak üzere aşağıdaki gibi verilir

$$E_g^\Gamma(P, T) = E_g^\Gamma(0, T) + 1.26 \times 10^{-2} P - 3.77 \times 10^{-5} P^2. \quad (3.3)$$

Basınç ve sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti [26]

$$\varepsilon(P, T) = \begin{cases} 12.74 \exp[-1.73 \times 10^{-3} P] \exp[9.4 \times 10^{-5} (T - 75.6)] & \text{for } T < 200\text{K} \\ 13.18 \exp[-1.73 \times 10^{-3} P] \exp[20.4 \times 10^{-5} (T - 300)] & \text{for } T \geq 200\text{K} \end{cases} \quad (3.4)$$

biçiminde olup hem kuyu hem de engel için eşit alınmıştır. Kuşatma potansiyelinin fonksiyonel formu

$$V(z, P, T) = \begin{cases} V(P, T) & z < -b \\ 0 & -b < z < -a \\ V(P, T) & -a < z < a \\ 0 & a < z < b \\ V(P, T) & z > b \end{cases} \quad (3.5)$$

İle verilir, a ve b Şekil 3. 1 de tanımlandığı gibidir. $S_{11} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$ ve $S_{12} = -3.7 \times 10^{-4} \text{ kbar}^{-1}$, GaAs kuantum kuyusunun esneklik sabitleri, $L(0)$ ve $L_b(0)$ basınç yok iken kuyu ve engel genişlikleri olmak üzere kuyu ve engel genişliklerinin basınç bağımlılığı [39-41]

$$L_w(P) = L_w(0)[1 - (S_{11} + 2S_{12})P] \quad (3.6 a)$$

$$L_b(P) = L_b(0)[1 - (S_{11} + 2S_{12})P] \quad (3.6 b)$$

eşitlikleri ile, engel yüksekliği ise,

$$V(P, T) = Q_c \Delta E_g^\Gamma(x, P, T) \quad (3.7)$$

ile verilir, burada $Q_c (= 0.6)$ iletkenlik bant süreksizliği, $(x=0.3)$ $Ga_{1-x}Al_xAs$ tabakasındaki alüminyum mol kesri, $\Delta E_g^\Gamma(x, P, T)$ ise Γ -noktasındaki kuyu ve engel arasındaki enerji farkı olup, basınç ve sıcaklığa bağlı değeri[38] aşağıdaki gibidir.

$$\Delta E_g^\Gamma(x, P, T) = \Delta E_g^\Gamma(x) + D(x)P + G(x)T \quad (3.8)$$

burada $\Delta E_g^\Gamma(x) = (1.155x + 0.37x^2)$ eV, $D(x) = [-(1.3 \times 10^{-3})x]$ eV/kbar ve $G(x) = [(-1.11 \times 10^{-4})x]$ eV/K biçimindedir.

Momentum operatörü ve vektör potansiyelinin değeri Denklem (3.1)'de yerine yazılırsa sistemin Hamiltonian'ı

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*(P, T)} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] + \frac{e^2 B_0^2 (x^2 + y^2)}{8m_e^*(P, T)c^2} \quad (3.9)$$

$$+ \frac{e\hbar B_0 L_z}{2m_e^*(P, T)c} + V(z, P, T) - \frac{e^2}{\mathcal{E}(P, T) \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}$$

şeklinde elde edilir.

Burada L_z , açısal momentum operatörünün $\hbar = 1$ birimindeki z bileşenidir,

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos\phi \\ y &= \rho \sin\phi \\ z &= z \end{aligned} \quad (3.10)$$

dönüşümü yapılarak silindirik koordinatlardaki Hamiltonian

$$\begin{aligned}
H = & -\frac{\hbar^2}{2 m_e^*(P, T)} \left[\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] - \frac{\hbar^2}{2 m_e^*(P, T)} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\
& + V(z, P, T) + \frac{e^2 B_0^2 \rho^2}{8 m_e^*(P, T) c^2} + \frac{e \hbar B_0 L_z}{2 m_e^*(P, T) c} - \frac{e^2}{\mathcal{E}(P, T) \sqrt{\rho^2 + (z - z_i)^2}}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

şeklinde elde edilir. Elektron-safsızlık atomu için Schrödinger denklemi

$$H\psi(z, \rho, \alpha, \beta) = E\psi(z, \rho, \alpha, \beta) \tag{3.12}$$

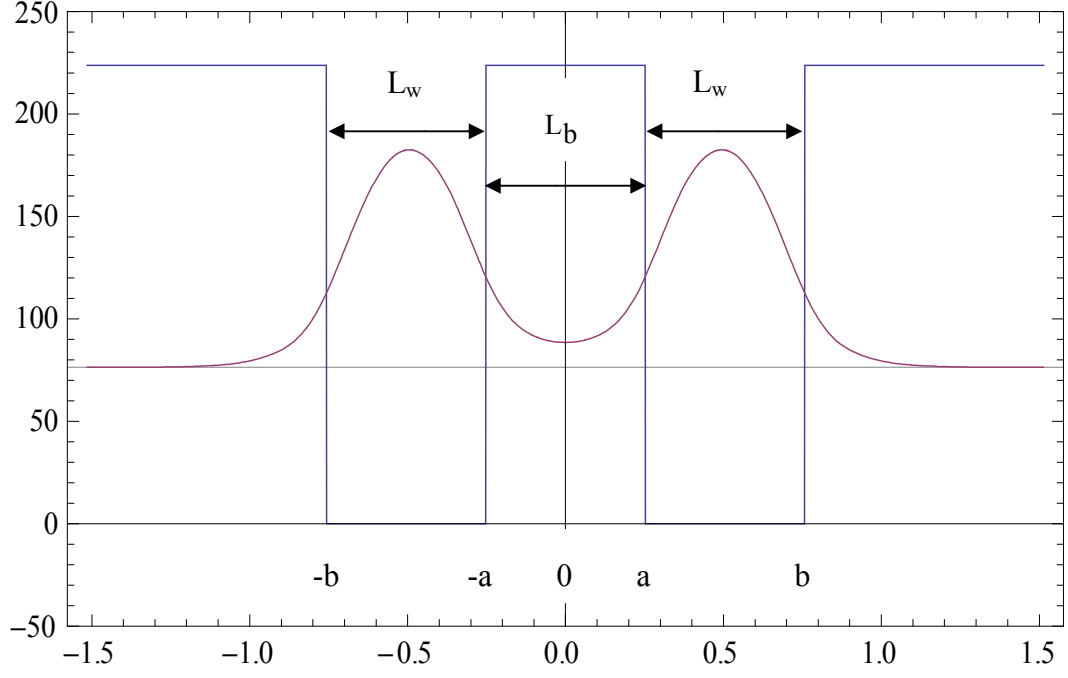
biçimindedir ve hesaplamalarımızda kullandığımız deneme dalga fonksiyonu, N normalizasyon sabiti λ ve β varyasyon parametreleri olmak üzere çift kuantum kuyusunun taban durum dalga fonksiyonu ile Coulomb potansiyelindeki üç-boyutlu dalga fonksiyonunun çarpımı biçiminde olup [42], aşağıdaki gibidir.

$$\psi(z, \rho, \alpha, \beta) = N \exp\left[-\sqrt{\frac{\rho^2}{\lambda^2} + \frac{(z - z_i)^2}{\beta^2}}\right] \psi(z) \tag{3.13}$$

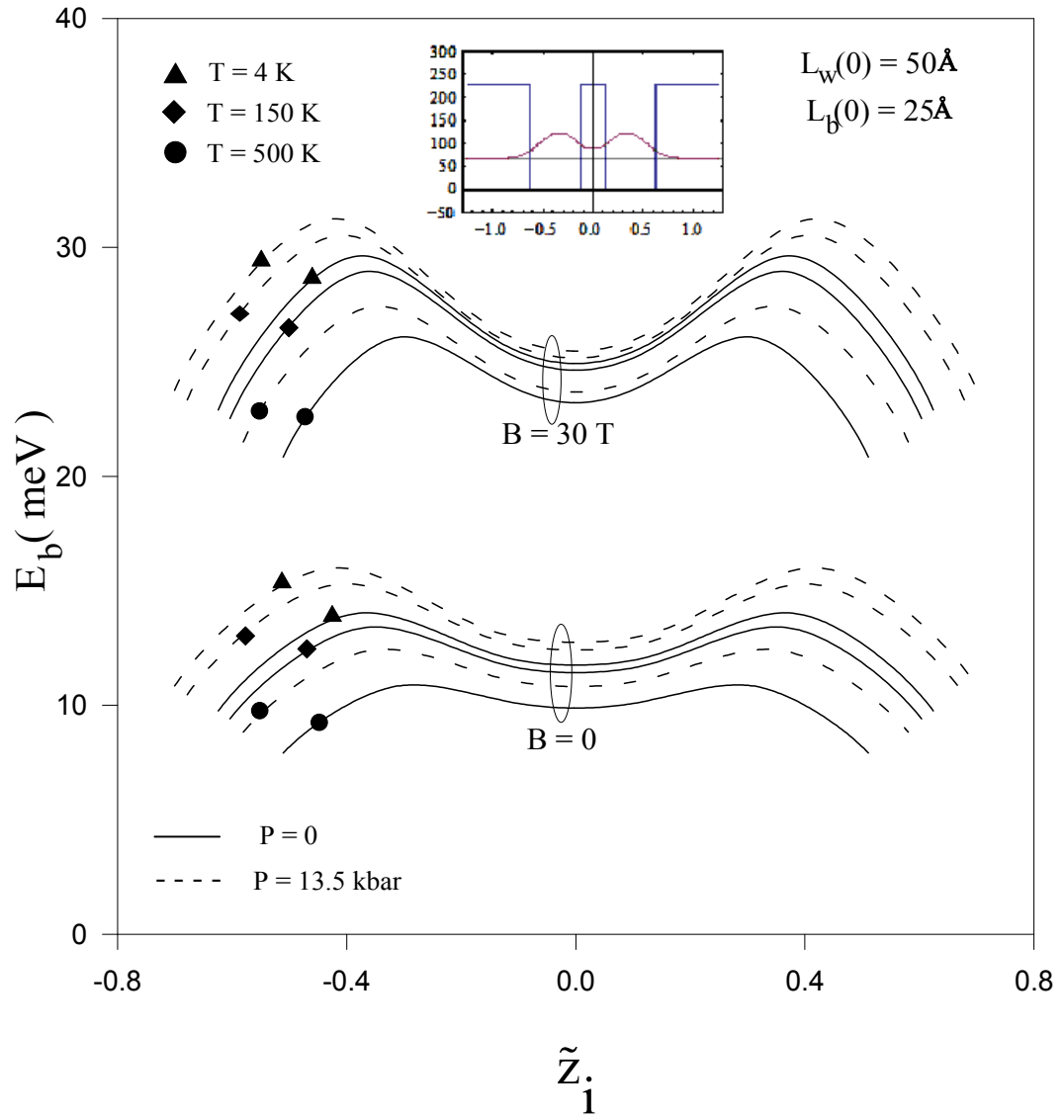
Donor safsızlık atomunun taban durum enerjisi Denklem (3.11) deki Hamiltonian'ın beklenen değerini minimum yapan λ ve β varyasyon parametrelerine göre belirlenir ve donör safsızlık atomunun taban durum bağlanma enerjisi, $E_z(P, T)$ elektronun taban durum enerjisi olmak üzere

$$E_b(P, T) = E_z(P, T) + \gamma - \min_{\lambda, \beta} \langle \Psi | H | \Psi \rangle \tag{3.14}$$

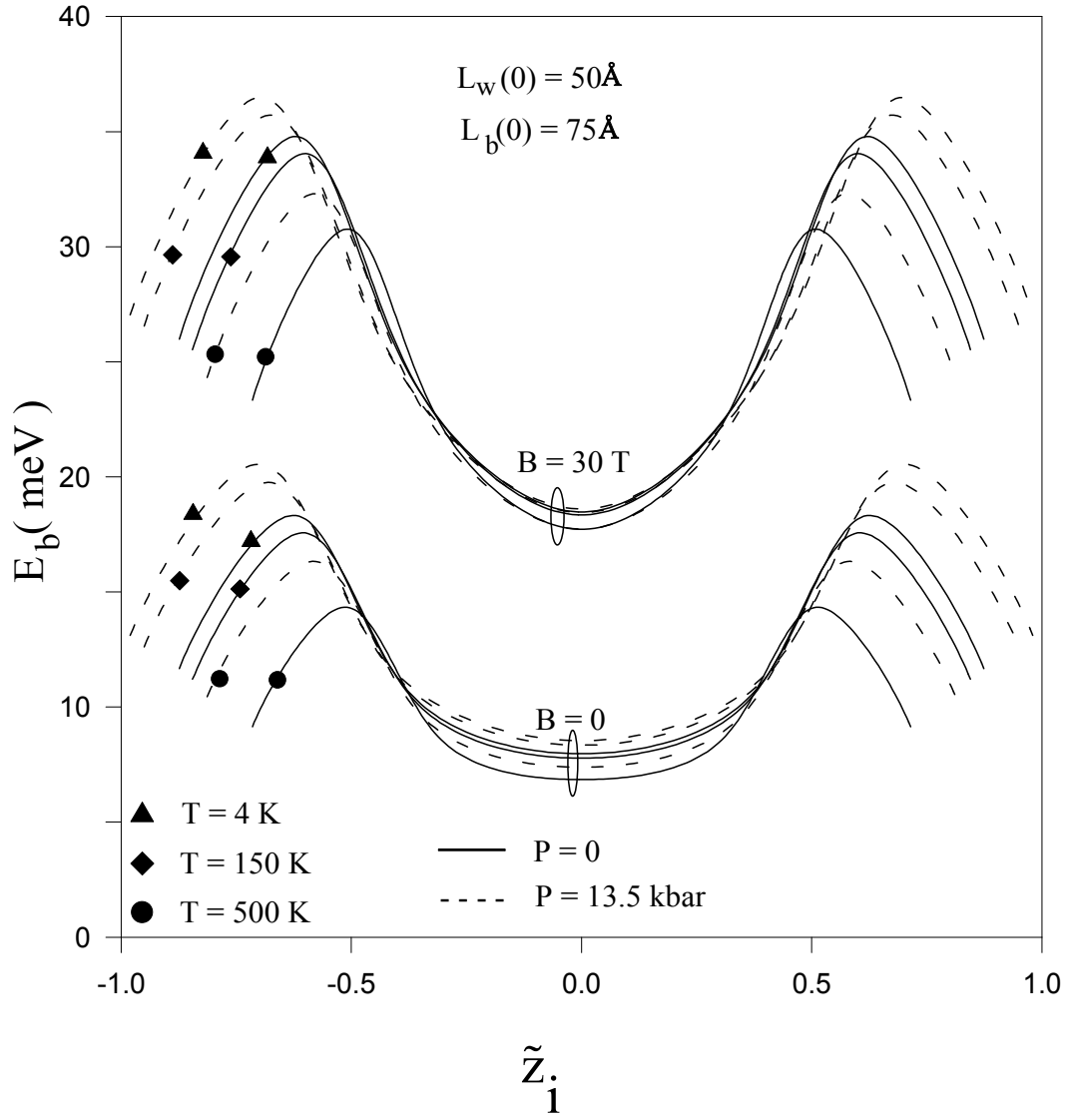
eşitliğinden hesaplanır. Burada $\gamma = \frac{e \hbar B_0}{2 m_e^* c}$ ile verilir ve birinci Landau düzeyi olarak adlandırılır.



Şekil 3.1: Çift kuantum kuyusunun şematik gösterimi



Şekil 3. 2(a): Kuyu genişliği $L_w(0) = 50 \text{ \AA}$, engel genişliği $L_b(0) = 25 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi



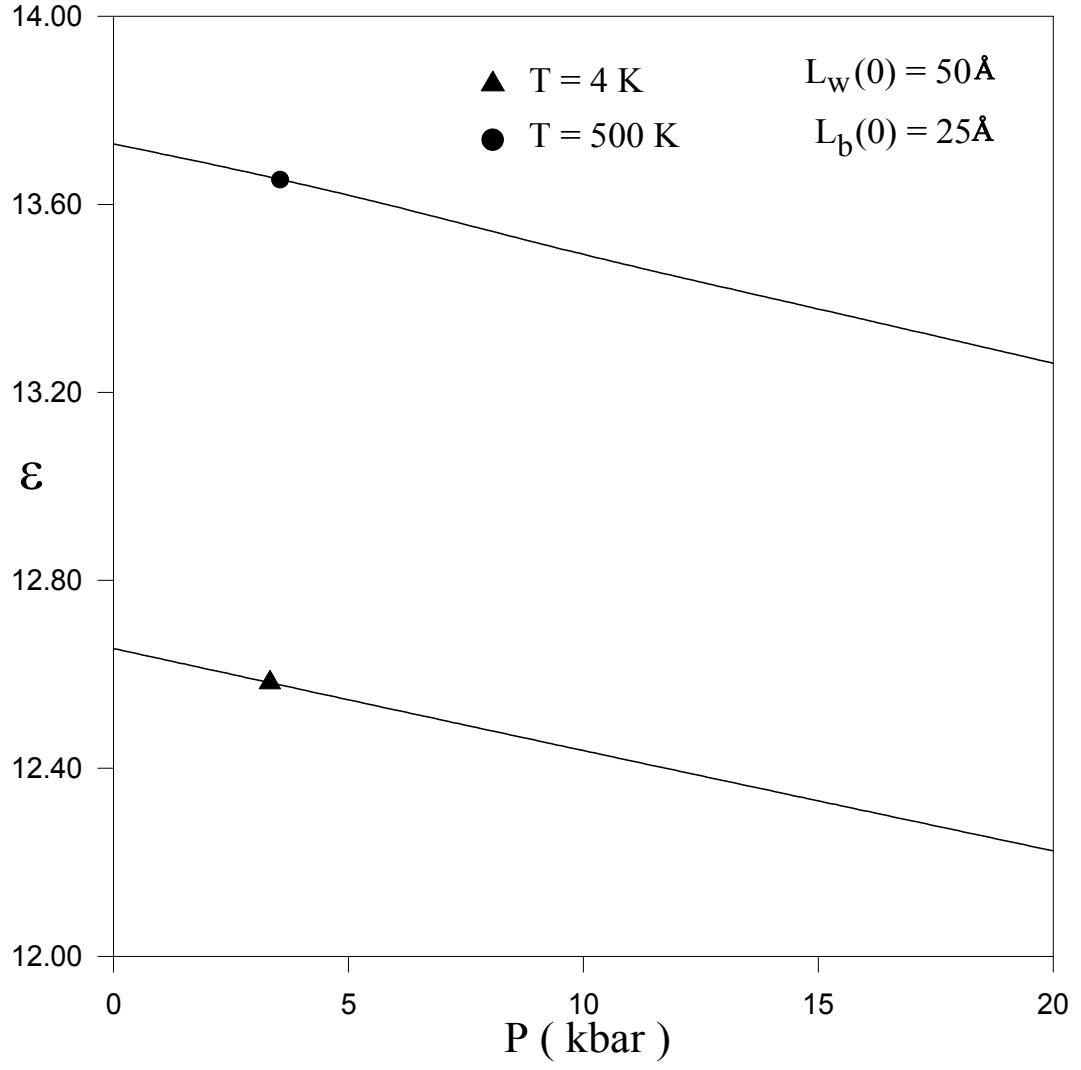
Şekil 3. 2(b): Kuyu genişliği $L_w(0) = 50 \text{ \AA}$, engel genişliği $L_b(0) = 75 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi

Kuyu genişliği 50\AA , engel genişlikleri sırasıyla 25\AA ve 75\AA olan çift kuantum kuyusundaki safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi Şekil 3.2(a) ve 3.2(b) de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisinin donör atomunun konumuna göre değişimi, elektronun taban durum dalga fonksiyonunun uzaysal dağılımı ile birebir örtüşmektedir (küçük şekil). Elektronun kuyularda bulunma olasılığı engelde bulunma olasılığından daha büyük olduğu için kuyu merkezlerinde yerleşen donör atomlarının bağlanma enerjisi engel merkezinde yerleşen donör atomunkinden daha büyüktür. Engel genişliği arttıkça kuyular arasındaki çiftlenim azalır, elektronun kuyularda bulunma olasılığı artar ve bu nedenle engel merkezinde yerleşen donör atomu için bağlanma enerjisi azalırken kuyuların merkezindeki donör atomları için artar.

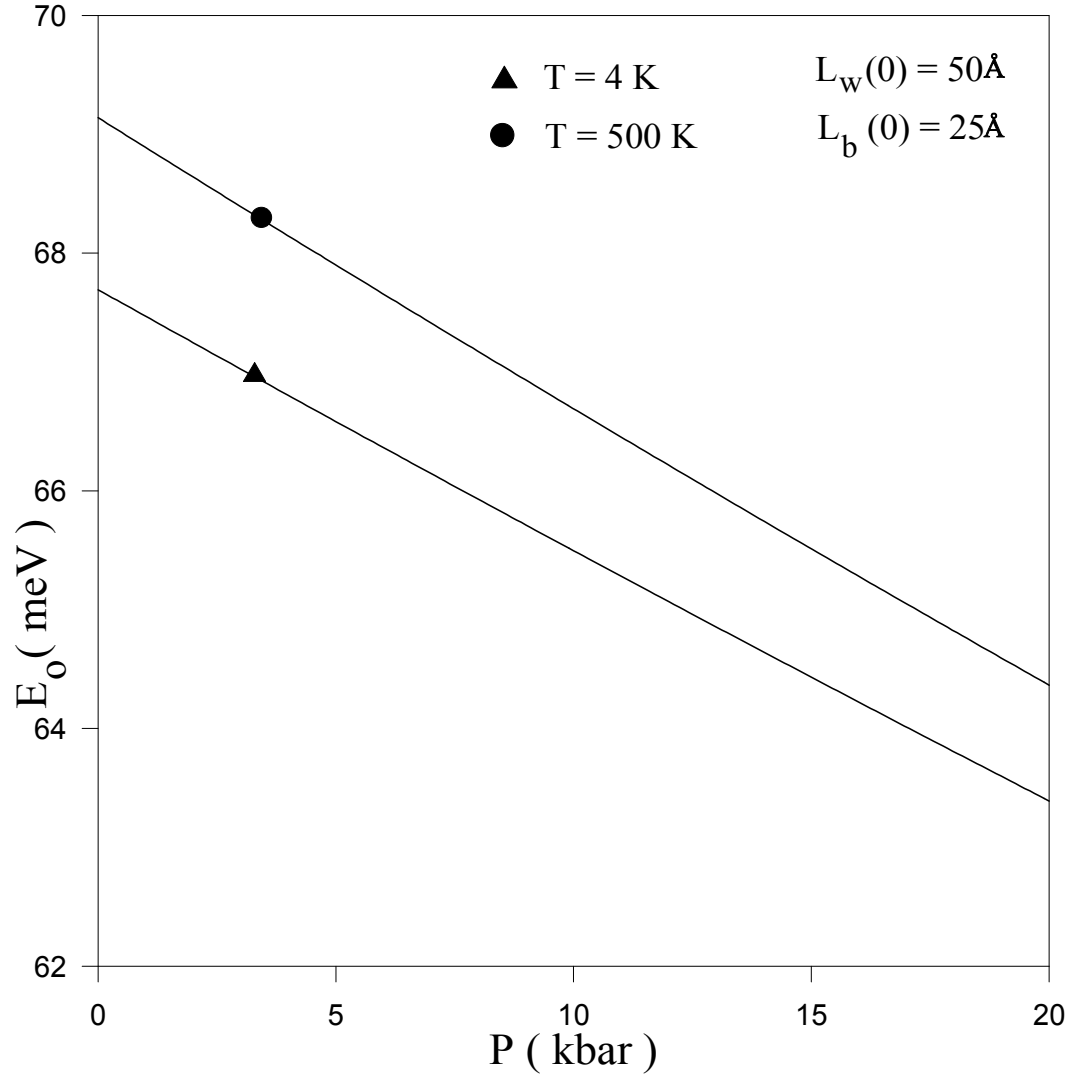
Hidrostatik basınç arttıkça; dielektrik sabiti, potansiyel yüksekliği elektronun taban durum enerjisi, kuyu ve engel genişlikleri azalır, etkin kütle değeri artar. Bu durum elektronun z-doğrultusunda daha fazla kuşatılmasına neden olur ve tüm kuyu boyutları ve donör konumları için bağlanma enerjisi artar.

Sıcaklık arttıkça; dielektrik sabiti ve elektronun taban durum enerjisi artarken elektronun etkin kütlesi ve potansiyel yüksekliği azalır. Sıcaklık ve basıncın sözü edilen bu parametreler üzerindeki etkileri Şekil 3.3'de verilmiştir. Bu nedenle tüm kuyu boyutları ve donör konumları için bağlanma enerjisi sıcaklıkla azalır.

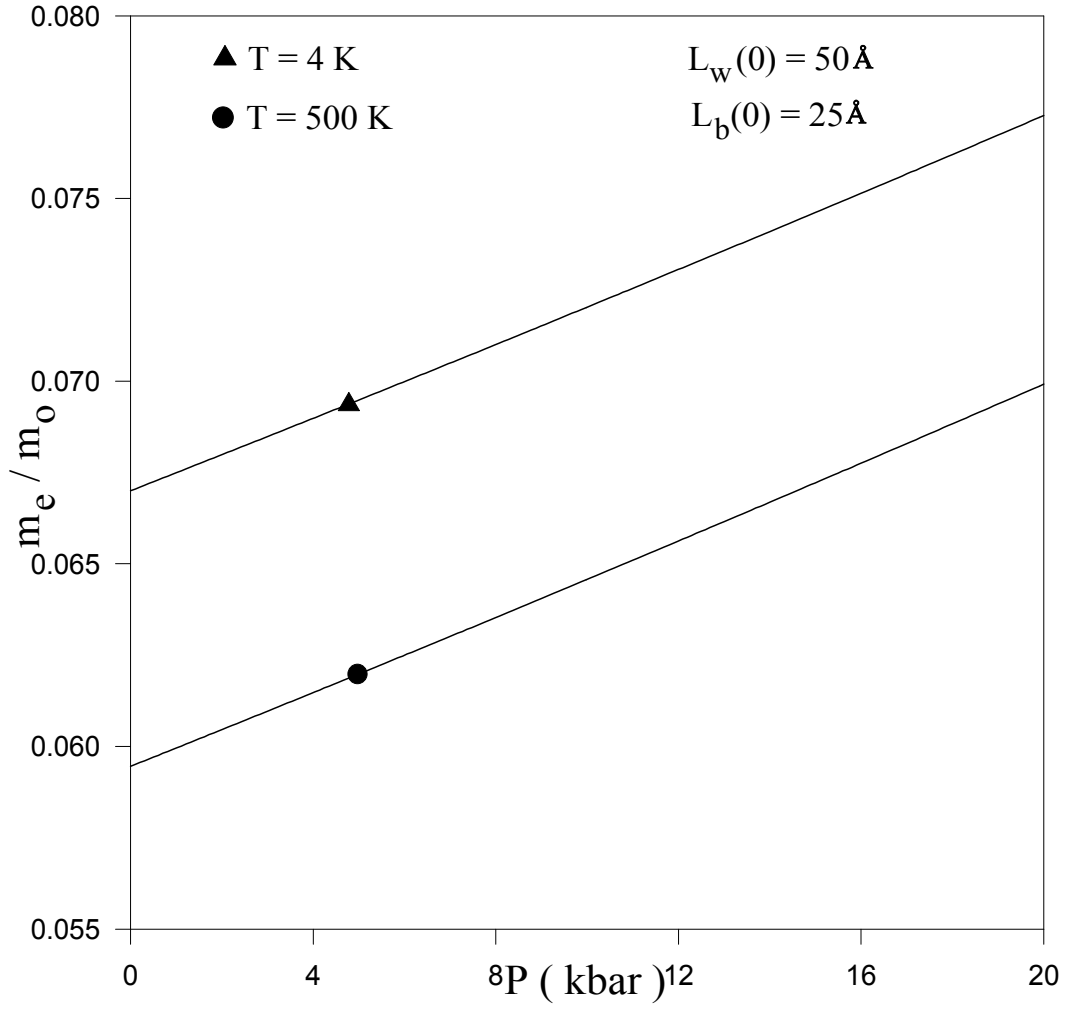
Ayrıca Şekil 3.2(a) ve 3.2(b) de, kuyu parametreleri sıcaklık, basınç ve donör atomunun konumu ne olursa olsun, manyetik alan arttıkça donör bağlanma enerjisinin arttığı görülür. Bunun nedeni, manyetik alan donör atomu ve elektronun (x-y) düzlemindeki kuşatılmasını ve elektron ile donör atomunun aynı düzlemde bulunma olasılığını artırır. Bu nedenle manyetik alan arttıkça bağlanma enerjisi artar. Bağlanma enerjisinde manyetik alandan dolayı meydana gelen artış, hidrostatik basınca bağlı artıştan daha büyüktür.



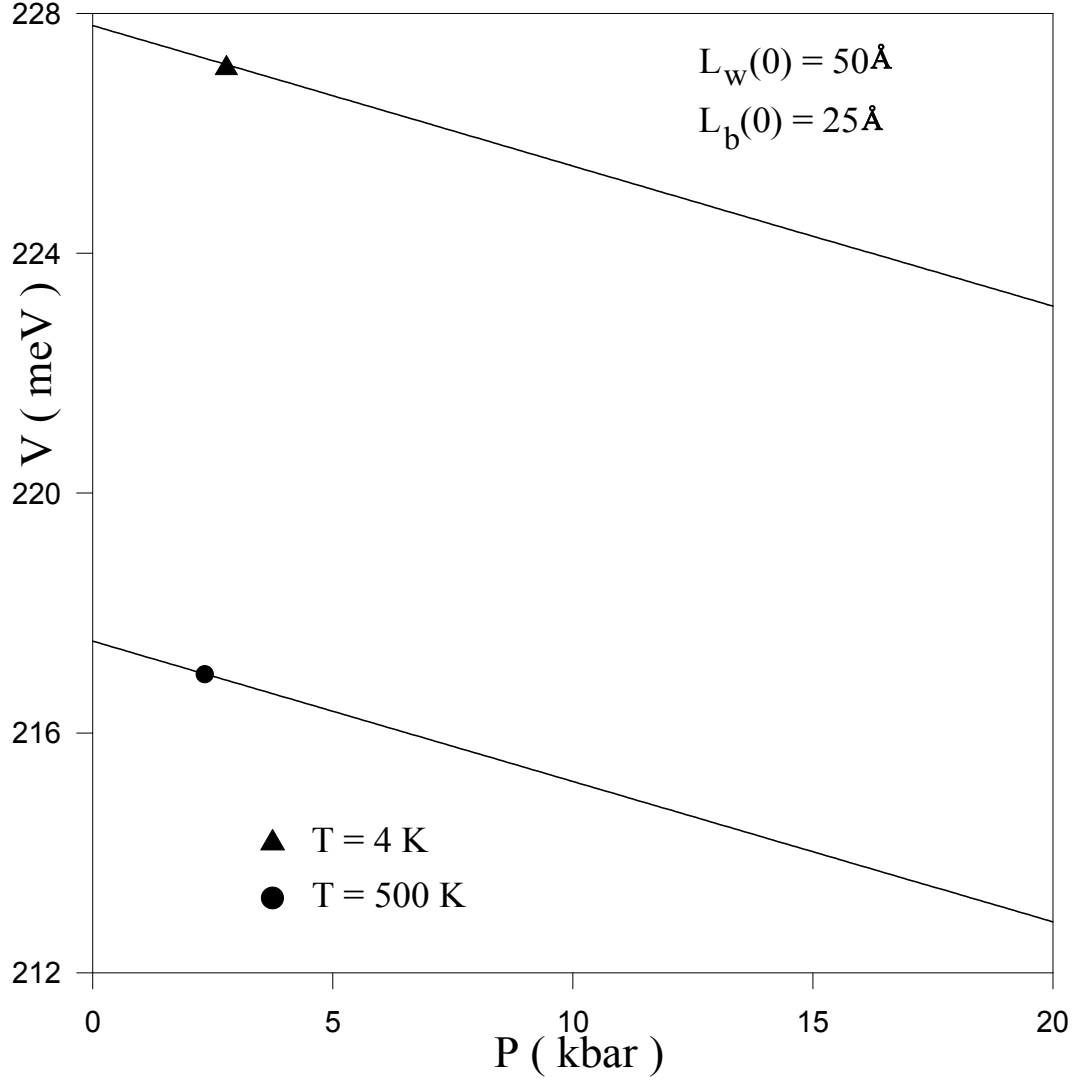
Şekil 3.3(a): Dielektrik sabitinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi



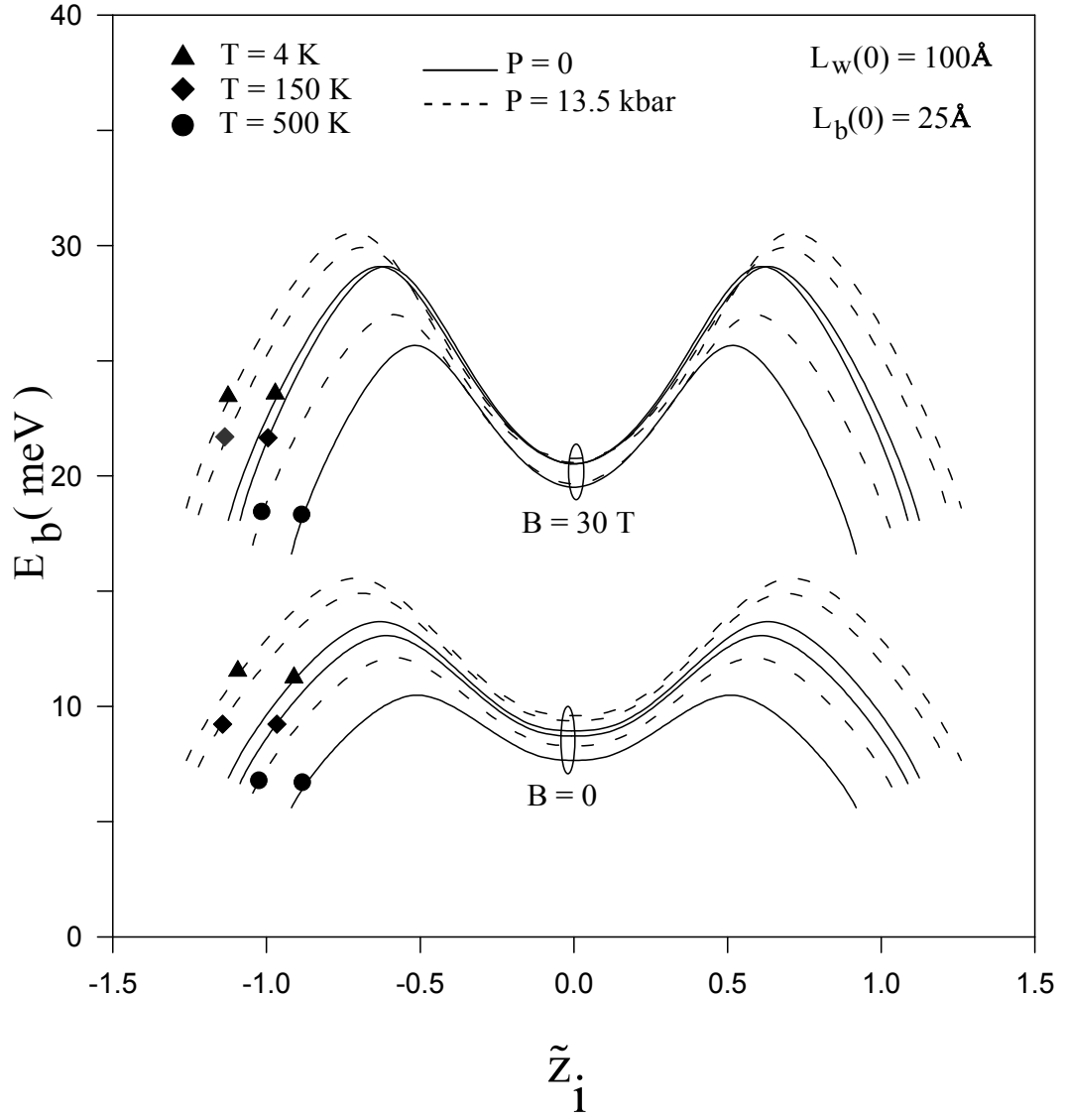
Şekil 2.3(b): Elektronun taban durum enerjisinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi



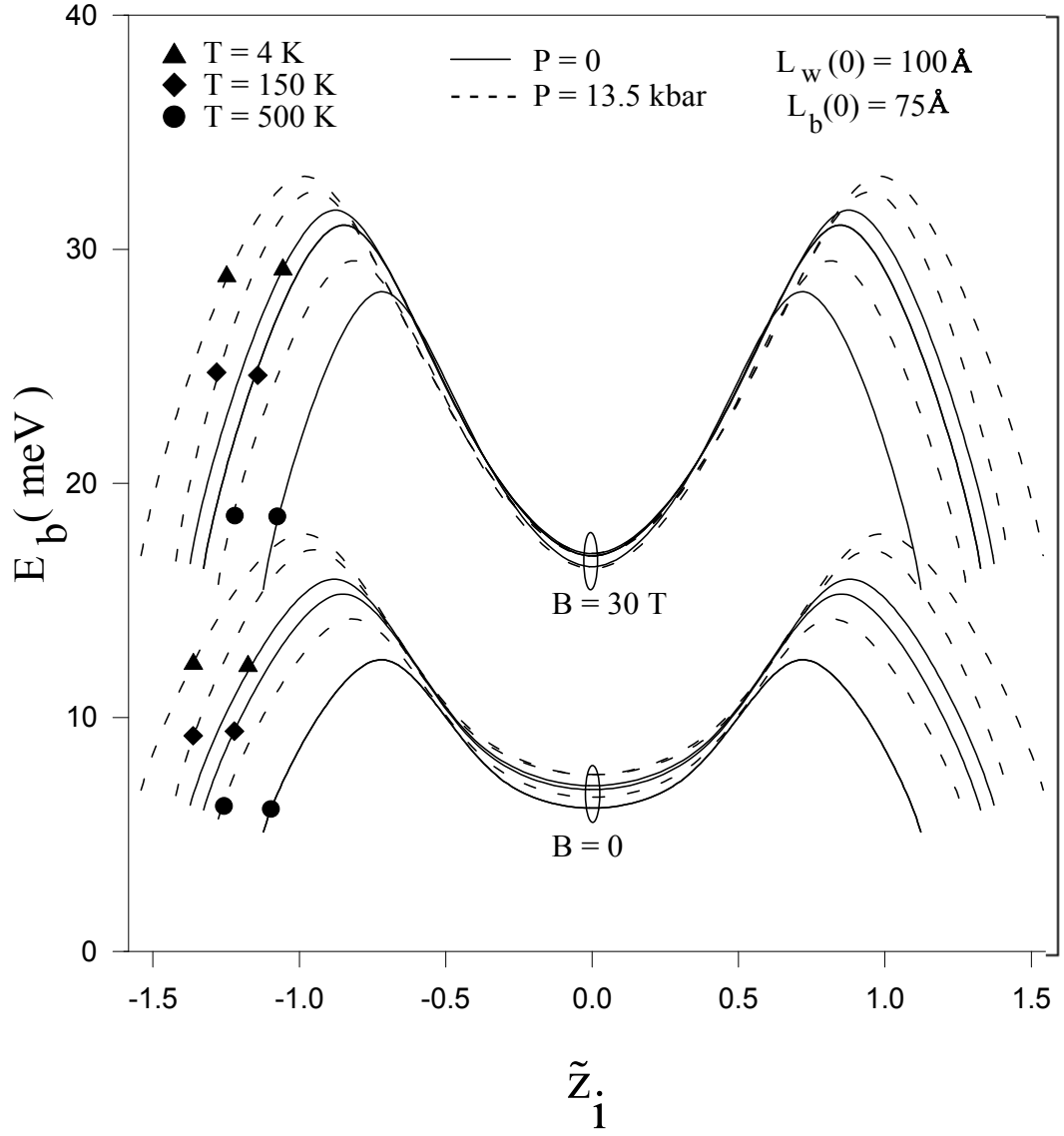
Şekil 3.3(c): Etkin kütleinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi



Şekil 3.3(d): Potansiyel yüksekliğinin sıcaklık ve basınca bağlı değişimi



Şekil 3.4(a) Kuyu genişliği $L_w(0) = 100 \text{ \AA}$ engel genişliği $L_b(0) = 25 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi



Şekil 3.4(b) Kuyu genişliği $L_w(0) = 100 \text{ \AA}$ engel genişliği $L_b(0) = 75 \text{ \AA}$ olan çift kuantum kuyusundaki donör atomunun bağlanma enerjisinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi

Şekil 3.4(a) ve 3.4(b) de, kuyu genişliği 100\AA , engel genişlikleri sırasıyla 25\AA ve 75\AA olan çift kuantum kuyusundaki donör safsızlık atomlarının bağlanma enerjilerinin farklı sıcaklık, basınç ve manyetik alan değerleri için normalize donör atomunun konumuna göre değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, kuyu genişliğinin artmasına bağlı olarak elektron ve donör safsızlık atomunun aynı düzlemde bulunma olasılıkları azalır ve buna bağlı olarak donör safsızlık atomunun bağlanma enerjisi Şekil 3.2(a) ve 3.2(b) dekinden daha düşüktür.

4. SONUÇ

Bu çalışma'da, GaAs / Ga_{0.7}Al_{0.3}As çift kuantum kuyusundaki donör safsızlık atomlarının taban durum bağlanma enerjileri üzerinde hidrostatik basınç ve sıcaklığın eşzamanlı etkileri, büyütme doğrultusuna (z-yönü) paralel olarak uygulanan manyetik alana, donör safsızlık atomunun konumuna, kuyu ve engel genişliklerine bağlılığı incelendi. Elde edilen sonuçlar:

- i) Hidrostatik basınç arttıkça dielektrik sabiti, potansiyel yüksekliği elektronun taban durum enerjisi, kuyu ve engel genişlikleri azaldı, etkin kütle değeri arttı. Bu durum elektronun z-doğrultusunda daha fazla kuşatılmasına neden oldu ve tüm kuyu boyutları ve donör konumları için bağlanma enerjisi arttı.
- ii) Sıcaklık arttıkça; dielektrik sabiti ve elektronun taban durum enerjisi artarken elektronun etkin kütlesi ve potansiyel yüksekliği azaldı. Bu nedenle tüm kuyu boyutları ve donör konumları için bağlanma enerjisi sıcaklıkla azaldı.
- iii) z-doğrultusunda uygulanan manyetik alan safsızlık atomunun bağlanma enerjisini artırdı.

Bu sonuçlar bu konuda daha önce yapılan çalışmalarla [42,43] oldukça uyumludur.

KAYNAKLAR

- [1] L. Esaki and R. Tsu (1969) ‘Superlattices and Negative Conductivity in Semiconductors’ IBM Res. Note, RC-2414
- [2]. B.F. Levine, (1993) J. Appl. Phys. 74, R1
- [3] T. Fromherz, (1997) Phys. Rev. B 56, 4772.
- [4] G. Gumbs, D. Huang and D.N. (1996) Talwar, Phys. Rev. B 53, 15436.
- [5] P.F. Yuh and K.L. Wang, (1988) Phys. Rev. B 38, 8377.
- [6] W.P. Shen and M.L. Rustgi, (1993) J. Appl. Phys. 74, 4006
- [7] N. Vodjdani et al., (1991) Appl. Phys. Lett. 59, 555.
- [8] H.G. Roskos et al. (1992), Phys. Rev. Lett. 68, 2216.
- [9] S.L. Chuang et al. (1992), Phys. Rev. Lett. 68, 102.
- [10] X. Zhu et al. (1995), Phys. Rev. Lett. 74, 1633.
- [11] J. Fernandez-Rossier and C. Tejedor, (1997) Phys. Rev. Lett. 78, 4089.
- [12] L.V. Butov et al. (1994), Phys. Rev. Lett. 73, 304
- [13] V.V. Krivolapchuk et al., Fiz. Tverd. Tela. 40 (1998), 803 (Physics of the Solid State 40 (1998) 737).
- [14] V. Negoita, D.W. Snoke and K. Eberl, (1999) Phys. Rev. B 60, 2661
- [15] L.N. Pandey and T.F. George, J. (1991) Appl. Phys. 69 (1991), 2711
- [16] C. Juang, (1990) Phys. Rev. B 44, 10706.
- [17] H. Cruz and J.G. Muga, J. (1992) Appl. Phys. 72, 5750.
- [18] S.E. Okan, Ş. Aktaş, H. Akbaş and M. Tomak, (1999) Phys. Status Solidi (b) 212, 263.
- [19] E. Kasapoglu, H. Sari and I. Sökmen, (2005) Physica B 362, 56 (Erratum: (2005) Physica B 369, 304).
- [20] E. Kasapoglu and I. Sökmen, (2004) Phys. Status Solidi (b) 241, 1066 (Erratum (2005) Phys. Status Solidi (b) 242, 2976).

- [21] S. Baskoutas and A.F. Terzis, (2008) *Physica E* 40, 1367
- [22] E. Kasapoglu and I. Sokmen, (2007) *Phys. Lett. A* 372, 56
- [23] E. Kasapoglu, H. Sari and I. Sokmen, (2007) *Physica B* 390, 216.
- [24] E. Kasapoglu, H. Sari and I. Sokmen, (2007) *Physica B* 392, 213.
- [25] C.A. Duque, A. Montes, A.L. Morales and N. Porrás-Montenegro, *J. Phys. Condens. Matter* 9, 5977.
- [26] H. Odhiambo Oyoko, N. Porrás-Montenegro, S. Y. Lopez, C. A. Duque, (1997) *Phys. stat. sol.(c)*, 298 (2007).
- [27] A. M. Elasby, (1993) *Phys. Scr.* 48, 376.
- [28] P. Lefebvre, B. Gill, H. Mathieu, (1987) *Phys. Rev. B* 35, 5630.
- [29] A. Neethiulagarajan, S. Balasubramanian, (1993) *Phys. Rev. B* 48, 9114.
- [30] J. H. Burnett, H. M. Cheong, W. Paul, E. S. Koteles, B. Elman, (1993) *Phys. Rev. B* 47, 1991.
- [31] J. Zhang, H. Zang, J. Chen, Y. Deng, C. Hu, L. An, F. Yang, G. H. Li, H Zheng (2002) *J. Phys.: Condens. Matter* 14, 5349.
- [32] S. Satphaty, M. Chandrasekhar, H. R. Chandrasekhar, U. Venkateswaran, (1991) *Phys. Rev. B* 44, 11339.
- [33] A. M. Elabsy, (1994) *J. Phys.: Condens. Matter* 6, 10025.
- [34] L. E. Oliveira and R. Perez-Alvarez, (1989) *Phys. Rev. B* 40, 10460.
- [35] J. Wu et al. (2001) *Phys. Rev. B* 64, 085320.
- [36] P. J. Klair et al. (2001) *phys. stat. sol. (b)* 223, 163.
- [37] H. J. Ehrenreich, (1961) *J. Appl. Phys.* 32, 2155.
- [38] B. Welber, M. Cardona, C. K. Kim, S. Rodriguez, (1975) *Phys. Rev. B* 12, 5729
- [39] A. M. Bouchard and M. Laban, (1993) *Phys. Rev. B* 47, 6815.

- [40] A. Hernandez-Cabrera, and A. Ramos, (1996) *J. Appl. Phys.* 80, 1547.
- [41] S. R. Parihar, S. A. Lyon, M. Santos, and M. Shayegan, (1989) *Appl. Phys. Lett.* 55, 2417.
- [42] E. Kasapoglu, *Physics Lett. A* 373 (2008) 140.
- [43] A. John Peter, K. Navaneethakrishnan, (2008) *Superlatt. and Microstruct.* 43, 63.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Harun CANPOLAT
Doğum Yeri-Yılı : Sivas- 1983
Medeni Durumu : Bekar
Ev Adresi : Selçuklu mah. Mehmetçik
Sok. Kayaş sit. A Blok
No: 38 58010 Sivas
Ev Tel : (346) 228 00 73
Lisans (2001-2006) : Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü
Yüksek Lisans (2006-2009) : Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı