

**GaSb/InAs SÜPERÖRGÜLERİNDE
OPTİK DESTEKLİ ELEKTRON-DEŞİK
YARATILMASI VE MATLAB’DA BENZEŞİMİ**

Utku KAYA

Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı –Nanoteknoloji

Ağustos-2011

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Utku Kaya'nın "GaSb/InAs Süperörgülerinde Optik Destekli Elektronik Değişik Yaratılması ve MATLAB'DA Benzeşimi" başlıklı İleri Teknolojiler Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 12.08.2011 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	imza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. YÜKSEL ERGÜN	
Üye	: Yard. Doç. Dr. ABİDİN KILIÇ	
Üye	: Yard. Doç. Dr. YELİZ M. KANTAR	

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GaSb/InAs SÜPERÖRGÜLERİNDE OPTİK DESTEKLİ ELEKTRON-DEŞİK YARATILMASI VE MATLAB'DA BENZEŞİMİ

Utku KAYA

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı –Nanoteknoloji

Danışman Prof. Dr. Yüksel ERGÜN,

2011, 55 sayfa

GaSb/InAs tip II süperörgü yapıları günümüzde kızıl ötesi ışınları algılama, yani insan gözünün algılayamadığı belli IR dalga boyu aralıklarını tespit etmemize imkân sağlar. Bu yapılar belli bir elektrik alan altında çalışır. Bu tip süperörgü yapıları savunma sanayisinde kullanılan kızıl ötesi görüş sistemlerinin temel parçalarından biridir.

GaSb/InAs süperörgü yapılarının çalışma prensipleri, elektron -deşik dalga fonksiyonları ve elektrik alan altında gösterdiği tepkimeyi gözlemek için bazı bilgisayar programlarından faydalanılabilir. Böylece, yapılan benzeşimlerden elektrik alan altında sistemin gösterdiği tepkime kolay bir şekilde incelenebilir.

Bu tezde GaSb/InAs tip II süperörgülerinin elektrik alan altındaki benzeşimleri MATLAB aracılığı ile gözlemlenmiştir. Ayrıca bu tezde yazılan kodların geliştirilmesi ve daha kolay hale getirilmesi için yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Temel olarak tek kuyu ve bariyer problemini Kronig Penney yöntemi ile çözümü yapıp ,dalga fonksiyonlarının davranışlarından bahsedildi, Bunun yanında GaSb/InAs tip II sıralı süper örgü yapısı oluşturulup katkı yapılarak p-n eklemi elde edilmesi ve p-n ekleminin elektrik alan altında gösterdiği değişimler açıklanmıştır.

En önemlisi ise yazılan kodların daha verimli ve hızlı çalışan bir program haline getirilmesi ile ilgili teknikler verilmiş ve hazırlanan arayüz programı ile MATLAB'dan bağımsız çalışma ortamı sağlanması gibi konulardan bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: InAs/GaSb, Süperörgü, MATLAB, p-n eklemi, Elektik Alan

ABSTRACT**Master of Science Thesis****ELECTRON HOLE GENERATION IN GaSb/InAs SUPERLATTICES BY OPTICALLY AND IMPLEMENTATION IN MATLAB****Utku KAYA****Anadolu University****Graduate School of Sciences****Department of Advanced Technologies-Nanotechnology Program****Supervisor : Prof. Dr. Yüksel ERGÜN,****2011, 55 pages**

Today, Superlattice structures of Type II GaSb/InAs superlattice provide us to identify infrared radiation and certain wavelength ranges which can not be detected by human eye. These structures operate under a certain electric field. This type of infrared sensors is basic parts of infrared vision system in defense industry.

We can use some computer simulation to identify working principles of GaSb/InAs, Electron –holes wave functions, and reactions under certain wavelengths. Thus, reactions under electrical field by simulation which is written can be observed easily.

In this thesis we determined simulations of GaSb/InAs type II superlattice's reactions under electrical field. In addition ; some simulation studies which is about development of MATLAB code and make easier and fast to codes are mentioned. Basically Kronig Penney techniques have been mentioned and one well and one barrier problem and implement wave function in Matlab have been solved. Addition to this, firstly GaSb/InAs type II superlattice is created via doping p-n junction, and then in MATLAB, change of p-n junction under electrical field has been explained.

Most importantly, written codes are developed to make more efficient and fast. Beside of this, a interface program by MATLAB is prepared so interface which can be operated independent of MATLAB is obtained.

Keywords: InAs/GaSb, Superlattice, MATLAB, p-n junction, Electrical field

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve tezin her aşamasında elinden gelen her türlü yardımı ihmal etmeyen ve yaşadığım sıkıntıları aşmamda yardımcı hiç eksik etmeyen danışmam hocam Sayın Prof. Dr. Yüksel Ergün'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez aşamasında karşılaştığım problemleri aşmama yardım eden ve bana değerli vaktini ayıran sevgili arkadaşım Hakan Mutlu'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana güvenen, maddi, manevi desteğini asla esirgemeyen ve her konuda beni destekleyen aileme teşekkür ederim .

Utku KAYA

Ağustos 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
 1. GİRİŞ	 1
 2. YARIİLETKENLER	 4
2.1. Yarıiletkenlerde İletkenlik	4
2.2 Yarıiletken Malzemeler	5
2.2.1 Yarıiletken Malzemelerin Çeşitleri.....	5
 3. SÜPERÖRGÜLER	 7
 4. P-N EKLEMLERİ	 9
4.1. Yayılım Bölgesi(Deplation Region).....	10
4.2. P-N Ekleminin Elektrik Alan Altında Davranışları.....	11
4.2.1. İleri Besleme (Foward Bias).....	11
4.2.2. Geri Besleme (Reverse Bias).....	13

5. KRONİG PENNEY MODELİ	15
5.1. Kronig Penney Modelinin MATLAB’da Benzeşimi Ve Sonuçlar.	19
6. MATLAB	22
6.1. MATLAB’a Giriş	22
6.2. MATLAB’ın Kullanım Alanları.....	22
6.3. MATLAB’ın Avantajları	23
7. InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜLERİNİN BENZEŞİMİ	24
7.1. Tip-II Süpergü Yapısının MATLAB’da Oluşturulması	24
7.2. Tip-II p-n Eklemının Elde Edilmesi Ve Benzeşimi.....	26
8. ELEKTİRİK ALAN ALTINDA p-n EKLEMİNDE ELEKTRON- DEŞİK ETKİLEŞİMLERİ,DALGA FONKSİYONUNUN BULUNMASI VE BENZEŞİMİ	34
8.1. Sonsuz pot kuyusu çözümü ve Hamiltonyeni bulmak	34
9. KOD GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇÖZÜMLEME PERFORMANSI	42
9.1. Ön Belek Tahisis(Preallocating Arrays).....	47
10. MATLAB GUI İLE ARAYÜZ HAZIRLAMAK	49
11. SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

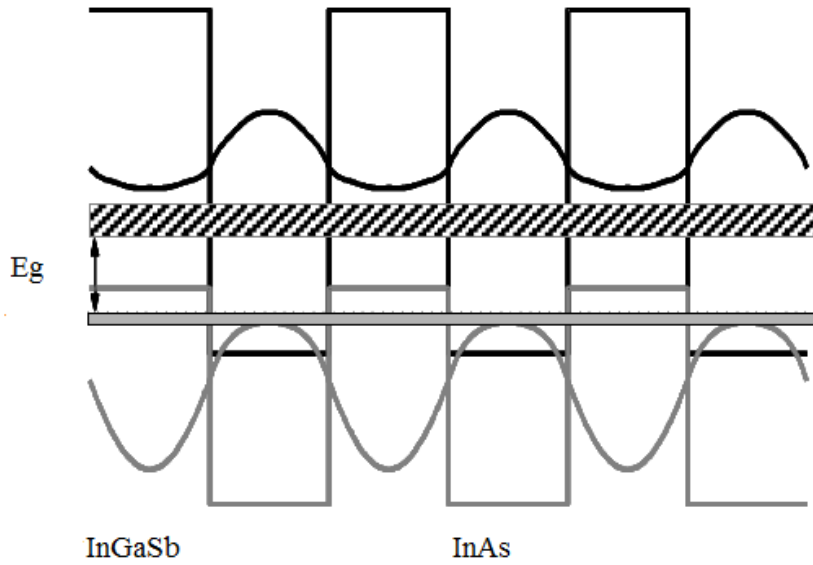
1.1.	Elektron ve deşik (hole) minibantlarının yer aldığı InAs/GaInSb süper örgünün enerji bant diyagramı.....	1
1.2.	Kesim dalga boyunun InAs katman genişliği ile değişimi.....	2
2.1.	Yarıiletken band yapısı.....	4
2.2.	GaAs faz dağılımı.....	6
3.1.	Süperörgü yapısının şematik gösterimi.....	7
3.2.	I-Tip (Straddling) heteroyapı örneği.....	7
3.3.	II-Tip (Staggered) heteroyapı örneği.....	8
3.4.	III-Tip (Staggered) heteroyapı örneği.....	8
4.1.	Termal dengedeki bir p-n eklemının fermi seviyeleri eşittir.....	9
4.2.	Termal dengede bir p-n eklemının uzay yük dağılımı.....	10
4.3.	Yayılım bölgesi (deplation region).....	11
4.4.	0 voltaj altında p-n eklemının denge konumu.....	11
4.5.	Yayılım bölgesinin ileri beslemede değişimi.....	12
4.6.	İleri beslemede belirli bir voltaj üstünde yayılım bölgesinin ortadan kalkması.....	13
4.7.	Yüksek geri besleme voltajında yayılım bölgesinin büyümesi.....	14

5.1.	Kronig Penney modelinde elektronlar için potansiyel kuyuları.....	15
5.2.	Kronig Penney modelinin MATLAB’da benzeşimi.....	20
7.1.	Tip-II süperörgü yapısının Matlab’da benzeşimi.....	25
7.2.	Voltaj uygulanmamış pn eklemi.....	32
7.3.	1.55 ev altında p-n eklemi.....	33
8.1.	Sonsuz pot kuyusu.....	34
8.2.	1.22 eV elektrik alan altında 1 deşik 2 elektron dalga fonksiyonu.....	38
8.3.	1.22 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.....	38
8.4.	1.22 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.....	40
8.5.	2.63 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.....	40
8.6.	4 farklı elektrik alan altında overlap değişiminin mutlak değeri.....	41
10.1.	Örnek Bir GUI Arayüzü.....	49
10.2.	Yeni bir arayüz oluşturmak.....	50
10.3.	Arayüz programının hazırlanışı.....	51
10.4.	InAs/GaSb süperörgüsünün arayüz programı.....	52

1. GİRİŞ

Günümüzde kızıl ötesi algılama sistemlerinde kullanılan GaSb/InAs süperörgüleri büyük önem taşımaktadır. Günümüzün teknolojisi GaSb/InAs gibi sıralı bir süperörgü yapısını üretilmesini sağlamaktadır. GaSb/InAs sistemlerinin ikili/ikili sürümü ilk 1977 yılında Sai-Halasız ve Esaki tarafından kızılötesi tespiti için önerildi. Daha sonra ikili/ üçlü versiyonu ise Smith ve Mailhiot tarafından 1987 yılında önerilmiştir. [1]

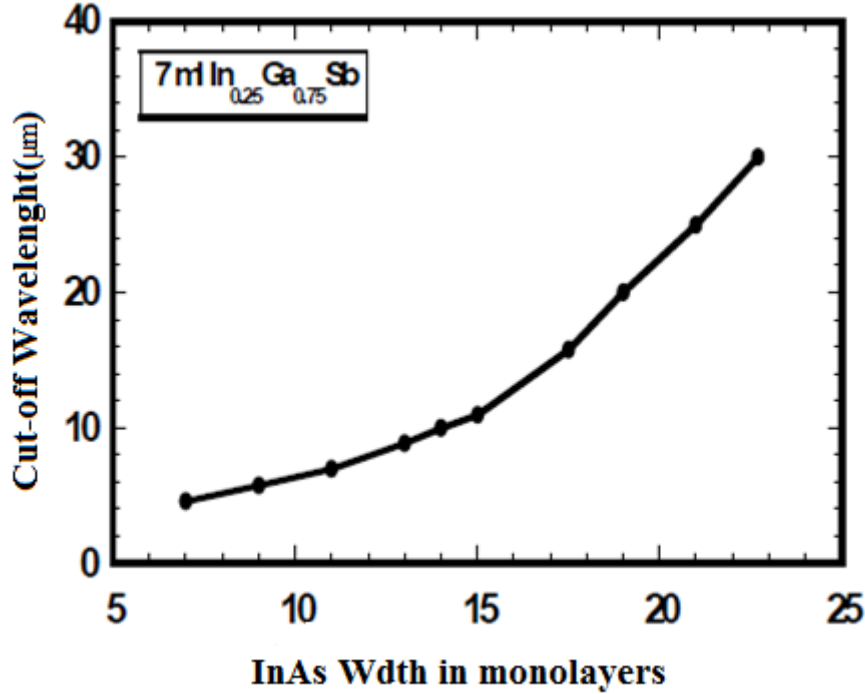
Tip-II süper örgüleri, değerlik ve iletim bandı enerji farklılığından dolayı değerlik ve iletim bantlarının karşı karşıya gelmediği bir band yapısına sahiptir. InAs tabakalarının oluşturduğu iletim bandı enerji düzeyi, InGaSb tabakalardan oluşan değerlik bandı enerji düzeyinden daha düşük enerji düzeyine sahiptir ve böylece şekil 1 de görüldüğü gibi iç içe geçmiş band yapısı oluşur. [2]



Şekil 1.1. Elektron ve deşik (hole) mini bantlarının yer aldığı InAs/GaSb süper örgünün enerji band diyagramı. [3]

Şekil 1.1’de gördüğümüz iç içe geçmiş sıralı yapı tip- II süperörgü yapısıdır. Bu tip süperörgüde elektronlar genellikle InAs tabakalarında bulunurlarken deşikler GaInSb tabakalarda kuşatılırlar. Bu durum algılayıcılarda

soğurulmayı azaltıcı bir mekanizma olan Auger birleşimini engellemekte ve bu yüzden de yüklerin ömürlerini artırmaktadır. [4]



Şekil 1.2. Kesim dalga boyunun InAs katman genişliği ile değişimi.[2]

InAs/GaInSb kızıl ötesi dalga boylarında çalışmaktadır ve bu kızıl ötesi algılayıcı yapılması konusunda uygun bir süperörgü yapısı olduğunu gösteriyor. Ayrıca alaşım kompozisyonunu ve katmanların inceliklerini değiştirmek optik geçişi istenilen aralıkta kontrol edilmesini sağlar. Şekil 1.2 de görüldüğü gibi InAs katmanların genişliğinin değişimi ve değerlik bandından iletim bandına elektron geçirebilmek için gerekli kesim dalga boyu gösterilmiştir. En uzun süren soğurma için kesim dalga boyu, optik geçiş enerjisi ile $E = hc/\lambda$ kadar alakalıdır. [2]

GaSb/InAs süperörgü yapısı katman kalınlığı ve uygulanan elektrik alan altında geçiş özellikleri değişir. Bunu teorik olarak hesaplamak ve benzeşiminin gözlemlenmesi için bazı benzetim programlarına ihtiyaç vardır. Bu tezde kullanılan benzetim programlarından biri olan MATLAB detaylı bir şekilde anlatılacak ve çıkan sonuçlar gösterilecektir.

MATLAB, MATrix LABoratory kelimelerinden türetilmiş, daha çok matematiksel işlemler yaptırmaya yönelik tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. [6] Bu program ilk geliştirildiğinde amaç matris işlemlerinin kullanıcılar tarafından kolaylıkla yapılmasını sağlamaktır. Matlab, geliştirilmesi sonucu günümüzde basit matematiksel hesaplamalardan karmaşık analizlere varan çok çeşitli alanlarda kullanılabilir hale gelmiştir. Bu nedenle son zamanlarda Matlab özellikle bilimsel araştırmalar için tercih edilen ve popüler olarak kullanılan bir ortam haline gelmiştir. [7]

MATLAB'ı kullanma avantajlarından biri de hızlı ve etkili matris işlemleri yapabilmesi, kolay ve anlaşılır bir arayüze sahip oluşu ve kullanıcıya yönelik MATLAB'dan bağımsız çalışan arayüz programı oluşturabilmesi denilebilir.

Bu tezde bu konu hakkında yazılan benzeşimleri geliştirme, elektrik alan altında p-n eklemının davranışları ve süper örgüde elektron ve deşiklerin yaratılabilme olasılıkları gösterildi. Benzeşim kodları geliştirme çalışmaları ve arayüz (graphical user interface) yazımı detaylı olarak anlatılmıştır.

2. YARIİLETKENLER

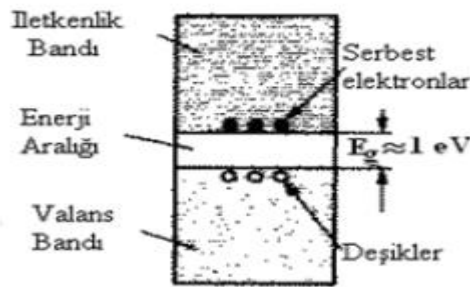
Yarıiletken malzemeler 1940'dan beri üzerinde çalışmalar yapılmakta ve günümüzde askeri uzay ve birçok teknolojiye yer almaktadır. Bu malzemeler transistörler, diyotlar, güneş pilleri, kızıl ötesi algılayıcılar ve birçok elektronik ürünlerin yapısını oluştururlar.

Büyütme tekniklerinin gelişmesi ile birlikte çoklu yapılara ilgi arttı ve çok tabakalı yapılar ince film teknolojilerin doğuşu ile bu yapıların değişik elektronik özellikleri ortaya çıkmıştır.

İnce film teknolojisi çoklu yapıların ortaya çıkmasını sağladı. Böylece düşük boyutlu, hızlı ve verimli elektronik malzemeler üretildi ve günlük hayatta kullandığımız birçok araç gereç daha küçük boyutlarda üretildi ve daha az enerji ile çalışır hale geldi.

2.1. Yarıiletkenlerde İletkenlik

Yarıiletkenlerde izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır. Yasak band aralığı yarıiletkenin özelliklerini tanımlamakta önemli bir parametredir. Yasak bandın üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik bandı altta kalan bölge ise değerlik bandıdır. [8]



Şekil 2.1. Yarıiletken band yapısı. [9]

$T=0 \text{ K}$ 'de, tüm elektronlar değerlik bandındadır. İletkenlik bandında birçok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolaylıkla hareket ettirebilir ve bir akım meydana gelir. Yarıiletkenlerin iletkenliği

genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenlikteki bu tür bağımlılıklar, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirir.[10]

2.2. Yarıiletken Malzemeler

Periyodik tablonun II ve VI sütunlarındaki elementler yarıiletken malzeme yapımında kullanılmaktadır.

Bu tezde incelenen GaSb/InAs ikili bileşik yarıiletken periyodik cetvelin III-V grubu elementlerinden oluşturulmuştur.

2.2.1. Yarıiletken Malzemelerin Çeşitleri

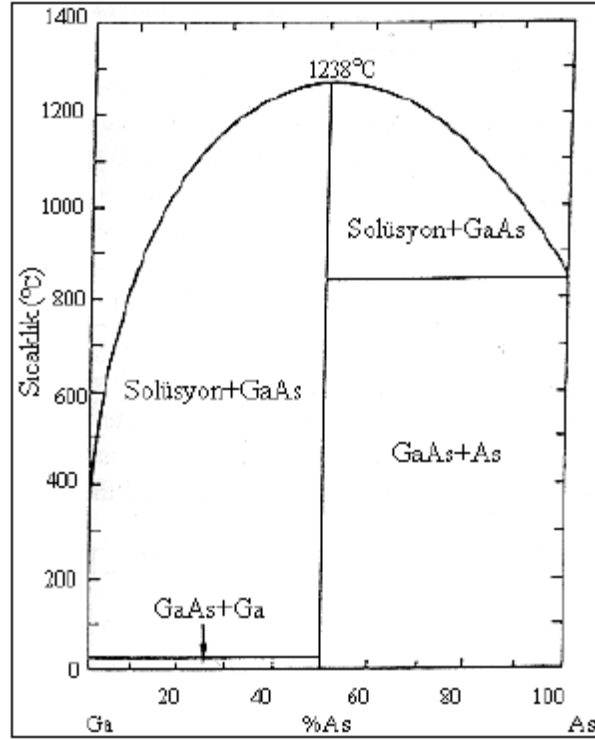
Yarıiletken malzemeler elementsel ve bileşik yarıiletken malzeme olmak üzere ikiye ayrılır

Elementsel Yarıiletkenler; Ge ve Si, tek tip atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Her bir atom, bir elektronunu en yakın komşusuyla ortaklaşa kullanarak kuvvetli bir bağ (kovalent bağ) oluşturur.

Bileşik Yarıiletkenler; İyonik ve kovalent bağlanmanın kombinasyonu sonucu oluşan iki ya da daha çok elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir.

Bileşik yarıiletkenler üçe ayrılır.

İki Bileşik Yarıiletkenler; Bunlara kısaca 3-5 grubu bileşikleri de denir. Bir element 3 değerlik diğeri ise 5 değerlik elektronuna sahiptir. En bilinen örneği GaAs'dır. GaAs için belli sıcaklıklarda faz dağılımı şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. GaAs faz dağılımı. [8]

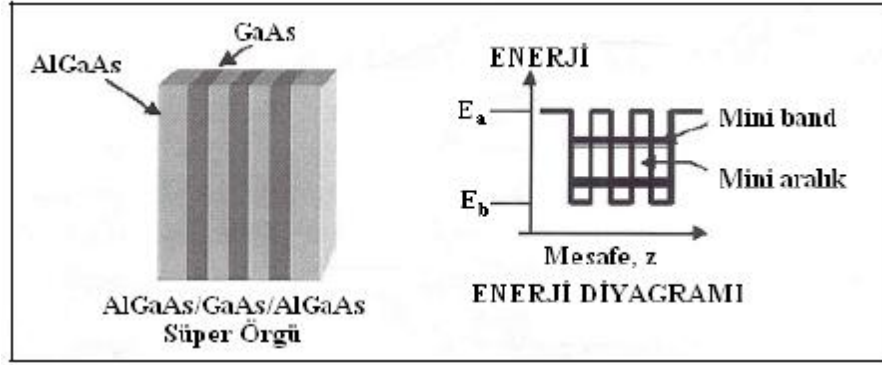
Üçlü Bileşik Yarıiletkenler; Bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesiyle oluşur. Bilinen örneklerinden biri $Al_xGa_{1-x}As$ ' dir. [9]

Dörtlü Bileşik Yarıiletkenler (Alaşım Yarıiletkenler);Bu tipteki yarıiletkenler, birçok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşiminden elde edilir. $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ yarıiletkeni alaşım yarıiletkenlere bir örnektir. [9]

3. SÜPERÖRGÜLER

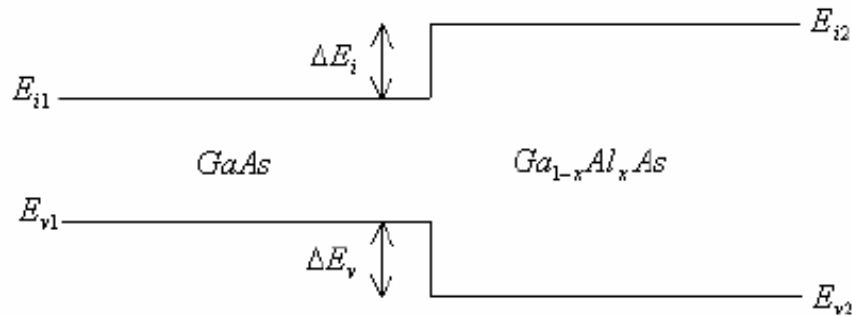
Sıralanmış yarıiletkenler malzemelerden oluşan kuyu ve bariyerler içeren yapıya süperörgü denir. Süperörgülerin bariyer ve kuyuları nano düzeyde olduğundan dolayı elektron sızması yani tünelleme olayı gözlenir.

Bir başka deyişle, bir süperörgü bariyerler arasında elektronların tünnelleyebildiği, ultra ince olan dar bant aralıklı tabakalardan oluşan bir çoklu kuantum-kuyu yapısıdır. Bu yapı mini bandlar ve mini aralıkların oluşumunu sağlar. [9]



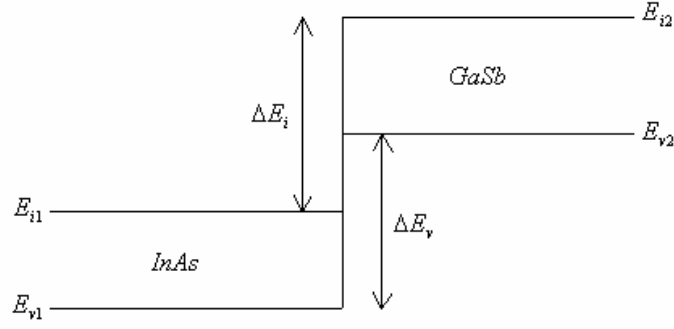
Şekil 3.1. Süperörgü yapısının şematik gösterimi. [9].

Süperörgüler band yapısına göre tip-I, tip-II ve tip-III olarak üçe ayrılır. [4]



Şekil 3.2. I-Tip (Straddling) heteroyapı örneği.

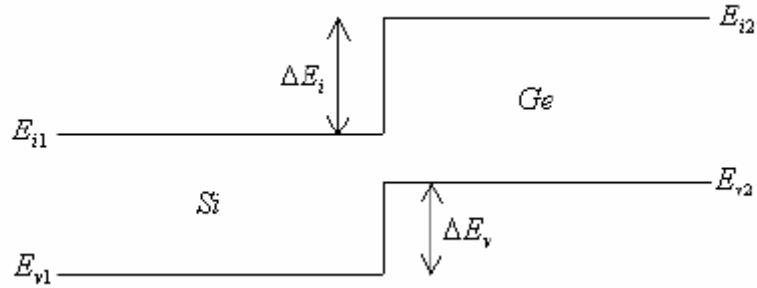
GaAs/ $Ga_{1-x}Al_xAs$ Tip-I heteroyapıya örnek verilebilir. Bu yapıda elektronlar ve deşikler GaAs tabakasında bulunurlar



Şekil 3.3. II-Tip (Staggered) heteroyapı örneği.

Şekil 3.3 de görüldüğü gibi Tip-II süperörgülerde değerlik ve valans bandı birbirine çakışacak şekilde ayrı-ayrı kısımlara toplanmıştır. Tezde çalışılan GaSb/InAs yapısı buna bir örnektir. Bu tip süperörgüde elektronlar InAs deşikler ise GaSb’da hapsedilirler.

Tip III süperörgüler tip I örgülere benzer Si ve Ge dan oluşan yarıiletkenler buna örnektir şekil 3.4’de görülmektedir.



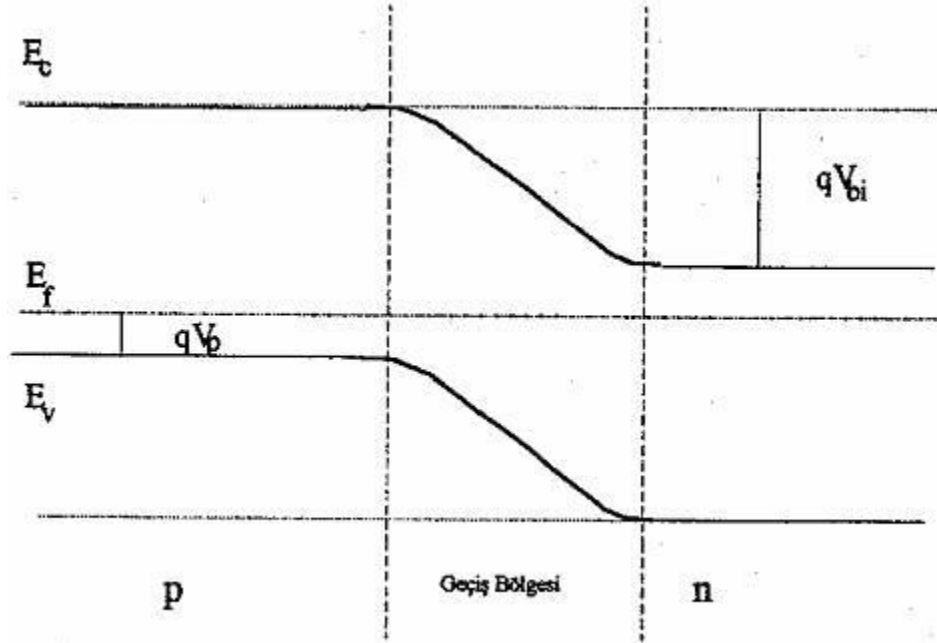
Şekil 3.4. III-Tip (Staggered) heteroyapı örneği.

III-Tip (Staggered) heteroyapılarda, örneğin Si-Ge, elektronlar Si tabakasında, deşikler ise Ge tabakasında kuşatılmışlardır.

4. P-N EKLEMLERİ

p tipi ile n tipi bir malzeme metalürjik kontak ile birbirine bağlanırsa, birbirlerine komşu iki farklı bölge ile bunların sınır bölgesi, yani *p-n eklemi* (*p-n junction*) gerçekleşir.

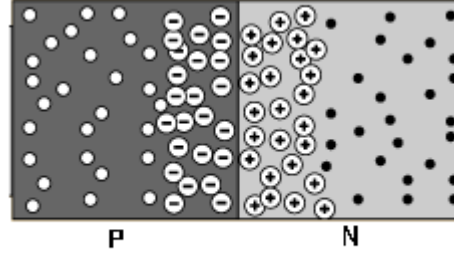
p ve n tipi yarıiletkenlerin fermi yüzeylerinin farklı olmasından dolayı yüzeyler arasında bir V_0 kontak gerilimi oluşur. Ekleme komşu olan n-tipi yarıiletkendeki elektronlar p-tipi yarıiletkenine ve p-tipi yarıiletkenindeki boşluklar n-tipi yarıiletkenine geçecek şekilde yük alış verişi olur. Bu yük aktarımının sonunda şekil 4.1’de görüldüğü gibi tabakaların farklı fermi enerji düzeyleri eşitlenir. [11]



Şekil 4.1. Termal dengedeki bir p-n ekleminin fermi seviyeleri eşittir.

Elektronların ve boşlukların akması sonucunda p-n ekleminin her iki tarafında yükü dengelenmemiş donör ve akseptör atomları oluşur, iki tabaka dengelenmemiş yüklerle yüklü olduğundan dolayı tabakalar arasında fermi düzeylerinin eşitlenmesini sağlayan bir dipol alanı oluşturur. Bu oluşan dipol alanı

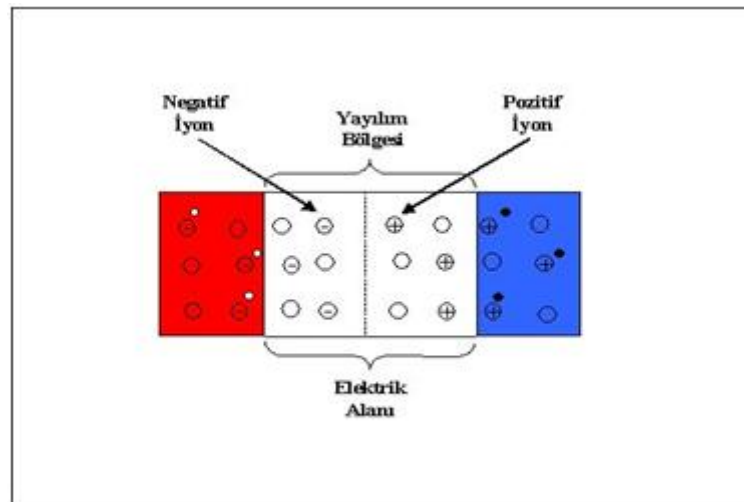
fazla olan yük akışını önleyerek, eklem X_n ile X_p sınırları arasındaki uzay yük bölgesinde hareketli yük taşıyıcılarını tamamen tüketir.



Şekil 4.2. Termal dengede bir p-n eklemine uzay yük dağılımı.

4.1. Yayılım Bölgesi(Depletion Region)

Eğer p bölgesindeki deşik konsantrasyonu n bölgesine göre fazla ise holler p den n bölgesine difüze eder. p den ayrılan holler arkasında negatif yüklü akseptör iyonları bırakır. Bunun tam tersi olarak n den ayrılan elektronlar pozitif yüklü iyon bırakırlar. Böylece eklem X_n ile X_p sınırları arasında birleşen elektron ve deşik çifti nötr bir bölge oluşturur. Bu bölgenin adı yayılım bölgesidir. [10] Şekil 4.3’de yayılım (geçiş bölgesi) görülmektedir.



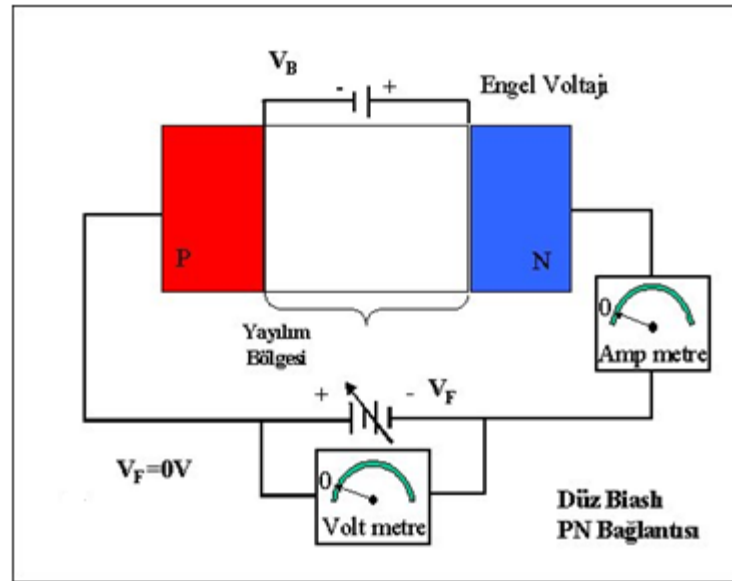
Şekil 4.3 Yayılım bölgesi (depletion region).

Artık denge durumuna geçen bağlantının uçlarından elektrik akımının (elektronların) geçebilmesi için elektriksel bir engel (yalıtkan bir bölge) oluşmuştur. Bu engel bağlantının arasında kalan yayılım bölgesidir. Aradaki bölgeyi elektronların aşabilmesi için silisyum için oda sıcaklığında ($T=25^{\circ}\text{C}$) 0,6V kadar bir gerilime ihtiyaç vardır. Bu voltaj değeri özellikle küçük sinyal uygulamalarında çok önemlidir. Aynı zamanda ortası yalıtkan iki dış kenarı yarıiletken olan bağlantı bir kapasite olarak da davranır. Bu kapasite yüksek frekanslarda çalışan diyot, transistör gibi malzemeler için istenmez, fakat varicap diyot gibi kapasitesi voltajla değişen diyotlar için özellikle istenir. Bu özellikleri sağlamak için yarı iletken üreticilerinin özel teknikleri vardır. [11]

4.2. P-N Eklemının Elektrik Alan Altında Davranışları

4.2.1. İleri Besleme (Foward Bias)

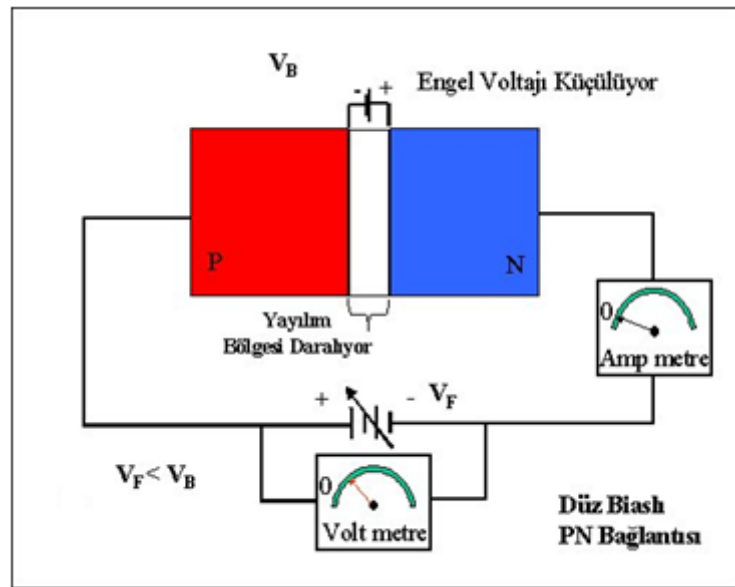
Şekil 4.4’de görülen devrede, PN bağlantısının P tarafına pozitif N tarafına negatif voltaj verebilecek bir ayarlı güç kaynağını bağlayalım. Başlangıçta voltaj kaynağının (V_F) değeri sıfır volt olsun. Bu durumda şekil 4.4 de görüldüğü gibi devreden hiç akım akmayacak ve ampermetre sıfır değerini gösterecektir.[12]



Şekil 4.4 0 voltaj altında p-n eklemının denge konumu.

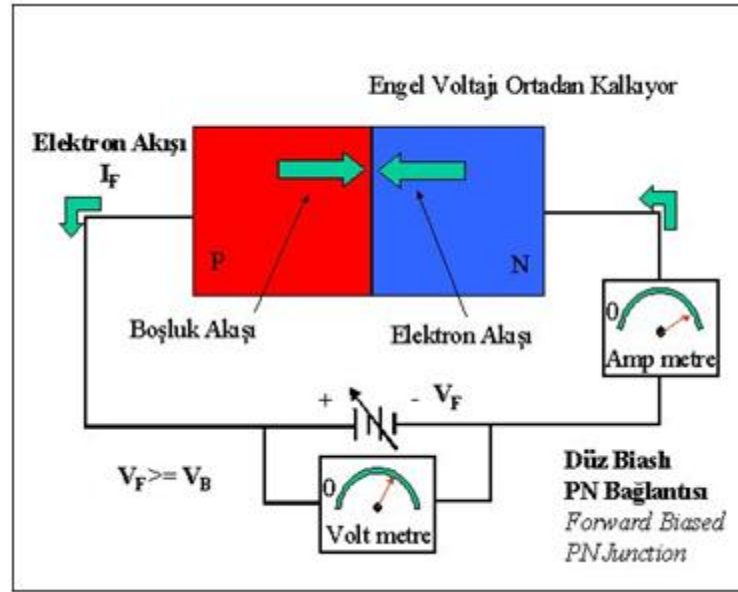
Voltajın biraz arttırıldığı durumu incelersek;

Voltaj kaynağının eksi ucunun sağladığı enerjiden dolayı p-n eklemesinin n tarafı elektronca zenginleşir ve aynı şekilde voltaj kaynağının artı ucunun sağladığı enerjiden dolayı p taraf da deşikçe (hole) zenginleşir. P tarafta çoğalan deşikler yayılım bölgesinin negatif iyonlarıyla birleşirler, N tarafında çoğalan elektronlar ise yayılım bölgesindeki pozitif iyonlarla birleşirler Bunun sonucu olarak yayılım bölgesi daralır. Fakat ampermetre hala sıfır amper göstermekte ve akım akmamaktadır.



Şekil 4.5. Yayılım bölgesinin ileri beslemede değişimi.

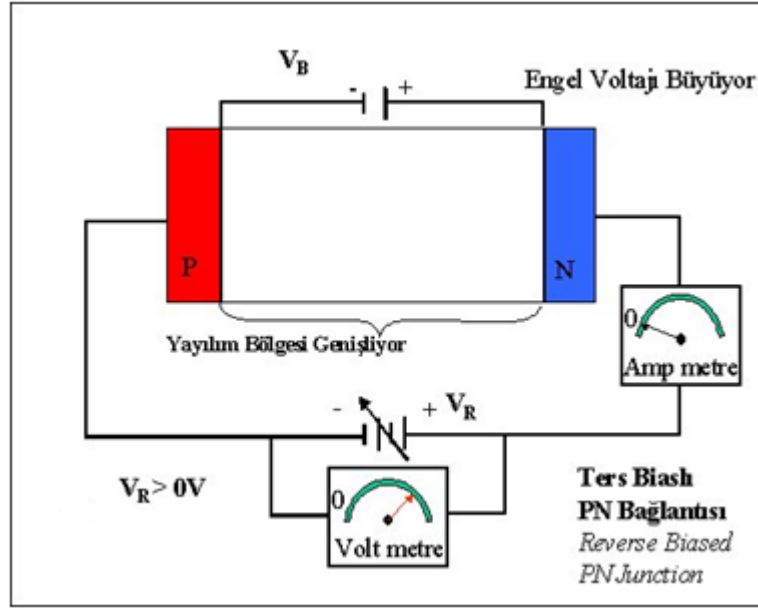
Eğer yarıiletkenimiz silisyumdan yapılmış ise voltmetrede yaklaşık 0,6V'u gösterdiği sırada şekil 4.5'de görüldüğü gibi artık yayılım bölgesi ortadan kalkar. [11] N taraftaki serbest elektronlar P tarafındaki boşluklarla yoğun bir şekilde birleşmeye başlarlar ve sürekli bir akım akmaya başlar. Bu sırada ampermetremizde artık bir değer (I_F) göstermeye başlamıştır. Bu şekildeki bağlantıda yani PN bağlantısının P tarafına pozitif, N tarafına negatif gerilim uygularsan iletme geçer. Bu bağlantıya düz besleme (Forward Bias) denir. [12]



Şekil 4.6. İleri beslemede belirli bir voltaj üstünde yayılım bölgesinin ortadan kalkması.

4.2.2. Geri Besleme (Reverse Bias)

Şekil 4.6daki bağlantının geri besleme bağlantısından farkı PN bağlantının P ucuna negatif N ucuna ise pozitif voltaj verilmesidir. Başlangıçta voltaj kaynağının değeri sıfır volt olmasından dolayı devreden herhangi bir akım akmaz. Eğer voltajı biraz arttırsak, pn bağlantının p tarafındaki boşluklar voltaj kaynağının negatif ucundan gelen elektronlarla birleşir ve negatif iyon dönüşür. N tarafındaki serbest elektronlar ise voltaj kaynağının pozitif ucundan gelen boşluklarla birleşerek pozitif iyon dönüşür. Bunun sonucu olarak şekil 4.6’da görüldüğü gibi p-n eklemesinin arasındaki yayılım bölgesi daha da büyür ve ampermetreden hiç akım akmadığı görülür. Bu şekildeki bağlantıya TERS BİAS (Reverse Bias) denir. [12]



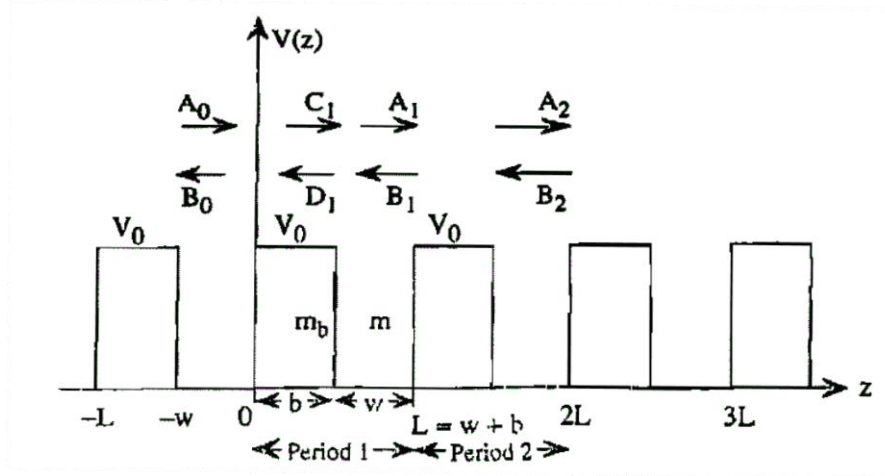
Şekil 4.7. Yüksek geri besleme voltajında yayılım bölgesinin büyümesi.

Daha önce anlatıldığı gibi yarıiletkenleri saf olarak üretilmesi mümkün değildir. Bu nedenle geri beslemede yarıiletken içindeki azınlık taşıyıcılarından dolayı mikroamper seviyelerinde de olsa akım gözlenebilir. Bu akıma sızıntı akımı (Leakage Current) denir. Azınlık taşıyıcıları yoğunluğu sıcaklığın artması ile artacağı için PN bağlantıda sızıntı akımı, sıcaklığın artması ile artar.

Bu tezde InAs/GaSb süperörgüsünden oluşan pn eklemesinin geri besleme altında değişimleri yapılan benzeşim programları ile gözlenecektir.

5. KRONIG PENNEY MODELİ

Kronig ve Penneynin 1931’de bulduğu bu model, elektronun bir boyutlu kare kuyuda hareketini inceler ve tek boyutlu potansiyel çözümü için basit bir çözüm sunar.



Şekil 5.1. Kronig Penney modelinde elektronlar için potansiyel kuyuları.[5]

Şekil 5.1’de gösterilen $-w$ ile 0 arasındaki bölge kuyu bölgesine karşılık gelir ve bu bölgede potansiyel yoktur. $-L$ ile w arasındaki bölge ise iyonlar arasında ki boşluktur ve bariyere karşılık gelir.

Schrödinger denklemini;

Kuyu için;

$$-\frac{\hbar^2}{2m_w} \frac{d^2\psi}{dz^2} = E\psi \quad (3.1)$$

Bariyer için;

$$-\frac{\hbar^2}{2m_b} \frac{d^2\psi}{dz^2} + V_0\psi = E\psi \quad (3.2)$$

dir.

Bu denklemin genel çözümünü yaptığımızda şekil 5.1'deki dalga fonksiyonları

$$\Psi(z) = \begin{cases} A_0 e^{ik_w z} + B_0 e^{-ik_w z} & -w \leq z \leq 0 \\ C_1 e^{ik_b(z-b)} + D_1 e^{-ik_b(z-b)} & 0 \leq z \leq b \\ A_1 e^{ik_w(z-L)} + B_1 e^{-ik_w(z-L)} & -w \leq z \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

şeklindedir.

Denklem 3.3'de

$$k_w = \sqrt{\frac{2 m_w E}{h^2}} \quad (3.4)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 m_b (E - V_0)}{h^2}} \quad (3.5)$$

olarak tanımlanır.

Denklem 3.3 de $z=0$ ve $z=b$ olduğu noktalarda sınır şartlarını uygularsak,

$Z=0$ için;

$$A_0 + B_0 = C_1 e^{-ik_b b} + D_1 e^{ik_b b} \quad (3.6)$$

$Z=0$ için türevleri alınır ve eşitlenirse;

$$\frac{ik_w}{m_w} * A_0 - \frac{ik_w}{m_w} B_0 = \frac{ik_b}{m_b} C_1 e^{-ik_b b} - \frac{ik_b}{m_b} D_1 e^{ik_b b} \quad (3.7)$$

olarak bulunur.

3.7 ve 3.6 ı matris içinde yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

elde edilir.

$$P_1 = \frac{mb.k_w}{k_w m_v} \quad (3.9)$$

olmak üzere

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + P_1)e^{ik_b b} & (1 - P_1)e^{ik_b b} \\ (1 - P_1)e^{-ik_b b} & (1 + P_1)e^{-ik_b b} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Z=b için sınır şartlarını uygulırsa;

$$C_1 + D_1 = A_1 e^{ik_w(b-L)} + B_1 e^{-ik_w(b-L)} \quad (3.12)$$

Aynı sınırdı türevlerini eşitlenirse;

$$\frac{ik_b}{m_b} * C_1 - \frac{ik_b}{m_b} D_1 = \frac{ik_w}{m_w} A_1 e^{-ik_w} - \frac{ik_w}{m_w} B_1 e^{ik_w} \quad (3.13)$$

bulunur.

Böylece;

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$P_2 = \frac{m_w.k_b}{k_b m_b} \quad (3.15)$$

Bulunur;

Böylece T matrisini elde edebiliriz,

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + P_2)e^{ik_w w} & (1 - P_2)e^{ik_w w} \\ (1 - P_2)e^{-ik_w w} & (1 + P_2)e^{-ik_w w} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Denkle 3.8 ve 3.14 arasında bağlantı kurarsak transfer matrisini elde edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = TB \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

T.B matrisinin elemanları;

$$TB = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

olsun.

$$\begin{aligned} t_{11} &= e^{ik_w w} \left[\cos k_b b + \frac{i}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) \sin k_b b \right] \\ t_{12} &= e^{ik_w w} \frac{i}{2} \left(P - \frac{1}{P} \right) \sin k_b b \\ t_{21} &= e^{-ik_w w} \left(-\frac{i}{2} \right) \left(P - \frac{1}{P} \right) \sin k_b b \\ t_{22} &= e^{-ik_w w} \left[\cos k_b b - \frac{i}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) \sin k_b b \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

olmak üzere;

$$\det |\overline{TB}| = 1$$

olduğundan özdeğer ve özfonksiyonları bulabiliriz .

Özfonksiyon.

$$f(E) = \begin{cases} \cos k_w w \cosh \alpha_b b - \frac{1}{2} \left(\eta - \frac{1}{\eta} \right) \sin k_w w \sinh \alpha_b b, & 0 < E < V_0 \\ \cos k_w w \cos k_b b - \frac{1}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) \sin k_w w \sin k_b b, & V_0 < E \end{cases} \quad (3.21)$$

bulunur.

Sonuç olarak Kronig Penney modeli dalga fonksiyonun davranışı cos fonksiyonu karakterini gösterdiğini basit bir çözümle göstermiştir.

$$\cos qL = \cos k_w w \cos k_b b - \frac{1}{2} \left(P + \frac{1}{P} \right) \sin k_w w \sin k_b b \quad (3.22)$$

5.1. Kronig Penney Modelinin MATLAB' da Benzeşimi Ve Sonuçlar

Kronig Penney modelinin çözümünü MATLAB'da yapıp tek kuyu ve bariyer için dalga fonksiyonlarını bulunabilir.

İlk olarak bariyer genişliği, kuyu genişliği ve etkin kütleleri tanımlansın.

```
clear all
hb = 1.05459/10^27;
Ao = 10^(-8);          (cm)
meV = 1.60219/10^15;
me = 9.10956/10^28;
qe = 4.80324/10^10;    (yük yoğunluğu)
mw = 0.023*me;         (kuyudaki elektronun etkin kütlesi )
mb = 0.041*me;         (bariyerdeki elektronun etkin kütlesi )
Vo = 0.910;            (eV)
bb = 28.5;             (bariyer genişliği)
aw = 30;               (kuyu genişliği)
L1 = bb+ aw;           (bir periyodun genişliği Ångström)
```

Atanan bb ve aw değerleri bariyer genişliği için 28,5 Å kuyu için ise 30,Å dur.

Denklem 3.9 ve 3.15'deki P1 ve P2 değerlerini bulmak için,

C, fonksiyonlardaki değişken eleman olmak üzere 3.4 ve 3.5 deki denklemleri tanımlansın.

```
syms c
kb=sqrt(2*mb*(c-Vo)*meV/(hb^2));
kw=sqrt(2*mw*c*meV/(hb^2));
P1= kw*mb/(mw*kb);
```

$$P2 = m_w * k_b / (m_b * k_w);$$

Daha sonra t_{11} t_{12} t_{21} t_{22} matris elemanlarını bulmak için denklem 3.20 kullanılabilir

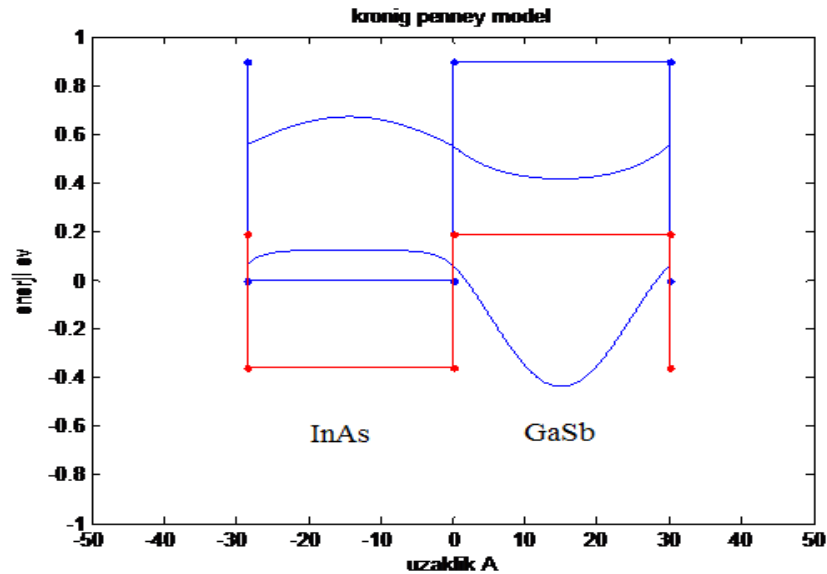
$$\begin{aligned} T_{11} &= \exp(1i * k_w * a_w) * (\cos(k_b * b_b) + (1/2) * (P2 + 1/P2) * \sin(k_b * b_b)); \\ T_{12} &= \exp(1i * k_w * a_w) * (1/2) * (P2 - (1/P2)) * \sin(k_b * b_b); \\ T_{21} &= \exp(-1i * k_w * a_w) * (-1/2) * (P2 - (1/P2)) * \sin(k_b * b_b); \\ T_{22} &= \exp(-1i * k_w * a_w) * (\cos(k_b * b_b) - (1/2) * (P2 + 1/P2) * \sin(k_b * b_b)); \end{aligned}$$

Ve denklem 3.22 de elde edilen fonksiyonu MATLAB’da

$$ff = \text{real}((\cos(k_w * a_w)) * (\cos(k_b * b_b)) - 0.5 * (P2 + 1/P2) * \sin(k_w * a_w) * \sin(k_b * b_b));$$

şeklinde tanımlanır.

Her bir değerlik ve iletim bandının enerjilerini hat olarak çizdirirsek MATLAB ortamında aşağıdaki grafiği alırız.



Şekil 5.2. Kronig Penney modelinin MATLAB’ DA benzeşimi.

Kronig Penney, Bloch fonksiyonlarının karakterini korumuş ve şekil 5.2’deki gibi basit bir dikdörtgen seçmiştir. Bu yapılar basit bir dikdörtgenden öte

kompleks bir yapıdadır. Kronig Penney elektronun serbest kütlesi değil kuyu ve bariyerlerdeki etkin kütleleri hesaba katmıştır. [13]

Şekil 5.2’de gördüğümüz gibi tek periyot InAs/GaSb yapısı, bariyer ve kuyunun genişlikleri, etkin kütleleri ve enerji seviyelerine göre dalga fonksiyonları görülmektedir. Elektronlar InAs bölgesinde, deşikler ise GaSb da hapsolür ve elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonları denklem 3.22’de görüldüğü gibi cos karakteri gösterir.

6. MATLAB

6.1. MATLAB'A Giriş

MATLAB MATrix LABratory isimlerinden türemiş bir program olup hızlı işlem yapan basit ara yüzü olan yüksek performanslı bir teknik programlama dillerinden biridir.

MATLAB, program girdileri ve çıktıları matris gibi tanımlar ve fortran ve C gibi dillere göre çözümleme işlemi minimum düzeydedir.

6.2. MATLAB'IN Kullanım Alanları

Matlabın kullanım alanlarına örnek verecek olursak ; [14]

- Matematiksel (nümerik ve sembolik) hesaplama işlemleri,
- Algoritma geliştirme ve kod yazma, programlama,
- Lineer cebir, istatistik, Fourier analizi,
- Filtreleme, optimizasyon, sayısal integrasyon vb. konularda matematik Fonksiyonları 3-2D ve 3D grafiklerinin çizimi,
- Modelleme ve simülasyon (benzetim),
- Grafiksel ara yüz oluşturma,
- Veri analizi ve kontrolü,
- Gerçek dünya şartlarında uygulama geliştirme şeklinde özetlenebilir.

Ayrıca,

- MATLAB programını C/C++ diline dönüştürebilir,
- 20. dereceden bir denklemin köklerini bulabilir,
- 100x100 boyutlu bir matrisin tersini alabilir,
- Bir elektrik motorunu gerçek zamanda kontrol edebilir,
- Bir otobüsün süspansiyon simülasyonu yapılabilir.

6.3. MATLAB'ın Avantajları

-Kolay anlaşılabilir kod algoritması ile programları hızlı bir şekilde oluşturulmasını sağlar.

-Birçok işletim sisteminde sorunsuz çalışabilir.

-MATLAB, birçok hazır fonksiyon içerir. Denklem köklerini bulmak, maksimum, minimum değerlerini bulmak vb işlemleri tek fonksiyonla yapmamızı sağlar.

-MATLAB'ın en güzel özelliklerinden biri ise GUI(Graphical User Interface) yani kullanıcı ara yüzü içermesidir. Bu kullanıcıya programı komut satırı ile uğraşmadan kolayca veri girişi yapmasını sağlar ve düzenli ve basit bir arayüz hazırlar.

-MATLAB'ın bir başka özelliği yazdığımız kodları ve düzenlediğimiz ara yüzü derleyip, son kullanıcının kodları görmeden programı çalıştırmasını ve ayrıca MATLAB bilgisayarda kurulmuş olmamasına rağmen, programın MATLAB' dan bağımsız çalışabilmesini sağlar.

Bu tezde MATLAB kullanılmasının başlıca nedeni ;

Daha önce bahsedildiği gibi MATLAB'ın hızlı hesaplama gücü, ara yüz oluşturma ve kodların matlardan bağımsız şekilde çalışacak derleyiciye sahip olmasıdır.

7. InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜLERİNİN BENZEŞİMİ

7.1. Tip-II Süperörgü Yapısının MATLAB' DA Oluşturulması

Şekil 7.1 deki gibi InAs/GaSb sıralı süperörgüleri oluşturmak için, InAs ve GaSb yapısının değerlik ve iletim bandı enerjilerini MATLAB'da aşağıdaki gibi tanımlansın

$V_c = 0.910;$	(GaSb iletim band enerjisi eV)
$V_{2v} = 0.360;$	(GaSb değerlik band enerjisi eV)
$V_{2c} = 0.190;$	(InAs iletim band enerjisi eV)
$V_{2v} = -0.360;$	(InAs değerlik band enerjisi eV)

Daha önce söz edildiği gibi InAs/GaSb süperörgülerin değerlik ve iletim band enerjilerindeki farklılıklarından dolayı iç içe geçmiş bir yapı oluşur. Bu yapıya Tip-II süperörgü denir.

InAs/GaSb süperörgüsünün kuyu ve bariyer genişliğini tanımlanırsa;

$L_b = 30;$	(GaSb bariyer genişliği Å)
$L_w = 28.5;$	(InAs kuyu genişliği Å)
$L_{am} = 58.5;$	(Kuyu ve bariyerden oluşan tam bir periyodun genişliği Å)

olmak üzere;

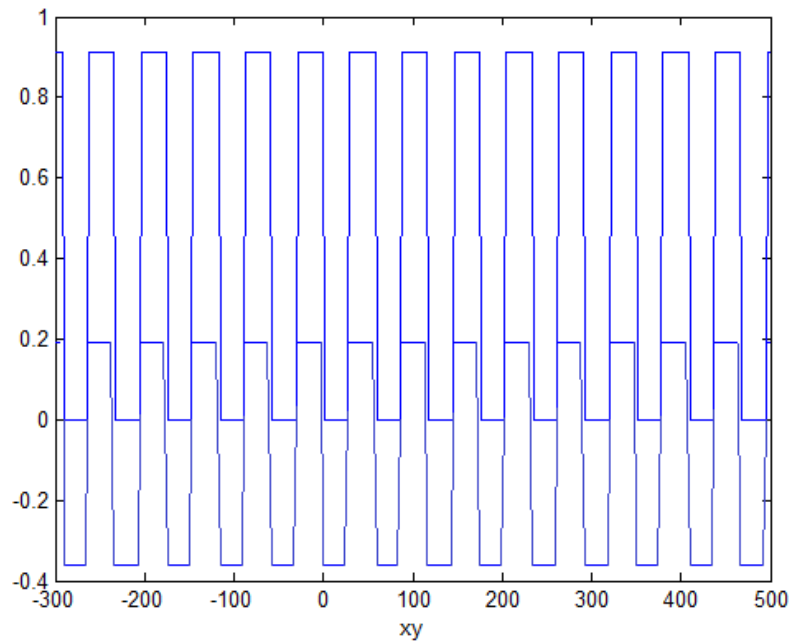
Bariyeri 30 Å ve kuyusu 28,5 Å olan toplam 58,5 Å periyotluk bir süperörgü yapısını oluşturulabilmesi için step fonksiyonu kullanır.

```
function [v]=step(xy)
    if xy>=0
        v=1;
    else if xy<0
        v=0;
    end
end
end
```

Bu fonksiyon yerine matlabın kendi içinde bulunan ve tanımladığımız step fonksiyonu ile aynı işleve sahip heaviside fonksiyonunu da kullanabiliriz bu fonksiyon bize daha hızlı ve sembolik ifadelerle yazılan kodların çözümünü sunar.

```
function Y = heaviside(X)
    Y = zeros(size(X));
    Y(X > 0) = 1;
    eng = symengine;
    if strcmp(eng.kind,'maple')
        Y(X == 0) = nan;
    else
        Y(X == 0) = 1;
    end
```

Tanımlanan step fonksiyonunu değerlik ve iletim bandı enerjilerine uyarlanırsa şekil 7.1'deki gibi Tip-II süperörgü yapısını elde ederiz.



Şekil 7.1. Tip-II süperörgü yapısının Matlab'da benzeşimi.

7.2 . Tip-II p-n Eklemine Elde Edilmesi Ve Benzeşimi

P-N eklemleri konusunda bahsedildiği gibi InAs'ı donör ve GaSb'u akseptör katkılanırsa n ve p tipi yarıiletkenler meydana gelir. N ve p tipi yarıiletkenlerde konsantrasyon farkından difüzyon gözlenir, P bölgesindeki deşikler n bölgesine difüze olur ve p den ayrılan deşikler negatif yüklü akseptör iyonlar bırakır. Bunun tam tersi n den ayrılan elektronlar pozitif yüklü iyon bırakırlar. Böylece eklem 2 kısmında birleşen elektron ve deşik çifti nötr bir bölge oluştururlar. Bu bölgenin adı yayılım bölgesidir.

P-n bölgesine geri besleme voltajı uyguladığımızda yayılım bölgesindeki deşikmelerden bahsedilmişti. Geri besleme voltajını arttırdığımız zaman yayılım bölgesinin genişlediğini görmemiz gerekir buna bağlı olarak elektron –deşik davranışları voltaj değişimine bağlı değişecektir. Yayılım bölgesinin geri besleme voltajında değişimini incelersek.

Eğer yarıiletkeni donör atomları ile katkılırsak n-tipi yarıiletken, akseptör (elektron alıcı) atomlarla katkılırsak p-tipi yarıiletken elde ederiz. Elektron alıcı ile elektron verici atomlar arasında denge vardır yani;

$$n + N_A^+ = p + N_D^+ \quad (7.1)$$

şeklindedir.

Eğer p bölgesinde $p \gg n$ ise net akseptör $N_A \equiv N_A^- - N_D^+$ eğer $N_A \gg n_i$ ise $p \cong N_A$ olarak elde edilir.

Buna benzer olarak n bölgesi için,

$$N_d \equiv N_D^+ - N_A^- \text{ ve } n \cong N_d \quad (7.2)$$

bulunur.

Daha önce yayılım bölgesinin tanımını yapılmıştır. P-n ekleminde yarıiletkenin katkılanması sonucu p'den n'e elektronların, n'den p'e deşiklerin sürüklenme akımı oluşur. Ayrıca p ve n eklemi arasında konsantrasyon farkı olduğu için difüzyon akımı oluşur ve bu difüzyon ve sürüklenme akımları net konsantrasyon

eşit ve termodinamik dengeye ulaşana kadar devam eder ve p n bölgeleri arasında fermi seviyeleri aynı hizaya gelir.

X_n ve X_p bölgelerindeki yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = \begin{cases} +q N_d & -x_n < x < 0 \\ -q N_A & 0 < x < x_p \end{cases} \quad (7.3)$$

şeklindedir.

Gauss yasasına göre;

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \quad (7.4)$$

olduğundan,

$$\frac{d}{dx} E(x) = \begin{cases} +\frac{q N_d}{\epsilon_n} & -x_n < x < 0 \\ -\frac{q N_A}{\epsilon_p} & 0 < x < x_p \end{cases} \quad (7.5)$$

dir

ϵ_p ve ϵ_n doğrusal geçirgenlik katsayısıdır.

Ayrıca elektrik alanı lineer fonksiyonlar cinsinden tanımlanırsa;

$$E(x) = \begin{cases} +\frac{q N_d (x+x_n)}{\epsilon_p} & -x_n < x < 0 \\ -\frac{q N_A (x-x_p)}{\epsilon_p} & 0 < x < x_p \end{cases} \quad (7.6)$$

olur.

$X=0$ da sınır şartlarına göre;

$$N_A x_p = N_d x_n \quad (7.7)$$

elektrik alan;

$$E(x) = -\frac{d\phi_x}{dx} \quad (7.8)$$

Potansiyeli $x \leq -x_n$ bölgesinde 0 kabul edersek .

$$\phi_x = \begin{cases} 0 & x \leq -x_n \\ -\frac{q N_d}{2\varepsilon_n} (x + x_n)^2 & -x_n < x < 0 \\ -\frac{q N_A}{2\varepsilon_P} (x^2 - x x_P) - \frac{q N_d}{2\varepsilon_n} x_n^2 & 0 < x < x_P \\ -V_0 & x \geq x_P \end{cases} \quad (7.9)$$

yazabiliriz.

Buradan;

$$V_0 = V_{0P} + V_{0n} \quad (7.10)$$

$$V_{0n} = \frac{q N_d x_n^2}{2\varepsilon_n}$$

$$V_{0P} = \frac{q N_A x_P^2}{2\varepsilon_P} \quad (7.11)$$

dir.

x_n ve x_P bölgeleri genişliği aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_n V_0}{q N_d N_A \left(N_A + \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_P} N_d \right)}}$$

$$x_P = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_P V_0}{q N_d N_A \left(N_d + \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_n} N_A \right)}} \quad (7.12)$$

Yayılım bölgesi (deplation region) genişliği ise;

$$x_w = x_p + x_n \quad (7.13)$$

olarak bulunur.

InAs/GaSb p-n eklemine yukarda gösterilen denklemler kullanarak Matlab’da benzeşimini bulunabilir.

İlk olarak 300 K’ de, InAs $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ donör ve GaSb $1,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ akseptör katkısı, uygulanan geri besleme voltajı elektron, deşik mol etkin kütleleri ve n ve p bölgesin değerlik, iletim bandı enerji seviyeleri vb. parametreleri girilsin ve konu içindeki denklemleri tekrar ele alırsak.

$$\rho(x) = \begin{cases} +q N_d & -x_n < x < 0 \\ -q N_A & 0 < x < x_p \end{cases}$$

$$\frac{d^2 V_n}{dx^2} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_n \epsilon_0} N_d \quad (7.14)$$

İntegrali alınırsa,

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_n \epsilon_0} N_d \cdot x + C \quad (7.15)$$

$-x_n$ ‘de sınır şartına göre $V_n = -E_{fn}$ (E_{fn} , pn eklemine n kısmının iletim bandı enerjisinin, enerji seviyesi 0 Ev olan fermi enerjisinden farkıdır) olarak bulunur.

V_n ’nin türevini alırsak;

$$\left. \frac{dV_n}{dx} \right|_{x=-x_n} = 0$$

böylece C sabitini buluruz.

C sabitini yerine yazılırsa;

$$\frac{dV_n}{dx} = \frac{4\pi e^2}{\epsilon_n \epsilon_0} N_d (x + x_n) \quad (7.16)$$

bulunur.

Denklem 7.16'nın integralini alalım;

$$V_n = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0} \frac{1}{2} N d (x + x_n)^2 + C$$

sonucu tekrar $x = -X_n$ de sınır şartı uygulayıp çözersek;

$$V_n = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0} \frac{1}{2} N d (x + x_n)^2 - E f n \quad (7.17)$$

buluruz.

V_p potansiyel enerjisini bulmak için aynı şekilde x_p sınır şartını uygularsak;

$$V_n = -E_{fp}$$

$$\frac{dV_p}{dx} = -\frac{4\pi e^2}{\varepsilon_p \varepsilon_0} N d (x - x_p) \quad (7.18)$$

bulunur.

Tekrar integralini alıp sınır şartı uygularsak;

$$V_p = -\frac{4\pi e^2}{\varepsilon_p \varepsilon_0} \frac{1}{2} N d (x - x_p)^2 \quad (7.19)$$

bulunur

Son sınır şartımız olan $x=0$ 'da V_n ve V_p 'nin türevlerini eşitleyelim.

Böylece X_n ile X_p arasında bir bağıntı elde edilir.

$$\frac{4\pi e^2}{\varepsilon_p \varepsilon_0} N_A x_p = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0} N_d x_n \quad (7.20)$$

$$q_{een} = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0} \quad (7.21)$$

$$q_{eep} = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon_p \varepsilon_0} \quad (7.22)$$

7.21 ve 7.22 deki denklemleri MATLAB’da tanımlansın

```
qeen = 4*pi*qe^2*10^-16/(meV*dien*1000);
qEEP = 4*pi*qe^2*10^-16/(meV*diep*1000);
```

denklem 7.20 tekrar ele alınsın

$$qEEP N_A x_p = qeen N_d x_n \quad (7.23)$$

X=0 da türevlerini değil de kendilerini eşitleyelim ($V_n=V_p$) böylece X_p i elde edilir

$$x_p = \sqrt{\frac{V_0}{qEEP N_A (1 + \frac{qEEP N_A}{qeen N_d})}} \quad (7.24)$$

Elektrik alan katkısını dahil edersek

$$x_p^2 = \frac{E_{fn}-E_{fp}}{qEEP N_A (1 + \frac{qEEP N_A}{qeen N_d})} + \frac{Fe.10^{-4} x_p}{qEEP N_A} \quad (7.25)$$

$$Fe.10^{-4} x_p = \text{elektrik alanın katkısı}$$

Denklem 7.25’i denklem 7.23’e uygularsak;

$$x_n = \sqrt{\frac{(qEEP N_A x_p)^2}{(qEEP N_d)^2}} \quad (7.26)$$

Buradan X_n i buluruz

Böylece $X_n + X_p$ den yayılım bölgesinin genişliğini elde ederiz.

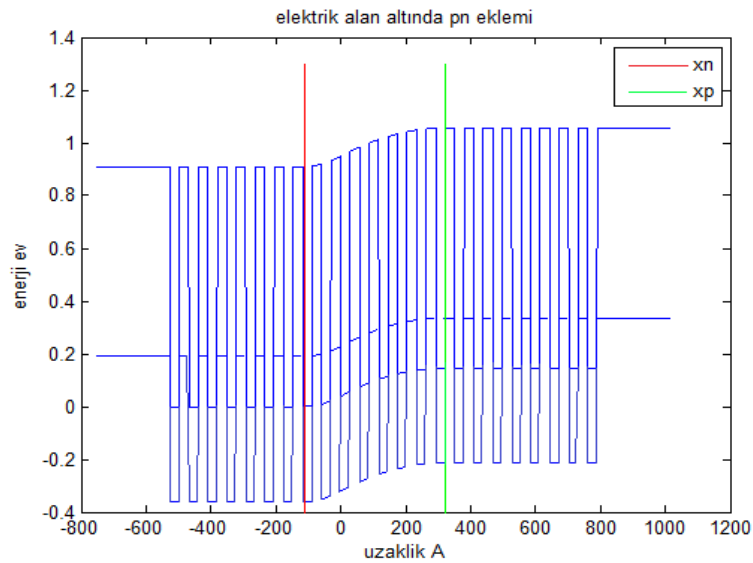
Denklem 7.25 ve 7.26 ı matlabda çözdürelim

```
syms xp
f=solve(xp^2-((Feh*10^-4)/(qEEP*0.5*Na*(1 + (qEEP*Na/(qEEN*Nd)))))*xp-((-efp+efn)/(qEEP*0.5*Na*(1 + (qEEP*Na/(qEEN*Nd))))));
f=vpa(f);
f=double(f(2));

xp=f;
nmax = 150;
xn = sqrt(((qEEP*Na*xp)^2)/((qEEN*Nd)^2));
```

Aynı şekilde denklem 7.19 ve 7.17 deki V_n ve V_p i denklem olarak tanımlatıp MATLAB’da çözümü bulunabilir. V_n ve V_p denklemlerine bir önceki konuda bahsettiğimiz step fonksiyonu ile tip-II superörgü oluşturma yöntemini eklersek şekil 7.2 ve 7.3’deki gibi p-n eklemi elde edebiliriz.

Elde ettiğimiz pn eklemine voltaj uygulamadığımızda yani elektrik alan =0 eV için X_p ve X_n değerlerini aşağıda verilmiştir.



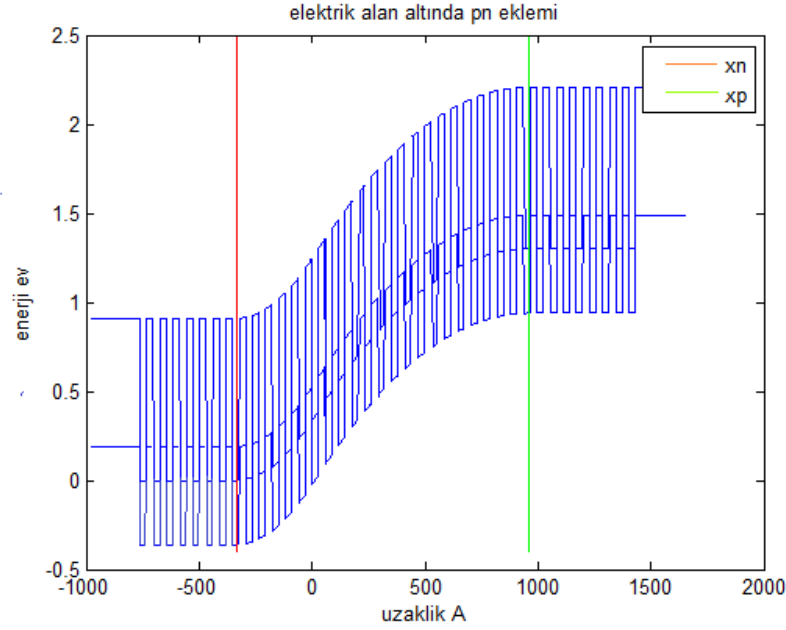
Şekil 7.2 voltaj uygulanmamış pn eklemi.

$$x_p = 322,1068 \text{ A}$$

$$x_n = 112,5269 \text{ A}$$

$$\text{Yayılım bölgesi} = 434,6338 \text{ A}$$

Şimdi p-n eklemine 1.55 eV geri besleme voltajı uygulandığı durumda;



Şekil 7.3. 1.55 ev altında p-n eklemi.

$$x_p = 960,5440 \text{ A}$$

$$x_n = 335,5628 \text{ A}$$

$$\text{Yayılım bölgesi} = 1,2961 \times 10^3$$

Şekilde gördüğümüz gibi uyguladığımız geri besleme voltajını 0 eV'den 1,55 eV'e arttırdığımız zaman daha önce bahsettiğimiz gibi yayılım bölgesi genişler ve x_n ve x_p arasında bir açılma görülür. Şekil 7.2 ve 7.3 Karşılaştırıldığında yayılım bölgesinin 434.6338 A dan 1296.1 A 'a genişlediği gözlenmektedir.

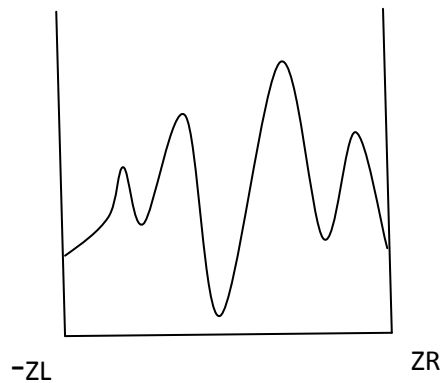
8. ELEKTİRİK ALAN ALTINDA p-n EKLEMİNDE ELEKTRON-DEŞİK ETKİLEŞİMLERİ, DALGA FONKSİYONUNUN BULUNMASI VE BENZEŞİMİ

InAs/GaSb foto algılayıcılarında elektrik alan altında yayılım bölgesinin değişimini gözlemlenmişti. Bu malzeme üzerine ışık düştüğünde fotonlar yarıiletkende elektron –deşik çifti oluşmasını sağlar. Yayılım bölgesinde elektron vedeşikler iç elektrik alan sayesinde ayrılırlar ve böylece foton enerjisi elektrik enerjisine dönüşür ve katkıda bulunur. Böylece cisimden yansıyan fotonlar tespit edebilir. Nano boyutta milyonlarca sensörü yan yana sıralarsak ve her biri akıma katkıda bulunduğu düşünülürse cisim net bir şekilde tespit edilebilir.

Bu bölümde elektrik alan altında yayılım bölgesi içindeki elektron-deşik çiftinin davranışlarını kolayca gözleyebileceğimiz benzeşim programına yer verilecektir. İlk olarak Elektron ve Deşik Dalga fonksiyonlarını bulmak için sonsuz potansiyel kuyu problemini çözümü ve hamiltonyeni hesaplamaktan bahsedilecektir.

8.1. Sonsuz pot kuyusu çözümü ve Hamiltonyeni bulmak

Şekil 8.1 de görüldüğü gibi sonsuz potansiyel kuyusu içersinde belli bir dalga fonksiyonun bulunduğunu farz edersek



Şekil 8.1. Sonsuz pot kuyusu.

Toplam hamiltoniyen denklemi;

$$\left[\frac{p^2}{2m} + V(z) \right] \psi = E \psi \quad (8.1)$$

ψ Dalga fonksiyonu tüm sistem için toplam ifadesi biçiminde yazılabilir;

$$\psi_i = \sum_n C_{i n} \phi_n \quad (8.2)$$

Sonsuz potansiyel kuyu çözümünden bulduğumuz dalga fonksiyonunu bu problemin çözümünde kullanılabilir.

$$\phi_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi}{L} (z + ZL) \quad (8.3)$$

ψ_i 'yi

$$H \psi = E \psi \quad (8.4)$$

de yerine yazarsak;

$$H \sum_n C_{i n} \phi_n = E \sum_n C_{i n} \phi_n \quad (8.5)$$

Bu denklemi soldan ϕ_m^* ile çarpalım. ϕ_m Reel olduğundan dolayı $\phi_m^* = \phi_m$ yazabiliriz.

$$\sum_n C_{i n} \langle \phi_m | H | \phi_n \rangle = E \sum_n C_{i n} \langle \phi_m | \phi_n \rangle$$

$$\sum_n C_{i n} H_{mn} - E \sum_n \delta_{mn} = 0$$

$$\sum_n C_{i n} (H_{mn} - E \delta_{mn}) \quad (8.6)$$

şeklinde yazılabilir.

$$H = \frac{p^2}{2m} + V \quad (8.7)$$

olduğunu biliyoruz. $\langle \phi_m | H | \phi_n \rangle$ 'yi açık şekilde yazarsak;

$$\begin{aligned}
 \langle \phi_m | H | \phi_n \rangle &= \int \left(\sqrt{\frac{2}{L}} \right)^2 \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} H \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \\
 &= \frac{2}{L} \int \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} \left(\frac{p^2}{2m} + V \right) \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \\
 &= \frac{2}{L} \int \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V \right) \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \quad (8.8)
 \end{aligned}$$

Denklem'deki $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V \right)$ çarpanlarına dağıtırsak;

1 ve 2 denklemleri için ayrı incelersek;

1 nolu denklem için;

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2}{L} \int \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \\
 &\frac{\partial^2}{\partial z^2} \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} = -\left(\frac{n \pi}{L} \right)^2 \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L}
 \end{aligned}$$

Bunu tekrar denkleme yazarsak 1 nolu denklemi elde ederiz.

$$= \frac{2}{L} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n \pi}{L} \right)^2 \int \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \quad (8.9)$$

Aynı şekilde 2 nolu denklem için;

$$= \frac{2}{L} V_0 \int \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz \quad (8.10)$$

Sonucuna ulaşırız.

Toplam hamiltoniyen ifadesinde, bulunan kinetik enerji ve potansiyel enerji denklemlerini yazarak tüm sistem için enerji özdeğerlerini elde edilebilir. Hamiltoniyeni ne kadar çok eleman içeren matrisle çözülürse, o kadar net sonuç bulunur. Yazılan benzeşimde 150 e 150 lik matris alındı.

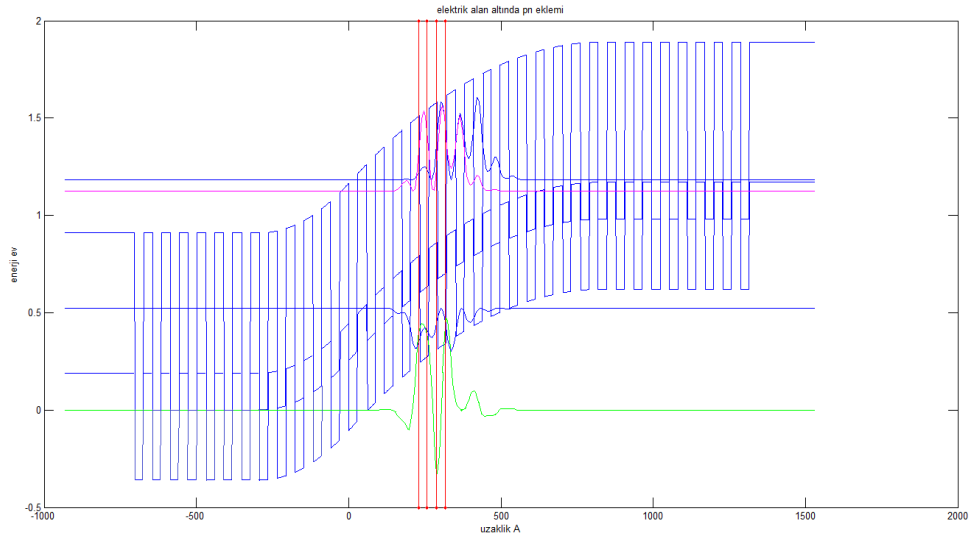
Yani denklem 8.8,

$$\langle \phi_m | H | \phi_n \rangle = \int \left(\sqrt{\frac{2}{L}} \right)^2 \sin \frac{m \pi (z + z_L)}{L} H \sin \frac{n \pi (z + z_L)}{L} dz$$

m=150 n=150 150×150'lik matris yaratmak üzere çözüldü ve matrisin öz değerlerini bulundu.

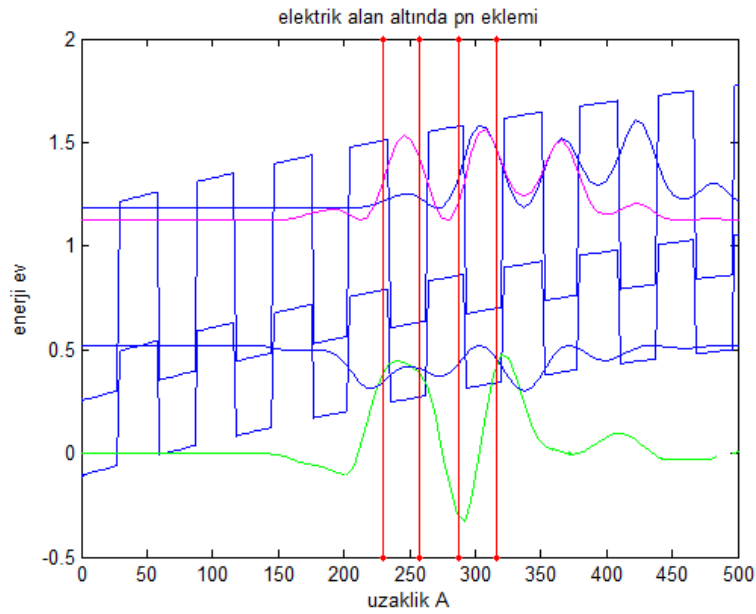
Denklem 8.8' de görüldüğü gibi bunu m=n için veya m≠ n için 2 ayrı denklem açığa çıkacaktır. Denklem 8.8'i çözdürmek yerine bunu m=n için veya m≠ n için 2 ayrı denklemi çözdürmek programın zaman aşımını azaltacaktır.

Şekil 8.2'de 1.22 eV elektrik alan altında 225 A ve 330 A Aralığında bir deşik, iki elektron dalga fonksiyonu çifti oluştuğu bölgeyi düşünürsek.



Şekil 8.2. 1.,22 eV elektrik alan altında 1 deşik 2 elektron dalga fonksiyonu.

Şekil 8.2 ‘deki 0 ve 500 A arasındaki bölgeyi büyütüp incelersek;



Şekil 8.3. 1,22 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.

Şekil 8.3’de görüldüğü gibi 1,22 eV geri besleme uygulanmış pn eklemi yapısının 200 ve 500 A arasında bölümünü görülmektedir. Bu bölgede iki tane 28.5 A InAs kuyusu ve 30 A lük GaSb bariyeri bulunmaktadır daha önce

bahsedildiği gibi elektronlar InAs'da ,deşikler ise GaSb da kuşatılırlar tip-II superörğü p-n eklemine geri besleme uyguladığımızda, elektrik alandan dolayı yayılım bölgesi genişleyecek, kuyu ve bariyer yapısı yukarı doğru eğim gösterecektir. Böylece, elektron ve deşik yaratılabilme olasılıkları ara yüzeylere kayacaklardır. Buna bağlı olarak overlap artar ve böylece elektron ve deşik dalga fonksiyonları aynı ara yüzeylere kaydıkları görülür ve pn eklemine foton düştüğünde elektron deşik çifti yaratılıp ilettime katkıda bulunabileceğini söylenebilir..

Şekil 8.3 de yeşil renk ile ifade edilen elektron ve deşikler arasındaki overlap gösterilmektedir.

Overlap fonksiyonunu;

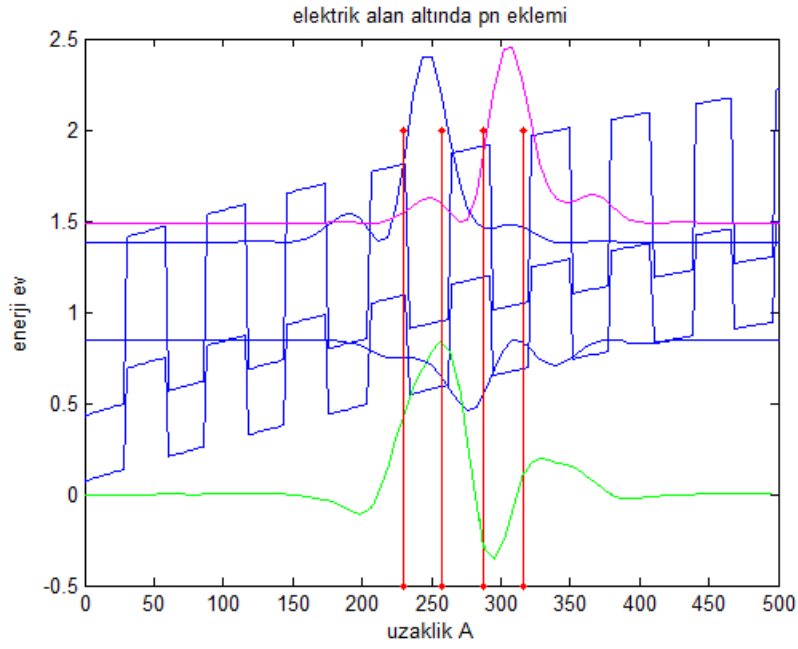
$$overlap = \varphi_{hole}(\varphi_{e1} + \varphi_{e2})$$

şeklinde bulunabilir.

Overlap fonksiyonu ile elektronların yaratılıp katkıda bulunabileceği hakkında bilgi edinilebilir ve elektrik alan altında elektron ve deşikler göstereceği tepkiler hakkında yorum yapılabilir.

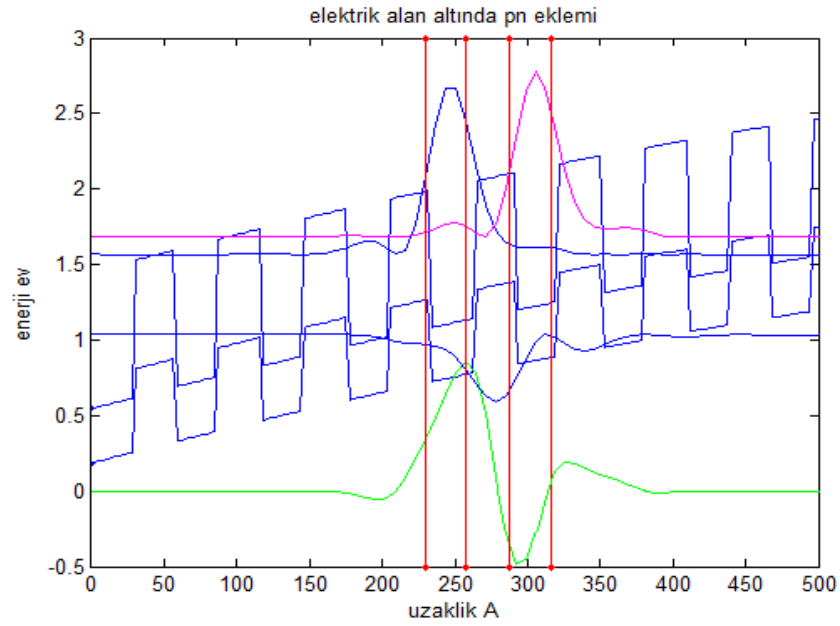
Şekil 8.3'de elektron dalga fonksiyonlarında görüldüğü gibi iki komşu elektron tunnelleme yapıp deşiklerle tepkimeye girebilirler şekilde görüldüğü gibi elektronların bulunma olasılığı sadece tek kuyuda değildir. Komşu kuyularda da bulunma olasılıkları vardır.

Şekil 8.4 de elektrik alanın 2,05 eV çıkarıldığında görüldüğü gibi elektron ve deşik yaratılabilme olasılığı miktarı artmıştır ve ara yüzeylerde toplanma başlamıştır. Şekilde InAs kuyusundan GaSb a geçiş bölgesindeki pikler rahatlıkla görülmektedir.



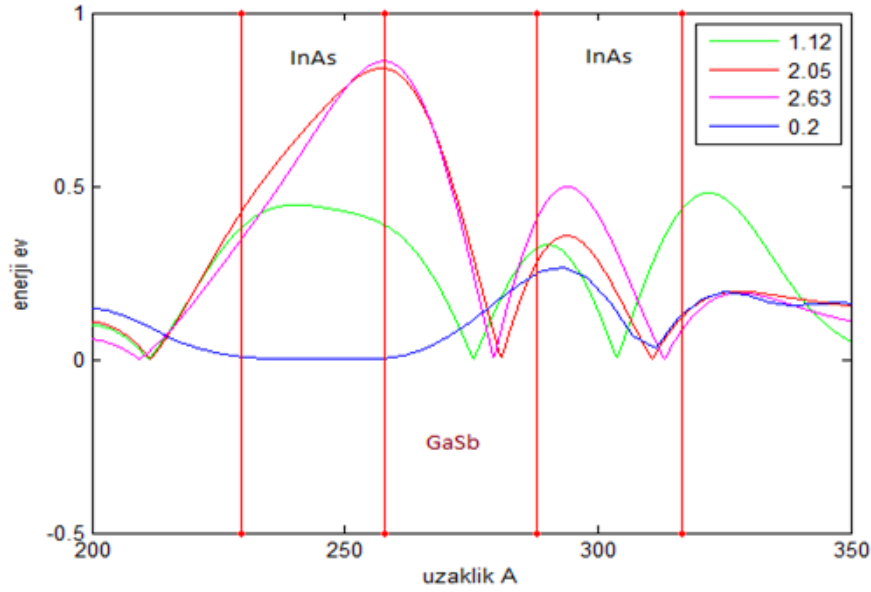
Şekil 8.4. 2,05 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.

Elektrik alanı 2,63 eV'a çıkardığımız zaman daha fazla overlap görülür ve bağlanma enerjisi artar.



Şekil 8.5. 2,63 eV elektrik alan altında 1 deşik, 2 elektron dalga fonksiyonlarının açık gösterimi.

4 farklı elektrik alan altında overlapları karşılaştırılır ve tek bir şekil üzerine yerleştirilirse



Şekil 8.6. 4 farklı elektrik alan altında overlap değişiminin mutlak değeri.

Şekilde görüldüğü gibi elektrik alan arttıkça overlap artar, yani foton düştüğünde elektronların ve deşiklerin ara yüzeylerde yaratılma olasılığı artar. Fakat yüksek elektrik alanda pn eklemi süperörgülerde subband yok olur ve komşu elektron ile enerji farkı büyük olduğundan tünelleme yapma ihtimali azalır. Böylece, iletme geçen elektronlar katkıda bulunamazlar. Bu yüzden bu süperörgü düşük elektrik alanlarda çalışır. Örnek olarak şekil 8.6 da olduğu gibi 4 farklı elektrik alan altında Overlaplar görülmektedir ve hepsi InAs/GaSb geçiş ara yüzeylerde yükselmektedirler. Bu şekilde uygun elektrik alanlardan biri 0,2 eV dır.

Şekil 8.3'de gösterilen magenta ve mavi iki tane elektron dalga fonksiyonuna dikkat edersek komşu kuyularda elektron yaratılma olasılığının fazla olduğunu görülmektedir. Fakat şekil 8.5'de elektrik alan çok yüksek olduğundan Dalga fonksiyonu sadece bir kuyuda birikir. Bu yüksek elektrik alanda komşu elektron ile enerji farkı büyük olduğundan tünelleme yapma ihtimali azaldığını gösterebilir.

9. KOD GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI VE ÇÖZÜMLEME PERFORMANSI

MATLAB yüksek çözümle yeteneğine sahip ve içinde kolay çözümleme yapmayı sağlayabilecek bazı fonksiyonlar içerir. Daha öncede bahsettiğimizi gibi Hamiltonyeni bulmak ve dalga fonksiyonunu hesaplamak için 150×150 boyutunda matris kullanıldı.

150×150 boyutta her bir satır ve her bir sütun için denklem çözüldü düşünelim. Bu boyutta matrisi oluşturmak için MATLAB minimum 22500 işlem yapacaktır ve 150×150 boyutta bir döngü içersine daha fazla denklem eklenirse bu sayı katlanacaktır ve işlem yoğunluğundan saatlerce beklemenize neden olacaktır.

Bu süreyi azaltmak için çeşitli yollar mevcuttur. Bunlardan biri Hamiltonyen matrisinin nasıl bir matris olduğunu anlamak. Hamiltonyen matrisi hermisyen bir matristir. Aşağıda görüldüğü gibi Hermisyen matris karmaşık eşleniğinin transpozesi, kendisine eşit olan matrislere verilen genel addır.

$$A^* = A^T = A$$

Bir H Hermisyen matrisi MATLAB'da oluştururmak için,

```
for i=1:4
    for j=1:4
        H(i,j)=i+j
    end
end
```

döngüsünü MATLAB'a yazdığımız zaman ;

H =

2 3 4 5

3 4 5 6

4 5 6 7

5 6 7 8

sonucunu alırız.

H matrisi 4×4 lük hermitian matrisidir görüldüğü gibi bu matrisin karmaşık eşleniğini ve transpozisini aldığımızda kendisine eşittir.

Dikkat edecek olursak MATLAB bu matrisi oluşturmak için minimum $4 \times 4 = 16$ işlem yaptı.

Matrisin;

H(1,2) yani 1.satır 2. sütun, H(2,1) 2. satır 1. sütun elemanlarının birbirine eşit olduğu görülmektedir

Yani H(1,2) i hesaplarsak H(2,1) i hesaplamamıza kesinlikle gerek yoktur. Böylece işlem sayısını yarıya indiririz ve bu bize ekstra zaman kazandırır.

Kodu bu şekilde yazıldığını düşünelim.

```
clear all
for i=1:4
    for j=i:4
        H(i,j)=i+j
    end
end
```

Sonuç olarak;

H =

2	3	4	5
0	4	5	6
0	0	6	7
0	0	0	8

bulunur.

Şekilde görüldüğü gibi alt üçgenini içindeki elemanları hesaplamadı. Bu, hesaplama süresini yarıya indirdi şekildeki üst üçgenin içindeki elemanları alt üçgene geçirmek için H matrisimizi tanımlanan bir A matrisi ile çarpılırsa;

```

N=4
for i=1:N;
    for j=1:N;
        if i==j;
            A(i,j)=0;
        else
            A(i,j)=1;
        end
    end
end
A

```

Buradan,

$A =$

0 1 1 1

1 0 1 1

1 1 0 1

1 1 1 0

Buradan A matrisini H matrisi ile skaler çarpım yaptıktan sonra transpozesi alınır ve sonucu H matrisi ile toplanır;

$H =$

2 3 4 5

3 4 5 6

4 5 6 7

5 6 7 8

Matrisini buluruz.

Böylece daha kısa zamanda Hermisyen matrisini hesaplanabilir. p-n ekleminde dalga fonksiyonunu bulmaya yarayan hamiltoniyen matrisi bu matris gibi hermisyen matristir. Bu yöntemi 150×150 matrise uygulandığında zaman kazanılan zaman miktarı göz ardı edilemez.

MATLAB'da daha hızlı sonuç elde etmenin diğer bir yöntemi, for döngüsünden kaçınmaktır. Çünkü for döngüsü yavaş sonuç almanıza neden olacaktır.

Örnek olarak $y=x+5$ denklemini 1 ile 10000 arasında 0,0001 aralıklarla hesapla ve komple toplamını bulsun.

```
tic
sum=0;
for i=1:0.01:100000;
    x=i+5;
    sum=sum+x;
end
sum
toc
```

bunun sonucunda ,

sum =5.0005e+011

Elapsed time is 28.787055 seconds.

Görüldüğü gibi for döngüsü ile 29 saniyede hesapladı.

Aynı kodu for döngüsünü katmadan farklı bir şekilde yazılırsa;

```
tic
i=1:0.01:100000;
x=i+5;
sum=sum(x);
sum
toc
```

sonuç olarak ;

sum =5.0005e+011

Elapsed time is 0.166317 seconds.

Yazılan bu kodun ilk yazılıandan farkı, $y=x+5$ işlemini aynı aralıkta hesapladı ve her sonucu sıraya koydu ve en son hesaplanmış değerleri birden toplayarak sonucu elde etmesidir. Bir önceki yazılan programda ise her bir toplama işlemini her bir döngüde ayrı- ayrı hesaplayarak uzun zaman harcamıştır..

9.1. Ön Bellek Tahsisi (Preallocating Arrays)

Eğer for döngüsü ile matris oluşturmak istersek ve for döngüsünde matrisi verilerle doldurmak istenildiğinde bellek parçalanması (memory fragmentation) sorunu meydana gelir. Çünkü matlab elde edeceğimizi son matrisin boyutu hakkında bilgiye sahip değildir.

Mesela,

```
For i=1:10
x(i)=i;
end
```

bu for döngüsü hesaplanırken $i=1$ değerinde Matlab sistemden 1×1 matrisini oluşturmak için bellek talebinde bulunacak ve $x(1)=1$ i oluşturacak. $i=2$ olduğu zaman Matlab 1×2 lik matris oluşturmak için sistemden ekstra bellek talep edecek. Eğer bu ekstra bellek $x(1)=1$ olduğunda talep edilen bellek ile aynı bellek şeridinde ise, Matlab yeni veriyi aynı bellek şeridine ekleyecek. Eğer ki orijinal bellek şeridi sadece 1×1 matrise yetecek kadar büyükse; Matlab $X(1)=1$ değerini 1×2 matris için yeterli olabilecek bellek şeridine yerleştirecek. Şimdi matris 1×2 boyutta olduğundan orijinal bellek şeridi 1×1 den büyük matrisler için kullanılmaz hale gelecektir bu olaya bellek parçalanması denir ve büyük boyutlu for döngülerinde göz ardı edilmeyecek sorunlardan biridir. Bu sorunu çözmek için sıfırlardan oluşan ve elde edeceğimizi son matrisin boyutları ile aynı olan zeros (sıfır matrisi) başlangıç matrisi tanımlanması gerekir. Böylece Matlab bellekte yeterli ve sürekli bir boşluk depolayacak ve Matlab bellek parçalama olayına girmeden verileri yerleştirebilecektir. Bu olaya ön bellek tahsisi denir ve for döngüsü ile işlem yapılırken büyük miktarda zaman kazandırır.

Örneğin 1000×1000 lik matrisi for döngüsü ile oluşturulursun;

```
tic;
for i=1:1000,
for j=1:1000,
    x(i,j)=i+j;
end
end
toc
```

bu matrisi Matlab 12.175349 saniyede oluşturdu.

bu matrise ön bellek tahsisi yapıp hesaplayalım 1000×1000 lik matris

bulacağımızı için zeros(1000) yani 1000×1000 boyutunda 0 lardan oluşan ön tahsis matrisi atandığını düşünelim.

```
tic;
x=zeros(1000);
for i=1:1000,
for j=1:1000,
    x(i,j)=i+j;
end
end
toc
```

bu döngüyü ise 1.761482 tamamladı.

Aradaki zaman farkı göz ardı edilemez derece fazladır.

Tez aşamasında InAs/GaSb süperörgüsünün benzeşimi için uygun kodları yazıldı fakat 2 elektron ve 1 deşik dalga fonksiyonunu hesaplayan program, 150×150 matris oluşturmaya yarayan for döngüleri ve 150 kere üst üste kendi içinde toplanan fonksiyonlar nedeni ile 15 saatte hesaplıyordu. Fakat yukarıda bahsedilen yöntemlerle çok uzun zamanda işlem yapan program yaklaşık 40.761482 saniyeye indirilmiştir.

10. MATLAB GUI İLE ARAYÜZ HAZIRLAMAK

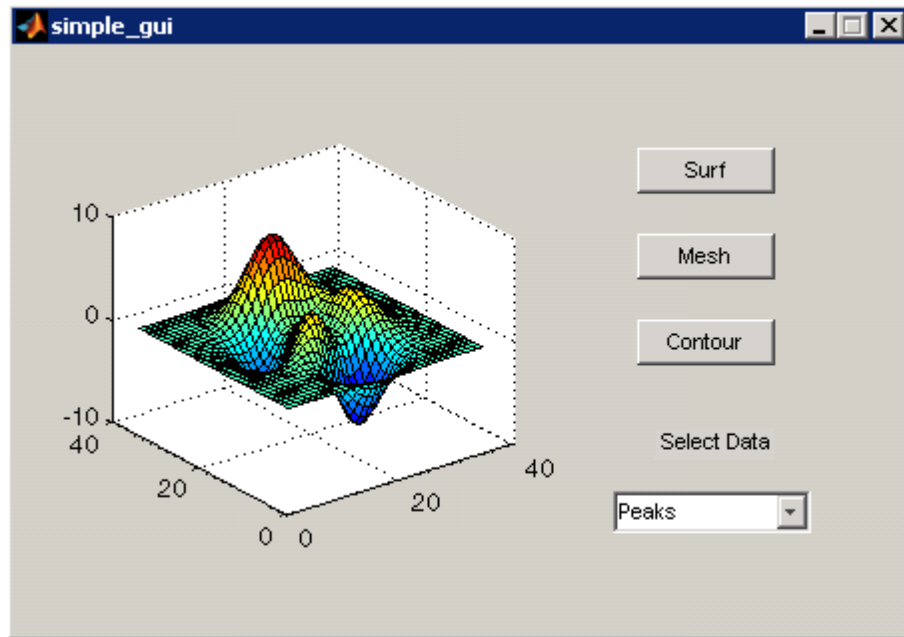
MATLAB matematik hesaplamalar yapmaya yarayan bir araçtır. FORTRAN, BASIC, PASCAL, C gibi bilgisayar programlama dillere göre kullanımı daha kolay ve daha gelişkin niteliklere sahip bir programlama dilidir. Güçlü grafik yetenekleri sayesinde verilerin görüntülenmesi ve canlandırılması için zengin bir ortam sağlar. MATLAB, özgün problemlerin çözümüne görsel yaklaşım sunan grafik kullanıcı ara birimleri (GUI) oluşturulmasına olanak sağlayan bir uygulama geliştirme platformudur.

GUI nedir?

İçeriğinde yer alan nesnelerin kullanılması ile kullanıcıya etkileşim sağlayan ve bir işin veya bir programın koşturulmasını sağlayan grafiksel bir program arayüzüdür. Açılımı Graphical User Interface (GUI) dir.

GUI nesneleri menüler, araç çubukları, radyo butonlar, liste kutuları veya kaydırıcılar olabilir. Bunların yanında MATLAB GUI ile MATLAB'in sunduğu hesaplama imkânları kullanılarak da veri alımı ve grafik çizimi gibi pek çok işlem gerçekleştirilebilir. [7]

Şekil 10.1'de basitçe bir GUI arayüzü görülmektedir.



Şekil 10.1. Örnek Bir GUI Arayüzü.

GUI, komut satırına yazılan komutların kutucuklar içinde düzenli olarak gösterilmesini sağlar. Ayrıca, programlama ve kodlardan anlamayan kişiler sadece kutucuklardan belli parametreleri değiştirerek kolay bir şekilde sonucu almasını ve kullanıcıya basit, hızlı ve rahat kullanımı sağlar.

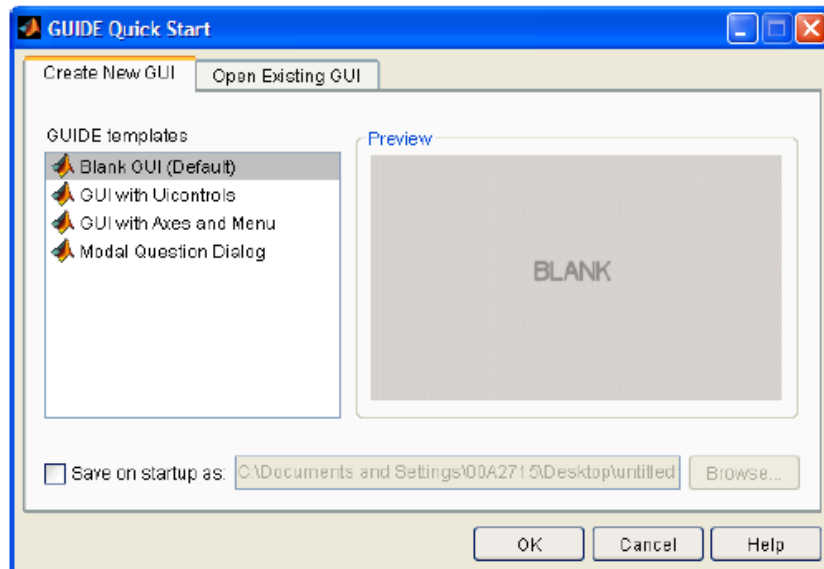
Matlab içersinde derleyici bulundurur bu Matlabın çok büyük artılarından biridir. Böylece oluşturduğunuz programı exe dosyası haline getirebiliriz. Böylece, arayüz matlab dan bağımsız çalışabilir ve programı başkaları sizin kodlarınızı göremeyeceği şekle gelir.

10.1. GaSb ve InAs Süperörgü Yapısına Arayüz Programı Hazırlanması

Matlab da GUI (Graphical User Interface) bulunur ve bu bize kod satırına yazdığımız karmaşık kodları ve parametreleri düzenleyip kullanıcının komut satırı ile uğraşmadan girebileceği bir ortam sağlar.

Daha önce bahsedildiği gibi superörgü yapısının kuyu ve bariyer genişliği, doping miktarı, elektrik alan vb parametreleri kod satırından değiştirilebilir. Fakat daha pratik olarak değiştirmek istenilen parametreler, kutucuklara konursa daha düzenli bir program elde edilebilir.

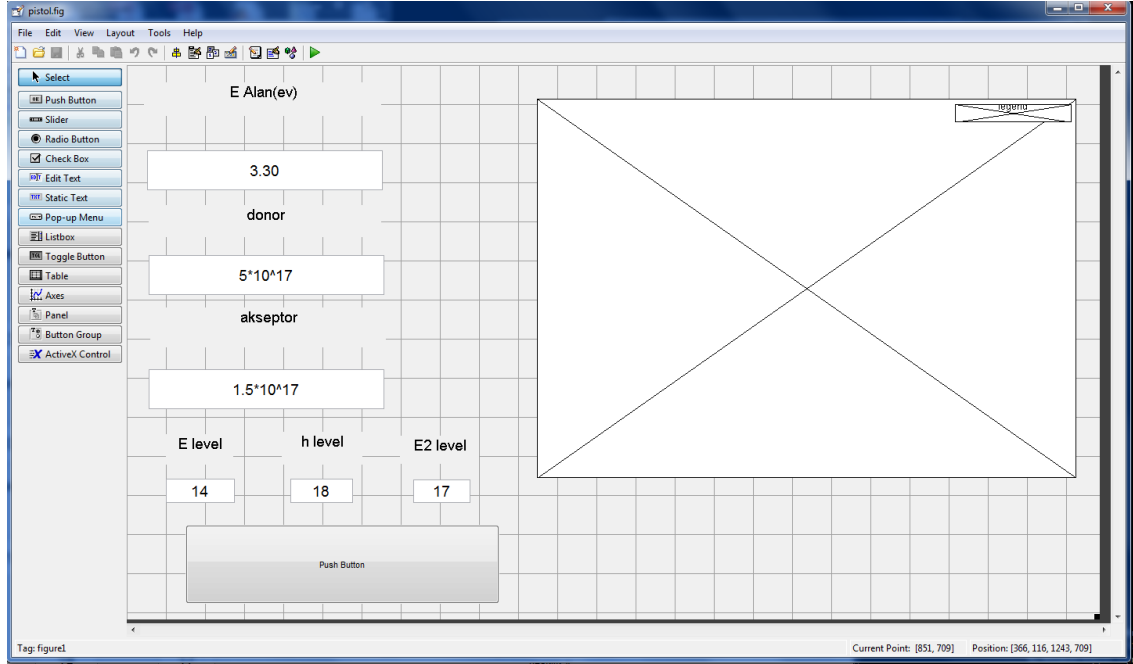
İlk olarak Matlab kod satırına guide yazıyoruz



Şekil 10.2. Yeni bir arayüz oluşturmak.

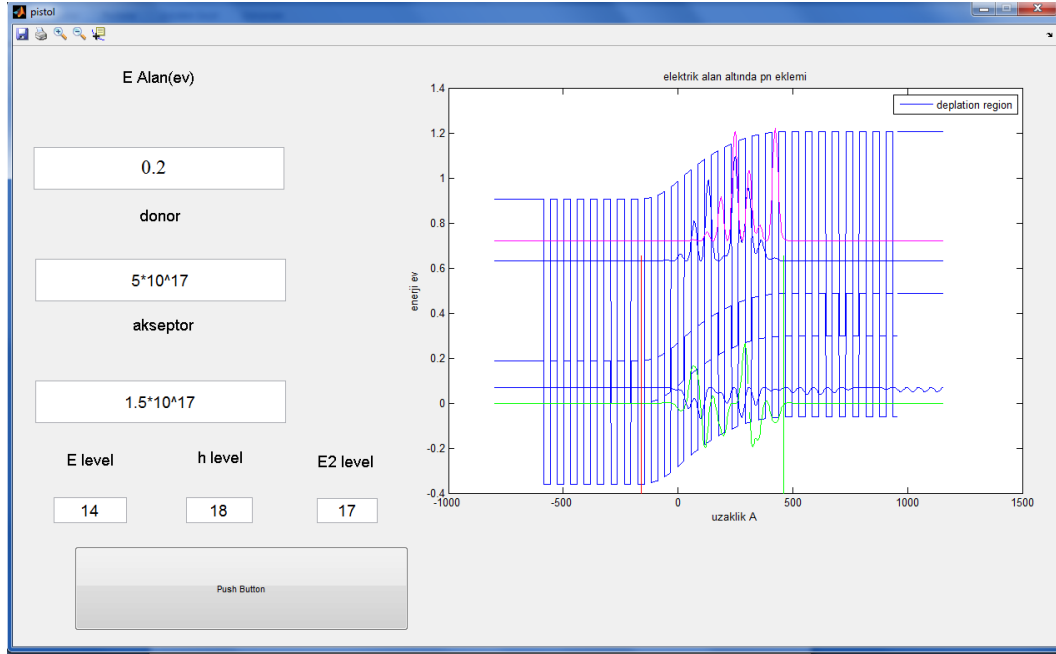
Blank gui seçeneğini seçiyoruz.

InAs/GaSb pn eklemi için yazdığımız arayüzde değiştirmek istenilen parametreleri akseptör yoğunluğu, donör yoğunluğu elektrik alan ve elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının enerji seviyeleri olarak belirlendiği üzere;



Şekil 10.3. Arayüz programının hazırlanışı.

Şekil 10.3’de Arayüz programının basit bir taslağı görülmektedir .GUI kullanıcının isteğine göre çeşitli şekillerde hazırlanabilir



Şekil 10.4. InAs/GaSb süperörgüsünün arayüz programı.

matlabdan bağımsız çalışan gui arayüzü oluşturuldu.

Şekil 10.4’de görüldüğü gibi elektrik alan, donör ,akseptör ve elektron ve deşik enerji seviyelerini değiştirebileceğimiz bir arayüz programı görülmektedir. Bu arayüz programı kullanıcıya göze daha çok hitap eden ve komut satırları ile uğraştırmayan bir ortam sağlar .

11. SONUÇLAR

Bu tezde tek bariyer ve kuyudan oluşan Kronig Penney modelinin çözümü, InAs/GaSb kuyu ve bariyerlerden oluşan bir süperörgü yapısına uygulanması ve benzeşimi hakkında bilgiler verilmiştir.

p-n eklemeleri termal dengeye ulaştığında fermi seviyesi eşitlenir konsantrasyon farkındandeşikler n bölgesinden p bölgesine, elektronlar ise p bölgesinden n bölgesine difüze eder ve bunlar birleşir böylece 2 kısımda birleşen ve elektronlar nötr bir bölge oluşturur bu bölgenin adı yayılım bölgesidir. Eğer pn eklemine ters voltaj uygulanırsa yayılım bölgesi kalınlığı artar. Bu çalışmada kıtlı bölgesinin kalınlığının hesaplanması ve benzeşimi denklemler ve şekillerle gösterilmiştir.

InAs/GaSb tip-II süperörgü yapısına katkılama yapılarak p n eklemi elde edilmiş ve bu tip süperörgüde elektronların kuyuda hollerin bariyerlerde yaratılabilme olasılığı incelenmiştir. Bu tip süperörgü pn eklemine geri besleme sonucunda oluşan elektrondeşik etkileşimlerinin overlapı hesaplanmış ve elektrik alan arttıkça elektron ve hollerin ara yüzeylerde biriktiği ve foton etkileşimi sonucu elektronların katkıya geçebilme olasılığının değişimi Matlab ile gözlenmiş ve farklı elektrik alanlarda karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu tezde önemli olan noktalardan biri ise denklemler Matlab a aktarılmış ve bazı teknikler ile program geliştirme ve performans artırma çalışması yapılmıştır. Elektrondeşik dalga fonksiyonlarını ve overlap'ı yaklaşık 15 saate hesaplayan program süresi 40 saniye civarına düşürülmüştür. Ayrıca neden Matlab kullandığımıza dair bilgiler verilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

Komutlara kullanıcının anlayabileceği bir arayüz programı hazırlanmış, değiştirilmesi gereken parametreler kutular içinde konulmuş ve düzenli bir görünüm sağlanmıştır. Bunun yanında ara yüz programı, Matlab derleyici ile exe uzantılı hale getirilmiş böylece komutları başkaları göremeyeceği ve Matlab kurulu olmadığı halde(Matlabdan bağımsız) çalışabilecek şekilde getirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Sai-Halasz, G.A., Tsu, R., Esaki, L., “New Semiconductor Superlattice”, Appl. Phys. Lett., **30**, 651,1977.
- [2] Wei, Y., Hood, A., Yau, H., Gin, A., Razeghi, M., Tidrow, M. Z., Nathan, V., “Uncooled operation of type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes in the midwavelength infrared range”, Appl. Phys. Lett., **86**, 233106-(1-3), 2005.
- [3] Rogalski, A., Martyniuk, P., “InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors”, Infrared Physics & Technology, **48**, 39-52, 2006.
- [4] Erten, T., *GaSb/InAs Tip-II Süperörgülerde Elektron-Deşik Etkileşimleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [5] Chuang, S.L., *Physics of Optoelectronic Devices*, John Wiley & Sons. Inc., United States of America, 1995.
- [6] Korkmaz, H., *MATLAB Ders Notları*, 2009.
<http://www.ifl.k12.tr/projedosyalar/MATLAB.pdf>
- [7] Savaş, K., *Kontrol sistemleri için MATLAB'te GUI uygulamaları ve tasarımı*, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 2007.
- [8] Seeger, K., *Semiconductor Physics: An Introduction*, Springer, Berlin, 2002.
- [9] Ulu, A.Y., *Al_xGa_{1-x}As/GaAs Nanoyapıların Kimyasal Aşındırma Yöntemi ile İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [10] Tyagi, M.S., *Introduction to semiconductor materials and devices*, Indian Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, 1991.
- [11] Zeghbrock, B. V., *Principle of semiconductor device*, 2007.
<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/welcome.htm>
- [12] Balkanski, M., Wallis, F. R., *Semiconductor physics and application*, Oxford University Press, 2000.

- [13] Kronig, R. L., Penney, W. G., “Quantum Mechanics of Electrons in Crystal Lattices”, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, **130**, 499-513, 1931.
- [14] Tuncer, M. A. Ç, *MATLAB’a Giriş*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Bölümü, 2011.
<http://www.scribd.com/doc/50368255/MATLAB-giris>