

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**InGaAs/GaAs SÜPERÖRGÜ YAPILARININ
MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ (MBE) TEKNİĞİYLE
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Hazırlayan
Halil İbrahim EFKERE**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Aralık 2013
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**InGaAs/GaAs SÜPERÖRGÜ YAPILARININ MOLEKÜLER
DEMET EPİTAKSİ (MBE) TEKNİĞİYLE BÜYÜTÜLMESİ
VE KARAKTERİZASYONU
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**Hazırlayan
HALİL İBRAHİM EFKERE**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. TUNCAY KARAASLAN**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FBY-11-3475 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

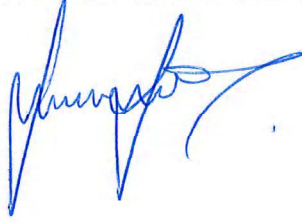
**Aralık 2013
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

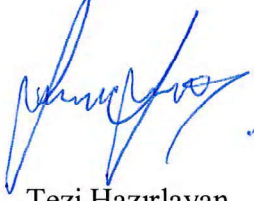
Adı-Soyadı: Halil İbrahim EFKERE

İmza :



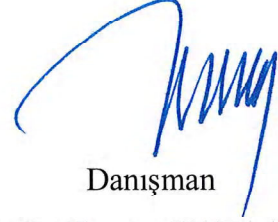
YÖNERGEYE UYGUNLUK

InGaAs/GaAsSüperörgü Yapılarının Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Tekniğiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



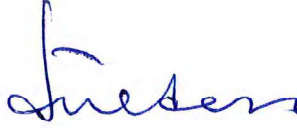
Tezi Hazırlayan

Halil İbrahim EFKERE



Danışman

Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN



Fizik Bölümü ABD Başkanı

Prof. Dr. Ayhan GÜLDESTE

Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN danışmanlığında **Halil İbrahim EFKERE** tarafından hazırlanan “InGaAs/GaAsSüperörgü Yapılarının Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Tekniğiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

20 /12 /2013

JÜRİ:

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN

Üye :Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Üye :Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 07/01/2014 tarih ve 2014/01-10 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kazım KEŞLİOĞLU
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Hayatı tanıyıp “düzgün insan” kisvesinde bana en doğruyu öğretmeyi kendilerine düstur edinmiş olan, benliğimin temelini atan AİLEME teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bilgi birikimiyle desteğini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN ve Sayın Prof. Dr. Sema ÖZTÜRK YILDIRIM’a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatıma farklı bakış açıları katan, büyüklüğünü, bilgeliğini benden esirgemeyen değerli hocam, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK’e minnettarlığımı bildiririm.

Gerek tez gerekse proje çalışmalarında zamanını ve emeğini benden esirgemeyen, bir abla edasıyla daima yanımda olan Sayın Arş. Gör. Dr. Saime Şebnem ÇETİN’e şükranlarımı bildiririm.

Bir öğretici ve abi olan maddi manevi desteğini daima hissettiğim Sayın Uzm. Tarık ASAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen, Hocalarım; Sayın Prof. Dr. Tofig MEMMEDLİ, Doç. Dr. M. Kemal ÖZTÜRK’e teşekkür ederim.

Gazi FOTONİK’te edindiğim kıymetli dostlarım Barış KINACI, Umut AYDEMİR, Kürşat KIZILKAYA, Ersin ÇİÇEK, Emre ERBAY, Ü. Ceren BAŞKÖŞE, Gürkan KURTULUŞ ve Emre PİŞKİN’e ve diğer tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca varlıklarıyla hayatıma renk katan, ömrümün tadı tuzu olan dostlarım Soner BALIK, İsmail DENİZ, Gökhan YAZICI ve sevgili eşi Melek YAZICI ve Mehmet TOFAR’a teşekkür ederim.

Bu çalışma FBY-11-3475 nolu BAP-Erciyes Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

**InGaAs/GaAs SÜPERÖRGÜ YAPILARININ
MOLEKÜLER DEMET EPİTAKSİ (MBE) TEKNİĞİYLE
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Halil İbrahim EFKERE

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2012
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Tuncay KARAASLAN**

ÖZET

Yarıiletken malzemeler 1940'lerden beri araştırılmakta ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen elektronik araçlar günlük hayatımızda, askeri ve uzay teknolojisinde kullanılmaktadır. Elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarıiletken malzemelerden yapılırlar.

Doğada saf olarak bulunmayan yarıiletken ince filmler yapay tekniklerle üretilmektedir. Bu tekniklerin günümüzde yaygın olarak kullanılanları; Buhar Faz Epitaksi (VPE), Kimyasal Buhar Birikimi (CVD) ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) şeklinde sıralanabilir.

Tez çalışmamızda Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK) bünyesinde bulunan Türkiye'nin en gelişmiş ve en donanımlı sistemi olan Moleküler Demet Epitaksi-VG80H kullanılmıştır. Bu yöntemi diğer büyütme yöntemlerinden üstün kılan özellikler katkı konsantrasyonunun belirlenmesi, büyütme sırasında yüzeyin kontrol edilmesi, çevreye zararlı maddelerin yayılmaması ve kalınlık hassasiyetinin ayarlanmasının oldukça ileri düzeyde oluşturulabilmesidir.

Tez çalışmamızda elektronik ve optoelektronik cihazların yapımında kullanılabilecek olan III-V yarıiletkeninden GaAs ve üçlü yarıiletkeninden InGaAs çoklu kuantum yapısı MBE tekniği kullanılarak büyütüldü. Büyütülen bu malzemenin X ışını kırınımı (HR-XRD), elipsometre, fotolüminesans (PL) teknikleri kullanılarak yapısal ve optiksel özellikleri incelendi.

Anahtar Kelimeler: MBE,HR-XRD, Elipsometri, Fotolüminesans, InGaAs, GaAs, Gazi FOTONİK

**GROWTH AND CHARACTERIZATION of InGaAs / GaAs SUPER LATTICE
STRUCTURES GROWN via MOLECULAR BEAM EPITAXY (MBE)**

Halil İbrahim EFKERE

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc Thesis, June 2012

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Tuncay KARAASLAN

ABSTRACT

Semiconductor materials developed since the 1940s as a result of this research study, and electronic gadgets in our daily lives, are used in military and space technology. Transistors used in electronic products, such as rectifier diodes in solar cells, made from semiconductor materials.

Not found in nature as a pure semiconductor thin films can be produced artificially techniques. These techniques are widely used today; Vapor Phase Epitaxy (VPE), Chemical Vapour Deposition (CVD) and Molecular Beam Epitaxy (MBE) are listed in the form.

The thesis study, Gazi University Photonics Research Center (Gazi FOTONİK) equipped with an on-site system is the most developed and the most used in the Molecular Beam Epitaxy-VG80H. Contribute to the characteristics that make this method superior to other methods of determining the concentration of enlargement, enlargement of the surface during the control and the spread of harmful substances in the environment and adjusting the sensitivity of thickness to form a fairly advanced level.

In our thesis, which can be used in making electronic and optoelectronic devices, semiconductors GaAs and InGaAs multiple quantum structure grown using the MBE technique. Magnified this material, X-ray diffraction (HR-XRD), elipsometer, photoluminescence (PL) techniques were evaluated for the structural and optical properties.

Keywords: MBE, HR-XRD, Elipsometry, Photoluminescence, InGaAs, GaAs, Gazi FOTONİK

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
ONAY	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
KISALTMA VE SİMGELER.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1

BÖLÜM 1

1. YARIİLETKENLER.....	4
1.1. III-V Grubu Yarıiletkenler	5
1.1.1. Çoklu Yapılı Yarıiletkenler	7
1.2. p-n Eklemler	9
1.3. p-i-n Yapı	9
1.4. Yarıiletken Süperörgüler.....	12
1.4.1. Süperörgü Yapıların Doğuşu.....	12
1.5. Süperörgü Yapıları	13
1.6. Çoklu Kuantum Kuyuları (MQW) ile Süperörgüler (SL)	14

BÖLÜM 2

2. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER.....	17
2.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi	17
2.1.1. VG-Semicon V80H-MBE sistemi:.....	19
2.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD).....	21
2.3. Spektroskopik Elipsometre (SE)	24
2.4. Fotoluminesans (PL)	27

BÖLÜM 3

3.YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI:

BULGULAR	29
3.1. Yapıların Büyütülmesi.....	29
3.1.1. p-n Eklem Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi	29
3.1.2. GS261 p-n eklem yapısının MBE ile büyütülmesi.....	30
3.1.3. GS262 Süperörgü yapısının MBE ile büyütülmesi.....	33
3.1.4. GS263 Süperörgü yapısının MBE ile büyütülmesi.....	36
3.2. Yapıların Karakterizasyonları.....	39
3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı analizleri.....	39
3.2.2. Spektroskopik elipsometre ölçümleri ve değerlendirilmesi	41
3.2.3. Fotoluminesans ölçümleri ve analizleri	48

BÖLÜM 4

4. TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR	56
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	62

KISALTMA VE SİMGELER

Bu çalışmadakullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Å	Angstrom
Al	Aluminyum
As	Arsenik
Cd	Kadmiyum
DC	Doğru akım
λ	Dalga boyu
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
Hg	Civa
In	İndiyum
Mg	Magnezyum
N	Azot
O	Oksijen
P	Fosfor
Pb	Kurşun
Sb	Antimoni
Se	Selenyum
Si	Silikon
T	Sıcaklık
Te	Tellür
T_s	Büyütme sıcaklığı
x	Kompozisyon oranı
Zn	Çinko

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif Akım
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopi
AlAs	Aluminyum Arsenik
AlN	Aluminyum Nitrat
AlGaAs	Aluminyum Galyum Arsenik
AlGaN	Aluminyum Galyum Nitrat
BEP	Demete eşdeğer basınç
DC	Doğru Akım
GaAs	Galyum Arsenik
GaN	Galyum Nitrat
GaP	Galyum Fosfat
GR	Büyüme hızı
FWHM	Yarı Genişlik
HRXRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı
I-V	Akım-Gerilim
InAs	İndiyum Arsenik
InN	İndiyum Nitrat
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenik
InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenik Fosfat
InGaN	İndiyum Galyum Nitrat
InGaP	İndiyum Galyum Fosfat
InGaSb	İndiyum Galyum Antimoni
InP	İndiyum Fosfat
InSb	İndiyum Antimoni
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
p-i-n	Pozitif-Katkısız-Negatif

Kısaltmalar	Açıklama
p-n	Pozitif-Negatif
PV	Fotovoltaik
RF	Radyo Frekansı
RHEED	Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı
RTA	Hızlı Termal Tavlama
SC	Güneş Hücresi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SIMS	İkincil İyon Kütle Spektrometresi
QW	Kuantum Kuyusu
QWSC	Kuantum Kuyulu Güneş Hücresi
UHV	Ultra Yüksek Vakum
UV-VIS	Morötesi-Görünür Bölge

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler [22]	5
Tablo 1. 2. İndiyum, Galyum ve Arsenik'in bazı özellikleri	5
Tablo 1. 4. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler.....	9
Tablo 3. 1. Kalibrasyon numunelerinin Hall Etkisi ölçüm sonuçları.....	32
Tablo 3. 2. GS261 p-GaAs/n-GaAs p-n eklem yapısı için akı değerleri.....	33
Tablo 3. 3. GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için akı değerleri	34
Tablo 3. 4. GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için akı değerleri	35
Tablo 3.5. InxGa1-xAs/GaAs yapıları için kritik nokta enerjileri ve genişleme parametreleri.....	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Farklı tipteki çoklu yapılı yarıiletkenler.	8
Şekil 1. 2. p-i-n yapısının şematik gösterimi	100
Şekil 1.3.p-i-n yapının (a) sıfır ve (b) V_0 ters beslem altında enerji-bant diyagramı.....	111
Şekil 1.4.a) Katkılı ve b) bileşimli süperörgülerin iletim ve valans band gösterimi [32].	12
Şekil 1.5. Atomlar arasındaki periyodik potansiyelin gösterimi.....	133
Şekil 1.6.Periyodik süperörgü potansiyeli görünümü (büyüme yönelimi süperörgü eksenine diktir).	134
Şekil 1. 7. Süperörgüdeki mini bantlar.....	144
Şekil 1. 8. MQW ile SL yapılarının şematik gösterimi.....	145
Şekil 1. 9. Heteroyapı arayüzeylerinin 4 temsili tipinin şematik gösterimi	158
Şekil 1. 1. MBE işleminin şematik diyagramı	189
Şekil 1. 2. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi.....	20
Şekil 1. 3. Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması	21
Şekil 1. 4. Çift kristal X-ışını kırınım düzeneği	22
Şekil 1. 1. GS261 p-n eklem yapısı.....	31
 Resim 3. 1. Gazi FOTONİK’de bulunan V80H model MBE sistemi.....	20
Resim 3. 2. Bruker D8 discover cihazının genel görünümü	24
Resim 3. 3. Spektroskopik elipsometre cihazı	26
Resim 3. 4. Kullanılan fotoluminesans düzeneği.....	28

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler 1940'lerden beri araştırılmakta ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen elektronik cihazlar sivil, askeri ve uzay teknolojisinde kullanılmaktadır. Yarıiletken aygıtlar, yapay büyütme tekniklerinin gelişimine bağlı olarak gün geçtikçe yeni ve üstün özelliklere sahip olmakta ve buna paralel uygulama alanları genişlemektedir. Elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de yarıiletken malzemelerin epitaksiyel olarak büyütülmesiyle elde edilirler [1-3].

Yarıiletken yapıların epitaksiyel olarak büyütülebilmeleri, elektro-optik cihazların üretimi ve üstün özellikli olarak gelişmesinde en önemli role sahiptir. Son yıllarda, tek-kristal tabakaların yönlendirilmiş olarak elde edilebilmelerini sağlayan yarıiletken kristal büyütme tekniklerinde oldukça gelişme sağlanmıştır. Atom ya da moleküllerin bir alttaş üzerine yönlendirilmesi temeline dayalı bu tekniklerin en gelişmiş olanları; Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE) veya Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD), Sıvı Faz Epitaksi (LPE) olarak sınıflandırılabilir [4-7]. Farklı türdeki yarıiletkenlerin bileşimlerinin çeşitli alttaşlar üzerine büyütülmeleri mümkündür. Üstün kalitede yarıiletken büyütülmek için alttaş ve üzerine büyütülecek tabaka arasında örgü sabitlerinin ve termal genleşme katsayılarının uyumu gereklidir. Örgü uyumlu yapıların büyütülebilmesi için “kritik kalınlık” önemli bir parametredir [8]. Kritik kalınlığın altındaki yapılar gerilmeli yapılar olacaktır. Ayrıca, kristal büyütme tekniklerinin, tabaka kalınlık kontrolü, katkı oranlarının uygun oluşturulması ve ara-yüzey kalitesinin sağlanabilmesi açısından, seçimi önemlidir. MBE ultra yüksek vakum şartlarında kristal büyütme tekniğidir. İlk kez 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. Bu yöntem, katkı konsantrasyonunun ve katman kalınlığının hassas olarak belirlenmesi, çeşitli iç karakterizasyon cihazlarının kullanımına izin vermesi, büyütme sırasında yüzeyin kontrol edilmesi gibi özellikleri

sayesinde diğ er büyütme yöntemlerine göre üstünlüklere sahiptir [4]. MBE sistemi daha çok AlGaAs, InGaAs, InGaAsP gibi GaAs tabanlı yapıların büyütülmesinde kullanılmakla birlikte seyreltik nitrit tabanlı yapıların (AlGaAsN, InGaAsN, vb.) büyütülmesinde de kullanılmaktadır. Yüksek vakum gerektirmeyen MOCVD sistemi ise daha çok AlGaIn, InGaIn, GaIn gibi nitrit tabanlı yapıların büyütülmesinde başanlı sonuçlarıyla dikkat  ekmettedir.

Yarıiletken  oklu-yapılar, tekli kuantum kuyu (QW),  oklu kuantum kuyu (MQW) ve süperörgüler (SL); modern elektronik ve opto-elektronik cihazların ve bunlarla ilişkili teknolojinin köşe taşlarını oluşturmaktadır. Yarıiletken malzemelerin MBE gibi yöntemlerle elde edilebiliyor olması ile yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMT), kuantum kuyu lazer diyotlar (LD), dedektörler, güneş pilleri (SC) ve ışık yayan diyotlar (LED) gibi aygıtların teknolojik gelişimleri hızlı bir şekilde yol almaktadır. Bu aygıtların performansı kristal büyütme süreçlerine bağlı olan kristal yapıların düşük kusur yoğunluğu, alaşım oranının kesinliği, homojenliği, katkılama d zg nl ğu gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle kristal büyütme süreçlerinin optimizasyonu önem taşır.

Epitaksiyel olarak büyütülen yapılardan aygıt üretimi için  n adım, bu tabakaların iyi bir şekilde karakterize edilmesidir. Bu karakterizasyon genel anlamıyla yapıların, yapısal, optik, elektronik ve manyetik özelliklerinin belirlenmesi ile mümkündür. Elektronik ve opto-elektronik cihazların üretimi ve geliştirilebilmesi, epitaksiyel tabakaların kalitesini içeren çeşitli parametrelerin hassas olarak belirlenmesine bağlıdır. Bu parametrelerden başlıcaları; epi-tabakaların kristallik kalitesi, gerilmeler, kimyasal kompozisyon (alaşım oranı), taşıyıcı yoğunlukları, ara-yüzey durumları, enerji bant yapısı, kritik enerji noktaları ve bant aralığı olarak verilebilir. Epitaksiyel büyütme tekniklerinde bu parametrelerin belirlenebileceği i  ölçüm teknikleri sınırlıdır. Bu nedenle bu parametrelerin büyütme sonrası belirlenmesi için bazı deneysel ölçüm sistemleri gereklidir.  l  m sistemlerinde, büyütülen yapıya zarar vermeyen sistemler tercih edilir. Kristal kalitesi, alaşım oranı ve tabaka kalınlığı gibi yapısal parametreler, yarıiletken yapıya zarar vermeyen X-ışını kırınımı tekniği ile hassas olarak belirlenebilmektedir. Bunun için, ince filmlerin yapısal analizlerinde yüksek   z n rl kl  X-ışını kırınımı (HRXRD) [5, 9] sistemi tercih edilmektedir. Kristal yapıların katkı konsantrasyonu, alaşım oranları, atomların farklı katmanlara difüzyonu

ikincil iyon kütle spektrometresi (SIMS) ile başarılı olarak belirlenebildiği bilinmektedir [10-12]. Yapıların bazı elektronik ve optik özelliklerinin belirlenmesi için fotolüminesans (PL) [13, 14] ve spektroskopik elipsometre (SE) [15, 16] yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. PL ile numunelerin bazı safsızlık seviyeleri ve bantlar arası geçişleri belirlenebilmektedir [13]. SE ile ise, enerji-bant yapısındaki çeşitli enerji noktaları, bant aralığı, kırılma indisi, soğurma katsayısı gibi optik parametreler değerlendirilebilmektedir [17].

Bu tez çalışmasında, bir adet GaAs p-n eklem ve iki adet InGaAs/GaAs süperörgü yapısı (farklı alaşım oranlarına sahip) MBE tekniği ile büyütüldü. Büyütülen numunelerin, yapısal ve optik özellikleri; yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) sistemi, spektroskopik elipsometre (SE) ve fotolüminesans (PL) ölçümleri yapılarak belirlendi.

Bu tez çalışmasının; birinci bölümünde, yarıiletken teknolojisinin gelişiminde kristal büyütme ve karakterizasyon tekniklerinin kısa tanımları ve önemi vurgulanarak tez çalışmasında incelenen numuneler için kısa bilgiler sunuldu. İkinci bölümünde, yarıiletkenler, p-n eklemli yapılar ve süperörgüler hakkında bilgiler verildi. Üçüncü bölümünde, kullanılan deneysel teknikler tanıtıldı. Dördüncü bölümünde, yapıların MBE tekniği ile büyütülmesi, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı, spektroskopik elipsometre, fotolüminesans ölçümleri ve değerlendirilmeleri sonucunda numunelerin yapısal ve optik özellikleri belirlendi. Beşinci bölümünde, elde edilen yapısal ve optik analizlerinin sonuçları değerlendirildi.

Bu tez çalışmasında kullanılan numunelerin büyütülmesi ve karakterizasyonları Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (Gazi FOTONİK) bulunan sistemlerle gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 1

1. YARIİLETKENLER

Yarıiletken, iletkenliği yalıtkan ile iletken arasında olan, uyarıldıklarında iletkenlik özelliği gösteren malzemelerdir. Bazen metallere, bazen de yalıtkanlara benzer özellikler gösteren yarıiletken malzemeler gösterdikleri üstün elektro-optik özellikleri nedeniyle tercih edilirler [18,19].

Yarıiletken malzemelerin fiziksel özellikleri genel anlamıyla birbirlerine benzerdir. Bu malzemelerin önemli iki özelliği; serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunmasıdır. Bu malzemelere yapılacak çok düşük orandaki uygun katkı atomları, yapının elektriksel özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilir.

Yarıiletkenlerde, izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır. Bunlar yasak bant aralığı olarak isimlendirilir ve kristal örgünün periyodikliği nedeniyle meydana gelirler. Bu yasak bant aralığı yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri yasak bandın alt ve üst bölgelerinde yer alır. Yasak bandın altındaki bağlı elektronların meydana getirdiği enerji bölgesi valans bandı ve üstündeki serbest elektronların meydana getirdiği enerji bölgesi de iletkenlik bandı olarak isimlendirilir [19].

Sıcaklığın 0 °K olduğu durumda, tüm elektronlar/taşıyıcılar valans bandında bulunurlar. Bu durumda iletkenlik bandında birçok boş enerji seviyeleri vardır. Dolayısıyla, uygulanan bir potansiyel farkı valans bandındaki elektronların kolaylıkla iletkenlik bandına hareket etmelerini sağlayabilir. Bütün bu hareketlenmeler, yarıiletkenlerin iletkenliğini değiştirir. Bu iletkenlik genellikle; sıcaklık, aydınlatma, manyetik alan

etkisi, basınç ve safsızlık atomlarının konsantrasyon niceliklerine bağlıdır. Yarıiletken malzemelerin iletkenliklerini etkileyen bu faktörler, malzemelerin elektronik uygulamalardaki kullanıma elverişliliğini sağlar [20].

Yarıiletken malzeme çalışmalarına 19. yüzyılın başlarında başlanmış ve günümüze kadar, farklı opto-elektronik cihaz geliştirmede kullanılabilen çok sayıda yarıiletken malzeme geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da kullanılmış olan III-V grubu yarıiletkenler aşağıdaki Tablo 1.1’de verilen elementlerinin uygun şartlarda bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir.

Tablo 1. 1. Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler [22]

Periyot	II. Sütun	III. Sütun	IV. Sütun	V. Sütun	VI. Sütun
•2 •3 •4 •5 •6	•- •Mg •Zn •Cd •Hg	•B •Al •Ga •In •-	•C •Si •Ge •Sn •Pb	•N •P •As •Sb •-	•O •S •Se •Te •-

1.1. III-V Grubu Yarıiletkenler

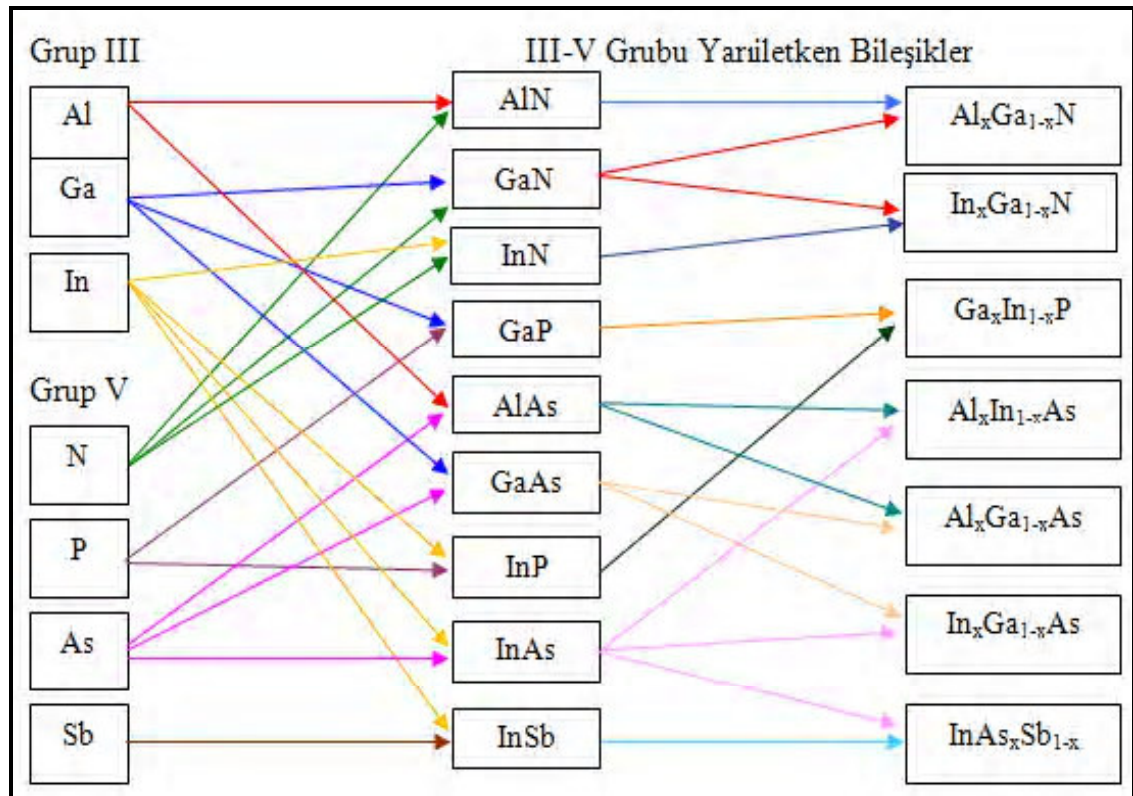
III-V grubu yarıiletkenleri oluşturan grup III elementleri İndiyum (In), Galyum (Ga) ve Alüminyum (Al), Grup V elementleri ise Azot (N), Arsenik (As), Fosfor (P) ve Antimoni (Sb)’dir. Bu tez kapsamında kullanılan In, Ga ve As elementlerinin özellikleri Tablo 1.2’de verildi.

Tablo 1. 2. İndiyum, Galyum ve Arsenik’in bazı özellikleri

Adı	Sembolü	Atom Numarası	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Yoğunluğu (g/cc)
İndiyum	In	49	156,76	2073,0	7,31
Galyum	Ga	31	29,9	2403,0	5,907
Arsenik	As	33	808,0	603,0	5,72

III-V Grubu bileşiklerinden GaAs, InP, AlGaAs ve InGaAs, AlGaN tipik yarıiletken bileşimlerdir. Bu yapılar III ve V gruplarına ait elementlerin uygun oranlarda birleşmesi ile oluşmaktadır. III ve V gruplarına ait elementlerin yarıiletken bileşikleri Tablo 1.3’de verildi [23].

Tablo 1. 3. III-V grubu yarıiletken bileşimler



Ga atomu üç, As atomu beş değerlik (valans) elektronuna sahiptir. Ga atomu üç elektronunu, As atomu da beş elektronunu tetrahedral kovalent bağa katar. Bu gruptaki bağlanma tam olarak kovalent olarak adlandırılmaz. Yapıyı oluşturan bileşikteki iki elementin farklı olması, bağ boyunca elektronların dağılımının simetrik olmayışına neden olur. Bu nedenle yük yoğunluğu, atomlardan daha büyük olana doğru kayma gösterir. Bunun sonucu olarak atomlardan biri net bir elektrik yükü fazlalığı taşır. Böyle bir bağ ‘heteropolar’ olarak adlandırılır. Bağdaki elektronların dağılımı, negatifliği fazla olan atoma doğru kayar. GaAs’de; As atomu Ga’dan daha büyük bir negatifliğe sahiptir ve atom başına eksi bir yük fazlalığı vardır. Ga ise pozitif yük fazlalığına sahip olur. Atom başına aktarılan yük, etkin yük olarak bilinir [19].

Bu yük aktarması, III-V grubundaki bağlanmaya iyonik bir görünüm kazandırır. Bu yüzden onların bağlanmaları, kovalent ve iyonik bileşenlerin karışımıdır. Fakat bu atomların çoğunda kovalent bağ baskın olduğundan III-V grubu bileşikler, polar kovalent karaktere sahiptir.

Yarıiletkenleri iki ana başlık altında inceleyebiliriz;

(i) Elementsel Yarıiletkenler:

Doğal yarıiletken olarak da adlandırılan Ge ve Si elementsel yarıiletkenlerdir. Bu türden yarıiletkenlerde atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır.

(ii) Bileşik ve Alaşım Yarıiletkenler:

GaAs, GaN ve CdTe gibi ikili yarıiletken yapılar bileşik, InGaN, GaAlAs ve InGaAsP gibi üç ve daha fazla elementten oluşan yarıiletkenler ise alaşım yarıiletkenler olarak adlandırılır. Elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı, bileşik yarıiletkenlerde kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmalardan meydana gelir.

Üçlü alaşım yarıiletkenler, bileşik yarıiletken yapılara küçük oranda üçüncü farklı bir elementin ilavesiyle meydana gelen yarıiletkenlerdir. Örneğin; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Burada x, alaşım oranı olarak adlandırılır. Alaşım oranı, üçüncü elementin ne oranda ilave yapıldığını gösterir [21].

1.1.1. Çoklu Yapılı Yarıiletkenler

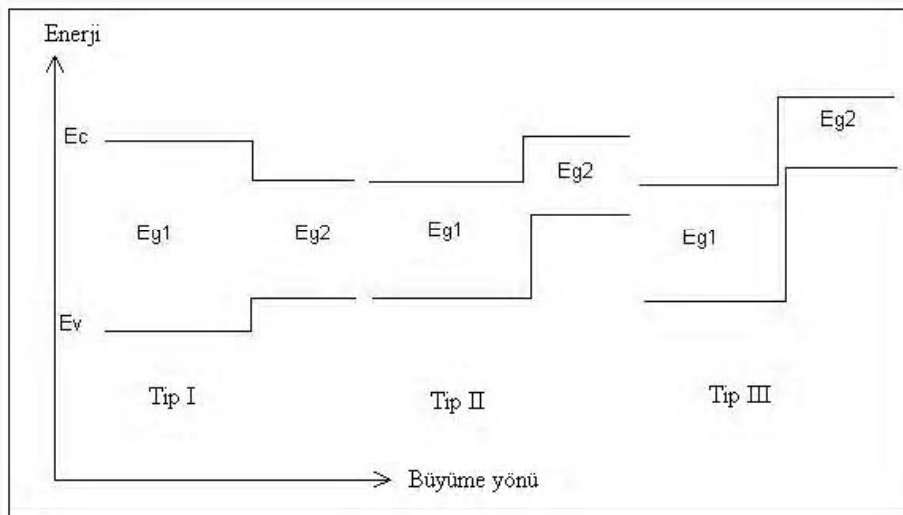
Bir yarıiletkenin üzerine başka bir yarıiletken tabakanın büyütülmesi ile elde edilen yapıya çoklu yapılı yarıiletken denir. Epitaksiyel büyütme teknikleri, monotabaka kadar ince tabakalarla büyütülen çoklu yapıları büyütmek için ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan epitaksiyel büyütme teknikleri; Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD), Metal Organik Buhar Faz Birikimi (MOVPE) , Kimyasal Demet Epitaksi (CBE) , Metal Organik Moleküler Demet Epitaksi (MOMBE)'dir [24,25]. Bir çoklu yapılı yarıiletkenin epitaksiyel büyütülmesini yapmak için, kristal yapıları ve örgü parametreleri uygun olan

malzemeler seçilmelidir. Üç farklı çoklu yapı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi oluşturulabilir.

TİP I : Bu tipte, daha küçük band aralıklı materyalin toplam aralığı daha büyük band aralıklı materyalin valans bandı (V.B.) ve iletkenlik bandı (İ.B.) arasında bulunur.

TİP II : Bu tipte, bant kenarlarından birisi, iki yarıiletkenin bant aralıkları arasındaki farktan daha büyüktür.

TİP III : Bu tipte, bant kenarlarından biri, daha yüksek band aralıklı malzemenin bant aralığından daha büyüktür [26].



Şekil 1. 1. Farklı tipteki çoklu yapı yarıiletkenler.

Tablo 1.4’de önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler verilmiştir.

Tablo 1. 4. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler.

Element	İkili Bileşik				Üçlü Bileşik	Dörtlü Bileşik
	IV-IV	III-V	II-VI	IV-VI		
Ge (Germanyum)	SiC (Silisyum karbit)	AlAs (Alüminyum arsenit)	ZnO (Çinko oksit)	PbS (Kurşun sülfür)	$Al_xGa_{1-x}As$ (Alüminyum galyum arsenit)	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ (Alüminyum indiyum arsenik fosfat)
Si (Silisyum)		GaAs (Galyum Arsenit)	ZnS (Çinko sülfür)	PbTe (Kurşun tellür)	$In_xGa_{1-x}As$ (İndiyum galyum arsenit)	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ (Alüminyum galyum arsenik antimonit)
		GaN (Galyum nitrat)	CdSe (Kadmiyum selenit)		$GaAs_{1-x}P_x$ (Galyum arsenit fosfat)	
		GaP (Galyum fosfat)	CdTe (Kadmiyum tellür)		$Ga_xIn_{1-x}As$ (Galyum indiyum arsenit)	
		InP (İndiyum fosfat)				

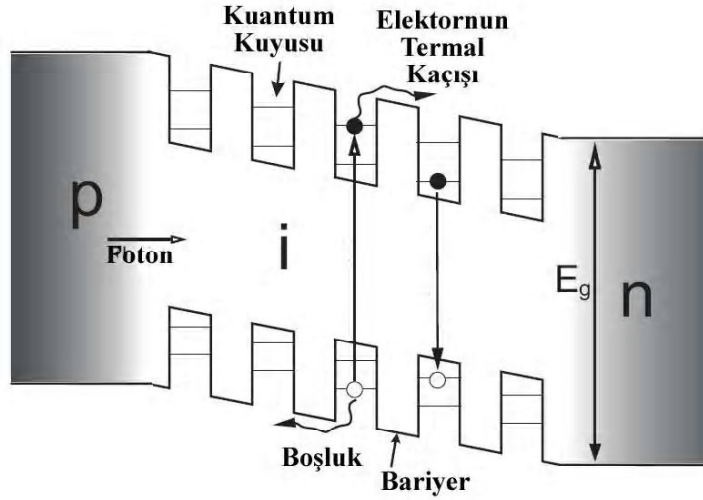
2.2. p-n Eklemler

Hem modern elektronik uygulamalarda, hem de diğer yarıiletken aygıtlar için önemli bir rol üstlenen p-n eklem; elektronik devrelerde doğrultucu, anahtarlama ve diğer işlemlerde oldukça yaygın olarak kullanılır [27]. p-n eklem yapı düzenli beslem ya da aydınlatmaya maruz bırakılırsa, mikrodalga ya da fotonik aygıt şeklinde çalışır. p-n eklemler, çift kutup transistörler ve MOSFET’ler için anahtar blok olarak işlev görür . Eklemler yapılar difüzyon yöntemi, iyon ekimi ve ince film büyüme teknikleri (MOCVD, MBE, ...) ile oluşturulur [4,10].

2.3. p-i-n Yapı

Yarıiletken p-i-n yapı, güneş pilleri, ışıık yayan diyotlar (LED), fotodiyotlar, ve optik modülatörler gibi optoelektronik aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [28]. p-i-n yapı, yüksek katkılanmış p-tipi ve n-tipi malzemeler arasına, sonlu alana ve kalınlığa sahip, saf (yüksek dirençli) katkısız i-bölgesi yerleştirilmesi ile meydana gelir (Şekil

1.2). Bu diyotun optik aktif kısmı i- bölgesidir. p-n eklemnin amacı, aktif bölgeye enjekte edilen elektronların ve deşiklerin sayısını kontrol etmek ve güçlü elektrik alan



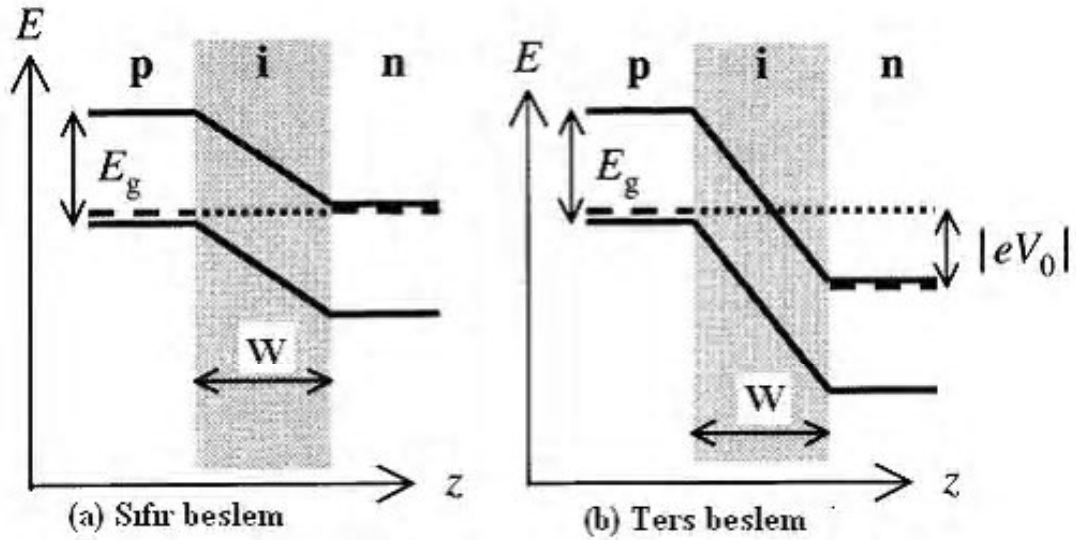
Şekil 1. 2. p-i-n yapısının şematik gösterimi

uygulamalarına izin vermektedir.

p-i-n yapıya dış bir V_0 besleme gerilimi uygulandığında, eklemde tüketim bölgesinin oluşması, p-n fiziğinin önemli bir özelliğidir. Uygulanan V_0 potansiyel farkı, tüketim bölgesinden geçerken azalır. Bunun sebebi tüketim bölgesinin gösterdiği direncin, yüksek katkı konsantrasyonu ile katkılanmış p-tipi ve n-tipi bölgelerle karşılaştırıldığında çok yüksektir. Uygulanan gerilim altında, tüketim bölgesinin genişliği, p-tipi ve n-tipi bölgelerdeki katkı seviyelerinden belirlenir. Yüksek katkı konsantrasyonu, ince tüketim bölgesi genişliği verir.

i-bölgesindeki artık katkı seviyeleri p-i-n yapıda oldukça küçüktür. Bu sayede tüketim bölgesi tüm i-bölgesine genişleyebilir. Kontaklarda oluşturulan ağır katkı seviyelerinden dolayı, tüketim bölgesinin p-tipi ve n-tipi bölgelerin içine doğru genişlemesi, tüketim bölgesinin kalınlığı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bunun anlamı; uygulanan herhangi bir dış potansiyel farkın neredeyse tamamı, i-bölgesine düşer [28]. Şekil 1.3 (a)'da ve (b)'de sırasıyla, p-i-n yapının sıfır beslem ve V_0 ters beslem altında bant diyagramı gösterilmiştir.

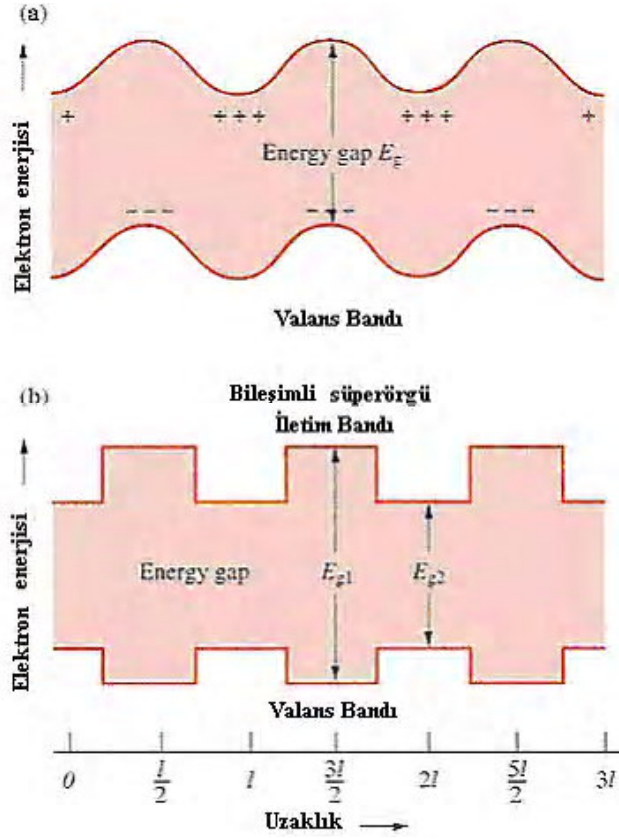
p-tipi ve n-tipi bölgelerinin Fermi enerji seviyeleri sıfır beslem altında, aynı seviyede yer alır. Fermi enerjilerinin bant aralığıyla karşılaştırılması yapıldığında, Fermi enerjisinin daha küçük olduğu kabul edilirse, Şekil 1.3 (a)'dan da görüldüğü gibi, i-bölgesi boyunca E_g/e büyüklüğünde bir gerilim düşmesi vardır.



Şekil 1. 3. p-i-n yapının (a) sıfır ve (b) V_0 ters beslem altında enerji-bant diyagramı

p-tipi ve n-tipi bölgelerin Fermi seviyeleri arasındaki fark $|eV_0|$ ile verilir. Bu olay, ters beslem için yani p-bölgesinden, n-bölgesine göre negatif gerilim uygulandığında, Şekil 1.3 (b)'de gösterilmiştir. Doğru beslem i-bölgesi boyunca gerilim düşmesini azaltırken, ters besleme gerilim düşmesini artırır. Şekil 1.3 (b)'den de görüldüğü gibi, i-bölgesi boyunca voltaj düşmesinin büyüklüğü yaklaşık olarak $|V_{bi}-V_0|$ 'dır [28].

1.4. Yarıiletken Süperörgüler



Şekil 1. 4. a) Katkılı ve b) bileşimli süperörgülerin iletim ve valans band gösterimi [32].

1.4.1. Süperörgü Yapıların Doğuşu

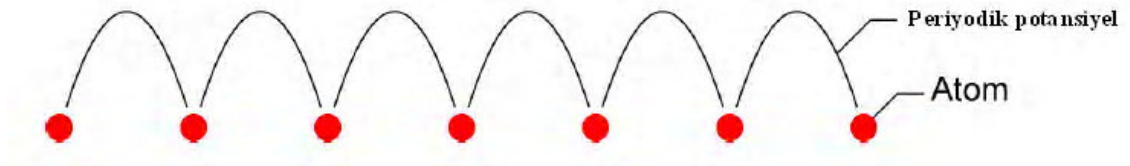
Yarıiletken teknolojisi çalışmalarında önemli bir yeri olan süperörgü yapılarının doğuşu 1970'li yılların ilk dönemlerine dayanmaktadır [29,30]. Tek boyutlu periyodik potansiyel çalışmaları yarıiletken süperörgülerin başlangıcını oluşturmuştur. Çok ince tabakaların epitaksisinin kontrolünde aşağıda gösterildiği gibi katkılı ve bileşimli olmak üzere 2 tip süperörgü yapısı düşünülmüştür [31].

Katkılı ve bileşimli süperörgülerin iletim ve valans bandı Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Süperörgü yapılarda, kuantum kuyularına göre daha dar olan bariyer genişliği bulunmaktadır. Bu dar bariyer genişliği, yüklü parçacıkların bir kuyudan diğer kuyuya tunelleyebilmelerine imkân sağlamaktadır. Yani kuantum kuyusu içerisindeki elektron ve boşlukların dalga fonksiyonlarının kuyukları dar bariyerleri rahatlıkla aşabilmekte

ve komşu kuyulara geçebilmektedir. Taşıyıcı konumdaki elektron ve boşluklar küçük bantların bir serisine yerleşir ve paralel iletim hacimli yapıdakine benzerlik göstererek baskın hale gelir. Dolayısıyla dikey hareket bu tip yapılarda artar.

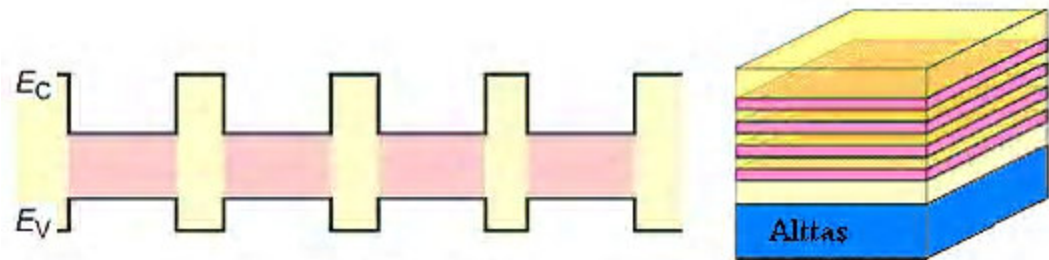
1.5. Süperörgü Yapıları

Kristal örgüde atomlar düzenli bir şekilde yer alır. Dolayısıyla periyodik potansiyel (Şekil 1.5), izin verilen bantlar ve yasaklanan enerjiler ile oluşur [33]. Tek boyutlu periyodik potansiyel teorisi ilk olarak Kronig-Penney modeliyle ifade edilmiştir. Yarıiletkenlerde bu bantlar valans bandı, yasak band (gap) ve iletim bandı şeklindedir.



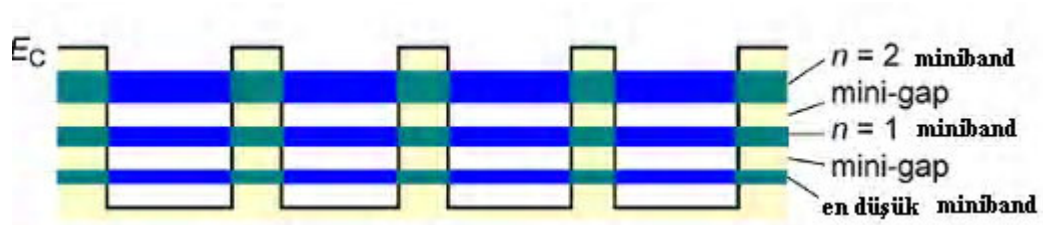
Şekil 1. 5. Atomlar arasındaki periyodik potansiyelin gösterimi

Periyodik potansiyelin iletme etkisi yarı-serbest elektron modeli yoluyla hesaba katılır. Yarıiletken süperörgülerde tek boyutlu periyodik potansiyel iki farklı yarıiletkenin (örneğin GaAs ve InGaAs) sırayla değişmesiyle meydana gelir (Şekil 1.6).



Şekil 1. 6. Periyodik süperörgü potansiyeli görünümü (büyüme yönelimi süperörgü eksenine diktir).

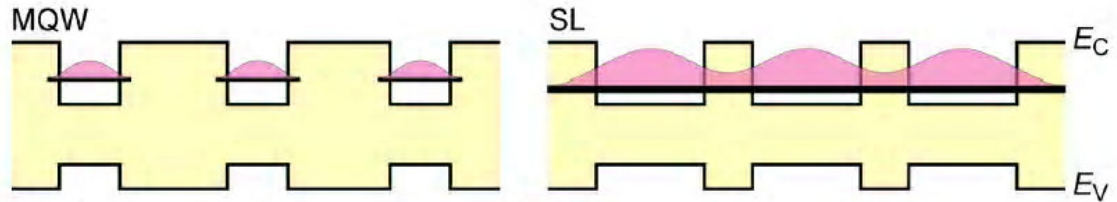
Kristal periyodik potansiyelindeki benzer şekilde izin verilen bandlar ve yasaklanan enerjiler yarıiletkenler periyodik potansiyelinde de meydana gelir. Bu bandlar süperörgüdeki mini-bantlar olarak adlandırılır (Şekil 1.7).



Şekil 1. 7. Süperörgüdeki mini bantlar

1.6. Çoklu Kuantum Kuyuları (MQW) ile Süperörgüler (SL)

Süperörgüde enkel katmanlar oldukça incedir. Bu incelik kuyular arasında tünellemeye imkan sağlayabilir. Süperörgü düzlemlerine dik yönelim boyunca taşıyıcı nakli meydana gelebilir. Çoklu kuantum kuyularda (MQW) bu özellik daha farklıdır. Bu

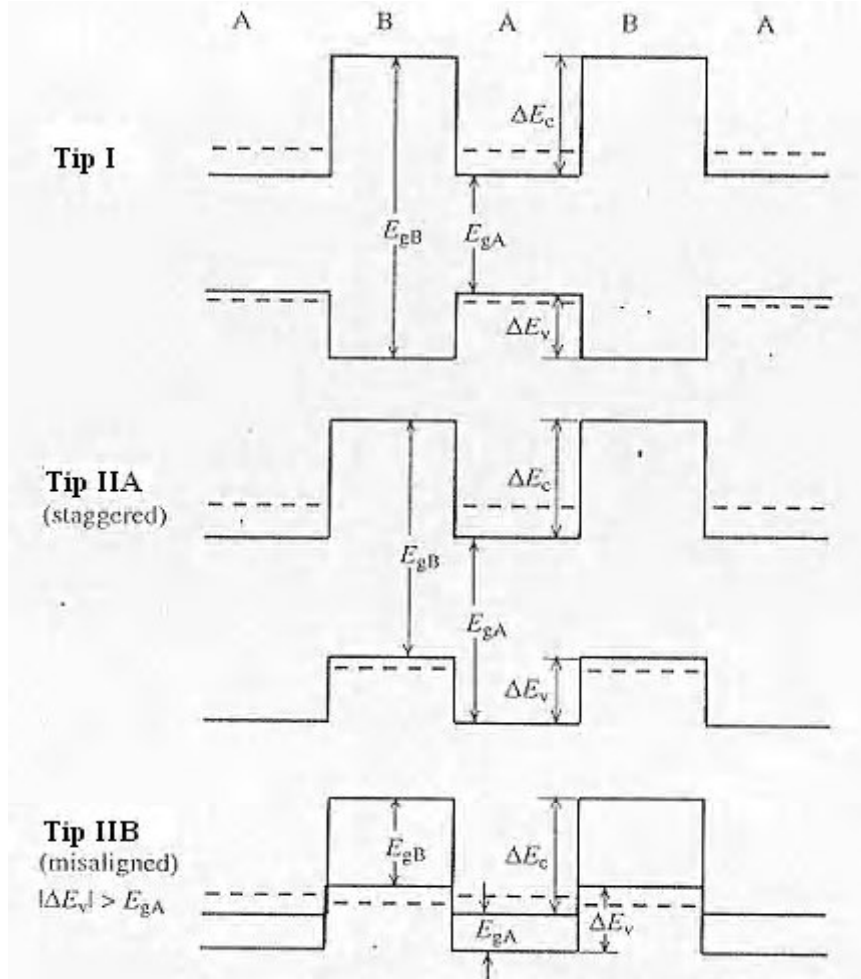


Şekil 1. 8. MQW ile SL yapılarının şematik gösterimi yapılarında dik nakil daha az etkilidir.

Şekil 1.8’de şematik gösterimi verilen çoklu kuantum kuyu (MQW) ile süperörgünün bir çok özelliği aynıdır. Verilen iki yarıiletken A ve B [$E_g(B) > E_g(A)$ olması şartıyla] B/A/B/A/B/A/B/A....., şeklinde çoklu kuantum kuyusundan meydana gelir. Bu durum şematik olarak Şekil 1.9’da görülmektedir.

Tip1’de MQW’ler veya süperörgülerde elektron ve hollerin her ikisi de aynı A tabakalarında tanımlanır. Bu A tabakası kuyuyu oluşturur. Verilen örneklemede, 1.tip MQW’ler GaAs/AlGaAs tarafından meydana getirilir, GaAs tabaka kalınlığı 2 nm’den

daha büyük veya Al mol oranı 0,3'den daha küçüktür. 2. tip A MQW “uzaysal indirekt yasak enerji aralıklı” yarıiletken olarak isimlendirilir.



Şekil 1. 9. Heteroyapı arayüzeylerinin 4 temsili tipinin şematik gösterimi

Elektronlar bir tabakada tanımlandığında, holler farklı bir tabakada tanımlanır. GaAs tabaka kalınlığı 2 nm'den daha küçük olduğunda, 2. tip A MQW'ler veya SL'ler, GaAs (A) ve AlAs (B)'den oluşur. Küçük kuyu genişliği AlAs'da iletim bandı minimumunu tanımlamak için GaAs'da elektron enerjisine neden olur. Sonuç olarak, holler hala GaAs tabakalarında tanımlandığında, elektronlar AlAs tabakalarında tanımlanır. 2. tip B MQW, sıfır-aralıklı (gap) yada küçük aralıklı yarıiletkenler gibi davranır. Bu şekilde bir davranma A tabakasındaki elektronlar ve B tabakasındaki holler arasında enerji aralığı çok küçük olduğunda gösterilir. InAs/GaSb, Tip2 B davranışındaki süperörgüye

örnektir. Sonuç olarak, MQW ve süperörgüler belirlenen iki yarıiletken den meydana gelebilir fakat farklı olarak katkılanabilirler [33].

BÖLÜM 2

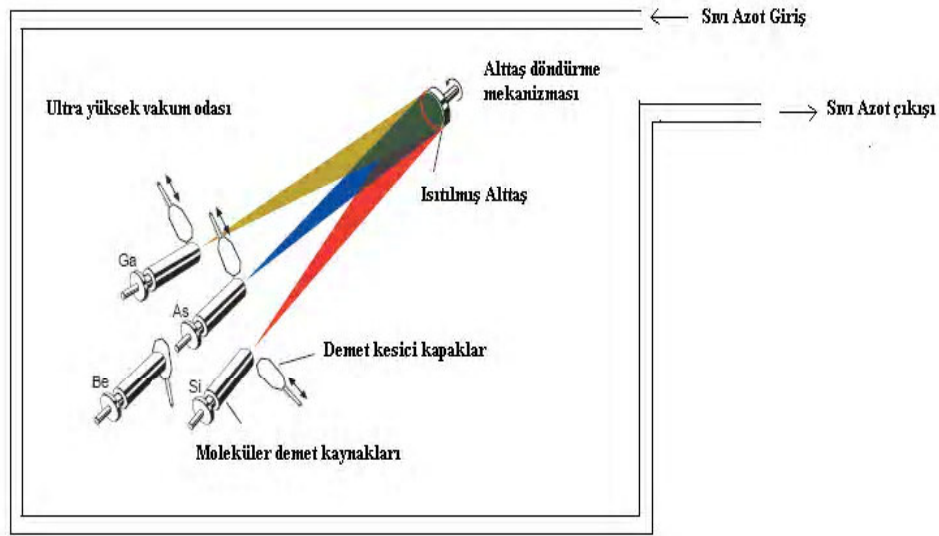
2. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

Bu tez çalışması kapsamında, GaAs p-n eklem ve GaAsP/GaAs süperörgü yapıları Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi ile büyütüldü. Büyütülen bu numunelerin yapısal ve optik özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD), fotoluminesans (PL) ve spektroskopik elipsometre (SE) ölçümleri ile karakterize edildi. Bu bölümde, çalışmamızda kullanılan büyütme ve analiz yöntemleri, kullanım amacına yönelik olarak tanıtıldı.

2.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi

MBE yöntemi; kuantum kuyuları, kuantum noktaları, süperörgüler, fotodedektör yapıları gibi kuantum devrelerinin yapısını oluşturan yarıiletken çoklu yapılarının hassas bir şekilde büyütülmesini sağlayan bir kristal büyütme tekniğidir. MBE tekniğinin geliştirilmesi fizik dünyasında, özellikle de yarıiletken fiziğinde önemli bir yer edinmiştir. MBE esas olarak bir vakumda buharlaştırma tekniğidir ve yüksek kalitede ince film büyütme için kullanılır [4, 34]. MBE yönteminin iki önemli özelliği vardır. Birincisi, ultra-yüksek vakuma sahip olmasıdır (toplam basınç $< 10^{-10}$ Torr). İkincisi ise; üretilen filmlerin tek kristal özelliğinde olmasıdır. Termal Knudsen kaynaklarında uygun elementlerin buharlaştırılmasıyla üretilen moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. Temel olarak MBE işleminin şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Büyütülmek istenilen yapının elementleriyle yüklenmiş olan kaynakların sıcaklığı istenilen alaşım oranını elde edecek şekilde ayrı ayrı ayarlanmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere kaynaklar, büyütülecek filmin homojenliğini sağlayabilmek amacıyla ısıtılmış alttaşın karşısında, uygun bir geometride tasarlanmıştır. Ayrıca büyütme anında alttaşın döndürülmesi yine homojen

bir film elde edilmesi hususunda önem arz etmektedir. Büyütülen filmin istenilen kalınlıkta olabilmesi için ayrıca kaynaklar ve alttaş arasında mekanik kapaklar (kaynak kesicileri) bulunmaktadır. İçerisinden sıvı azot akışı sağlanan bir panel ile kaynaklar ve büyütme işleminin yapıldığı oda (büyütme odası) çevrilidir. Böylece hem kaynak hücreler arasında olabilecek ısı alışverişinin engellenmesi, hem de ortamdan gelerek büyütülen filmde safsızlık oluşturabilecek kirliliklerin tuzaklanarak asgari seviyeye inmesi sağlanır.



Şekil 2. 1. MBE işleminin şematik diyagramı

MBE yönteminin üstünlükleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

MBE yönteminde, büyütme oranının $1\mu\text{m/saat}$ veya *tekkatman/saniye* civarında olması hedeflenir. Büyütme oranının, bahsedilen bu değer civarında olması, yapılmak istenen yapıya istenilen biçimde birleşim ve katkı atomu oranı ayarlanabilme imkânını sunar. Bu büyütme oranından daha hızlı büyütme ile yapılan tekniklerde bunu sağlamak neredeyse imkânsızdır. Bununla birlikte, düşük büyütme oranı film büyütme işleminde uzamaya neden olduğundan bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Bu duruma ek olarak, kaynak kesicilerinin de hareketini 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlaması, büyütme oranının ayarlanmasında, istenmeyen tabakaların büyütülmesinin önüne geçilebilir.

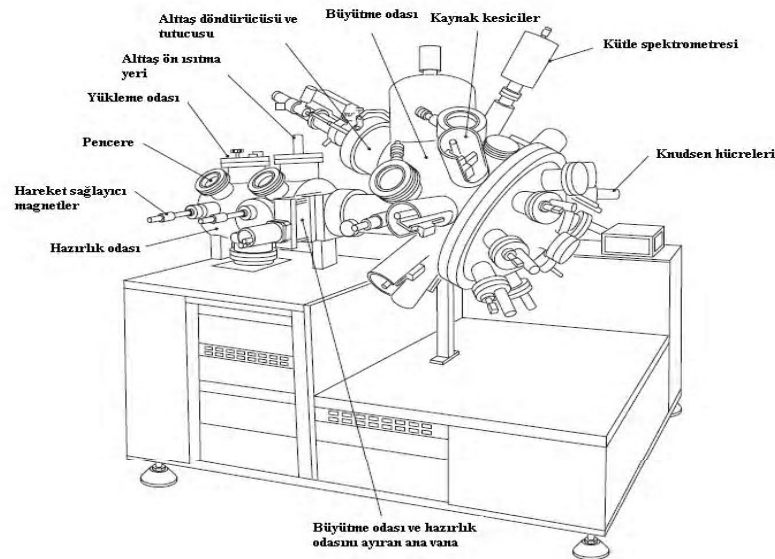
MBE yönteminde diğer büyütme yöntemlerine göre büyütme sıcaklığı daha düşüktür. Bu üretilen numunede film tabakalarını oluşturan elementlerin birbirleri arasında meydana gelebilecek difüzyonun ortadan kaldırılmasına olanak verir.

MBE sistemine eklenebilecek elipsometre, XPS gibi cihazlarla büyütme işleminden önce, büyütme işlemi sırasında ve ya büyütme işleminden sonra epitaksiyel katmanların kimyasal ve yapısal özelliklerini analiz edilebilir.

MBE sistemlerinin diğer büyütme sistemlerine olan en önemli üstünlüğü, büyüme oranını, yüzey morfolojisini büyütme süresince kontrol ve analiz etmeye yarayan yüksek enerjili elektron kırınımı yansıma sistemine (RHEED) sahip olmasıdır. RHEED sistemi ile alttaş yüzeyi gözlenerek, oksit tabakanın temizlenme durumu, yüzey yapılanması gibi kristal büyütme uygun yüzey oluşumu gözlenerek değerlendirilebilmektedir. Günümüz teknolojisinde büyütme işlemi gelişmiş yazılımlar sayesinde tam otomatik olarak kontrol edilip büyütme işlemi hatasız yapılabilmektedir.

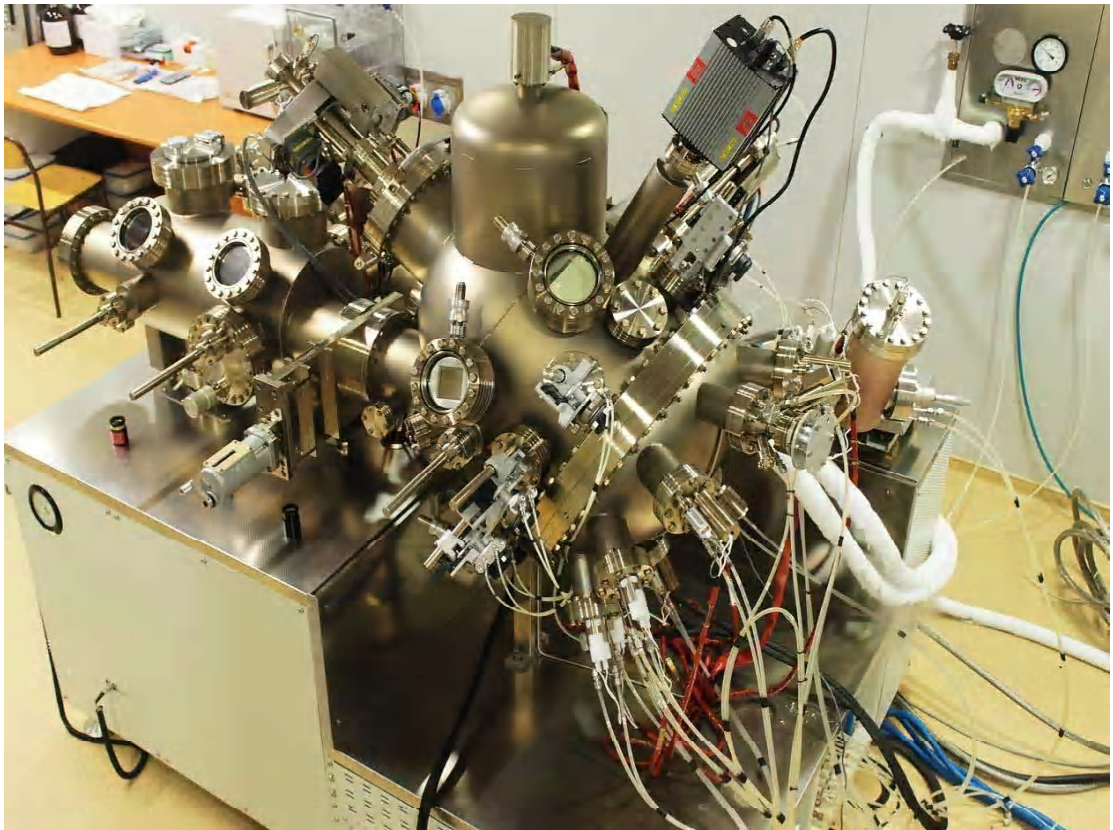
2.1.1. VG-Semicon V80H-MBE sistemi:

Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (Gazi FOTONİK) kurulu olan VG-Semicon V80H-MBE sisteminin resmi Resim 2.1 ve çizimi Şekil 2.2'de gösterildi.



Şekil 2. 2. VG-Semicon V80H-MBE Sistemi

MBE sistemi; büyüme odasını, yükleme odasını, hazırlık odasını, transfer mekanizmasını, bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme, hazırlık ve büyüme odası ultra-yüksek vakum şartları altında tutulmaktadır. Büyütme odasında; alttaşı ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaşı döndürücü, alttaşı yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreleri, kesicileri, RHEED cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, akı ölçümü için iyon sayacı ve gözlem pencereleri bulunmaktadır.



Resim 2. 1. Gazi FOTONİK’de bulunan V80H model MBE sistemi

Hazırlık odasında, transfer mekanizması, hareketli magnetler, yükleme odası ve ilk temizleme bölümü bulunmaktadır.

Yükleme odası asansörlü sisteme sahip alttaşların kasetlik denilen raflara dizildiği kısmı içermektedir. Uygun vakum şartlarında kaset asansörü açılarak alttaşın hazırlık odasına yüklenmesi sağlanır.

Sistemin kontrolü Cyrstal Eyes yazılım sistemi altında çalışan bir bilgisayar tarafından sağlanmaktadır. Isıtıcıların sıcaklıkları, kaynak kesicilerin hareketleri, alttaşın döndürülmesi vs. tüm sistem ekipmanları bu bilgisayar yardımıyla devamlı olarak kontrol edilir.

Büyütme sistemleri için en önem arz eden kısımlardan bir tanesi de vakum odalarıdır. Bu Vakumu sağlayan iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası, turbo moleküler pompası ve soğuk pompa mevcuttur. Ayrıca, sistemde vakumun istenilen düzeyde tutulmasına yardımcı olması ve hücreler arasındaki ısı etkileşmeyi engellemek için büyütme odasının dış kısmında bulunan panel içerisinde sıvı azot dolandırılır.

2.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD)

Kristalleşmiş materyallerin yapısal kalitesini göstermek için kırınım deneyleri teknikleri kullanılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD), ince filmlerin ve katmanlı yapıların yapı karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılır. İnce film numunelerini karakterize etmek için kullanılan HRXRD tekniği ile birim hücrenin şekli, simetrisi ve boyut olarak tayin edilir. Çoklu yapı tabakalardaki ölçümlerde filmde gelen ana kırınım piki çevresindeki uydu pikleri oluşur. Buradan elde edilen bilgiler kullanılarak numunenin kimyasal bileşenleri, kristal tabakanın kalınlığı, örgü kusurları ve örgü uyumsuzluğu gibi özellikler de belirlenebilir [35]. Bütün kırınım deneylerinin temeli Şekil 3.3’de gösterilen Bragg kanununa dayanır ve basitçe Eş. 3.1 ile verilir.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

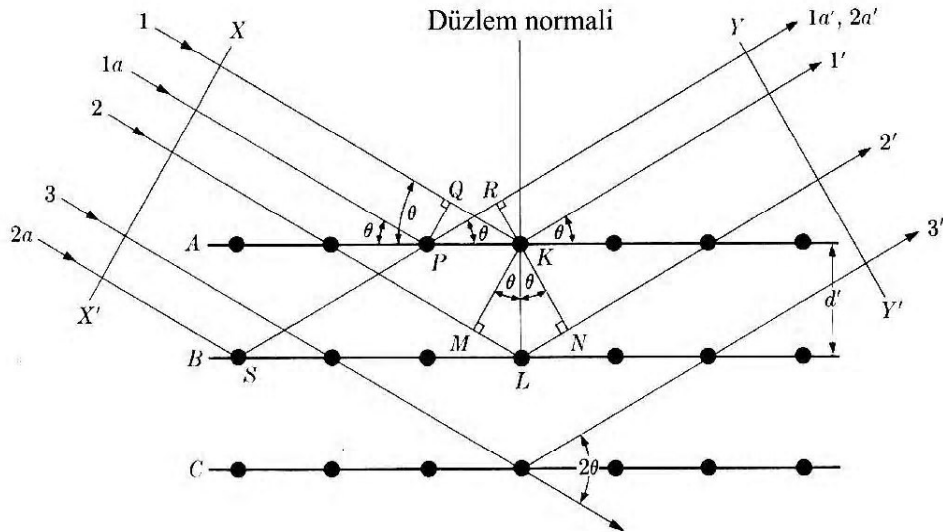
Burada d özdeş düzlemler arasındaki uzaklık ve θ kırınım açısıdır. Teknolojinin ilerlemesiyle gelişmiş deney setlerinde yukarıdaki basit eşitlik kullanılarak yapılan

analizler detaylı yapısal bilgiler verebilir. Ayrıca, kırınım deneyleri hacim (bulk) yarıiletkenlerin örgü sabitleri hakkında da bilgi vermektedir.

Birim hücrenin boyutu a örgü parametresi ile karakterize edilen kübik yapı bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.2)$$

h , k ve l miller indisleri olmak üzere eşitliği ile verilir [9]. Bu temel eşitlikler kullanılarak yapılan analizler malzemeler hakkında detaylı yapısal bilgiler verebilir.



Şekil 2.3 Kristal düzlemlerinden x-ışınlarının saçılması [9]

Örgü parametresi kullanılarak $A_xB_{1-x}C$ epitaksiyel alaşımındaki A elementinin oranı x , Vegard yasası ile belirlenebilir [36]:

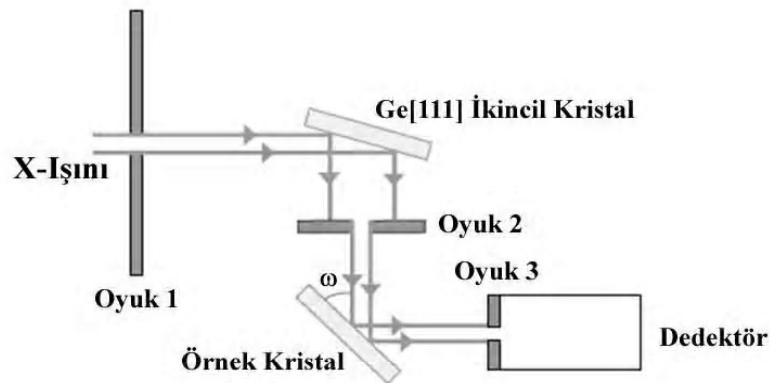
$$a_0 = xa_{AC} + (1-x)a_{BC} \quad (2.3)$$

Burada a_0 , ABC tabakasının örgü parametresi, a_{AC} ve a_{BC} sırasıyla AC ve BC bileşiklerinin örgü parametreleridir. Alaşım oranının belirlenmesi ile ilgili yukarıda verilen ifadeleri de içeren, dinamik kırınım teorisinin Takagi-Taupin denklemlerinin

[37, 38]çözümüne dayanan LEPTOS yazılımı ile [39] deneysel veriler simüle edilerek, yapıların alaşım oranları (x) belirlenebilir.

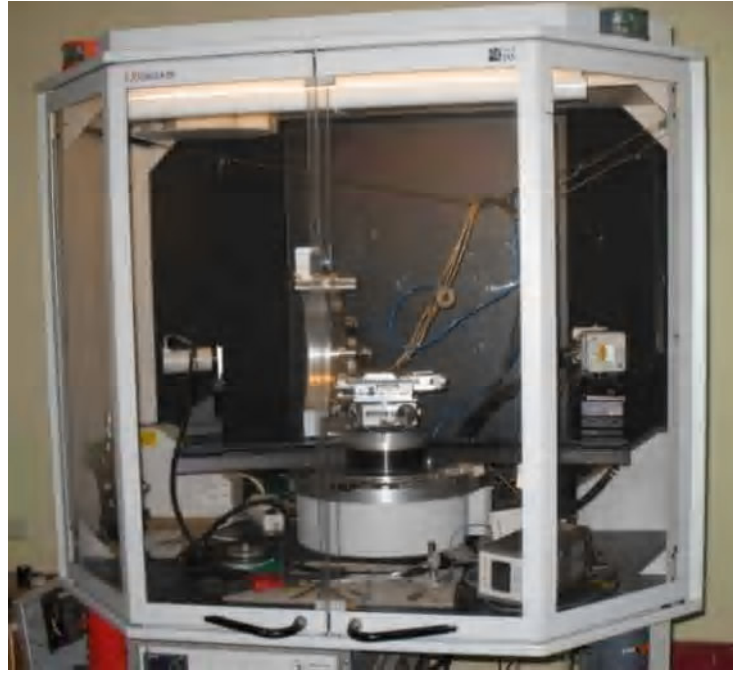
İki ve dört kristalli monochromator ile XRD sistemi, kristalleşmiş nano-teknolojik materyallerin yapısal bilgilerini elde etmek için kullanılan oldukça yüksek çözünürlüklü bir tekniğidir. Bu ölçüm tekniğinin hassaslığı nedeniyle çoklu yapılarda oldukça sık kullanılır. Bu yapılarda HRXRD tekniği, zor, gerilme, örgü rahatlamaları, nano-ölçekte kalınlık ve yüzey pürüzlüğünü elde etmek için uygundur.

Bu teknik için tipik bir ölçüm düzeneği Şekil 2.4’de verilmiştir. X-ışını demeti ilk olarak yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınıma uğrar. Kırınım demeti kristalize örnek üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse oldukça dar bir kırınım deseni gözlenir. Örnek kristalin geniş-aralıkta yapısal dizilimini veren rocking-eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir ω açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir. Yüksek kaliteli kristaller birkaç arc-saniye genişliğinde piklere sahiptirler. Bu teknik özellikle kalın alttaşlar üzerine büyütülmüş ince katman filmler için yararlıdır. Genellikle, bu durumlarda birisi alttaştan ve diğeri ise ince film katmanından gelen iki pik gözlenir. Alttaş ve ince katmanın Bragg yansımaları için $\Delta\omega$ farkı $\Delta\theta$ ve $\Delta\phi$ olmak üzere iki bileşen içermektedir. Alttaş ve katman için $\Delta d/d$ örgü düzlemleri arasındaki fark Bragg açılarındaki $\Delta\theta$ farkına neden olur. $\Delta\omega$ ’nın ikinci bileşeni $\Delta\phi$ ise ince katmanın ve alttaş örgü düzlemlerinin eğiklikleri arasındaki farktır.



Şekil 2.4 Çift Kristal X-ışını kırınım düzeneği [40].

Resim 2.2’de verilen 4 Ge(220) aynalı, $\text{CuK}\alpha_1$ ($1.540\text{\AA}$) kaynaklı yüksek çözünürlüklü Bruker D8 Discover marka X-ışını kırınımı cihazı kullanılarak elde edilen kırınım deseninden, yapıların tabaka kalınlıkları ve alaşım oranları belirlenebilir.



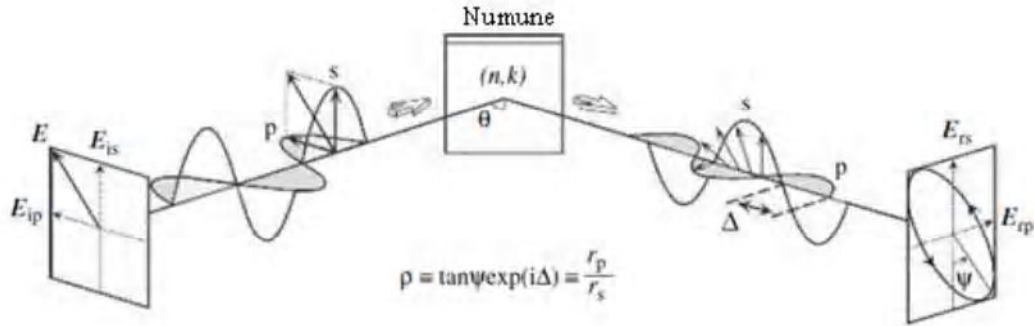
Resim 2. 2. Bruker D8 discover cihazının genel görünümü

2.3.Spektroskopik Elipsometre (SE)

Tüm katı maddelerin (metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar olmak üzere) optik özelliklerini belirlemek için başarılı olarak kullanılan Elipsometre ölçüm tekniği ile filmin kalınlığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı, kristallliği, kompozisyonu gibi özellikleri analiz edilebilmektedir. Ayrıca elipsometrik verilerin analizleri ile yarıiletken katmanların elektronik bant yapısı hakkında bilgiler elde edilebilmektedir.

Elipsometre, numune yüzeyine lineer polarize olarak gönderilen ışığın, yüzeyden yansıdıktan sonra polarizasyonundaki değişimini ölçme ve analiz etme yöntemi olarak tarif edilebilir. Yansıyan ışık, eliptik polarize olduğundan tekniğin adı elipsometre olarak isimlendirilmiştir. Bir elipsometre sisteminde yüzeye gelen ışığın polarizasyonu, yüzeye gelme açısı ve yansıyan ışığın polarizasyonu ile elipsometrik parametreler

olarak bilinen ψ ve Δ nicelikleri Şekil 2.5’de verildi. Burada, ψ p ve s-polarize olmuş ışık dalgalarının genlik oranı, Δ ise faz farkıdır [41].



Şekil 2.5. Elipsometrenin ölçüm prensibi [41]

Elipsometrede gelen ve yansıyan ışık dalgalarının polarizasyon durumları s ve p-polarizasyon koordinatları ile tanımlanır. E_{ip} ve E_{is} gelen ışığın alan vektörünün bileşenleridir. Yansıma sonrasında elektrik alan vektörlerinin doğrultusu, p ve s-polarizasyon için ters yöne döner. Elipsometre analizi için bu değişim önemlidir. Gelen ışığın alan vektör bileşenleri aynı olduğu durumda polarizasyonları arasındaki faz farkı sıfır olur. Yansıma durumunda, p ve s-polarizasyonlarının genlik ve fazları farklıdır. Spektroskopik elipsometrede, (ψ, Δ) spektrumları ışığın dalga boyunun değişimine bağlı olarak ölçülmektedir. Diğer bir ifadeyle, p ve s-polarizasyonları yardımıyla yansıyan ışığın değişimi, polarizasyon durumundaki değişim olarak ölçülür [41].

Elektromagnetik dalga optik sistemlerle etkileştiği zaman ışığın polarizasyon durumu değişir. Elipsometrik parametreler Δ ve Ψ değerleri ile verilir. Genelde, spektroskopik elipsometre ölçümleri morötesi/görünür bölgede uygulanır, ama ölçümler kızılötesi bölgede de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gelme düzlemine paralel polarize yansıma genliğinin (r_p), dik polarize olmuş yansıma genliğine (r_s) oranı,

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} \quad (2.6)$$

olur. Burada ρ elipsometrik bir parametredir ve psi ve delta değerlerine

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (2.7)$$

ifadesi ile bağlıdır [14, 41].

Bu denklemler elipsometrik parametrelerle Fresnel katsayıları, dolayısı ile numunenin optik sabitleri arasında ilişki kurulabileceğini gösterir. Örneğin numunenin dielektrik fonksiyonu, polarizasyonunun değişimi bilgilerinden çıkarılabilir. Numuneye ait dielektrik fonksiyonu,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (2.8)$$

ile verilir [14, 42]. Burada, ε_1 dielektrik fonksiyonun reel kısmı, ε_2 dielektrik fonksiyonun sanal kısmıdır. Dielektrik fonksiyonu,

$$\varepsilon = \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi \frac{(1-\rho)^2}{(1+\rho)^2} \quad (2.9)$$

şeklinde verilen denklem ile elde edilir [14, 42]. Burada, ϕ ışık demetinin geliş açısıdır.



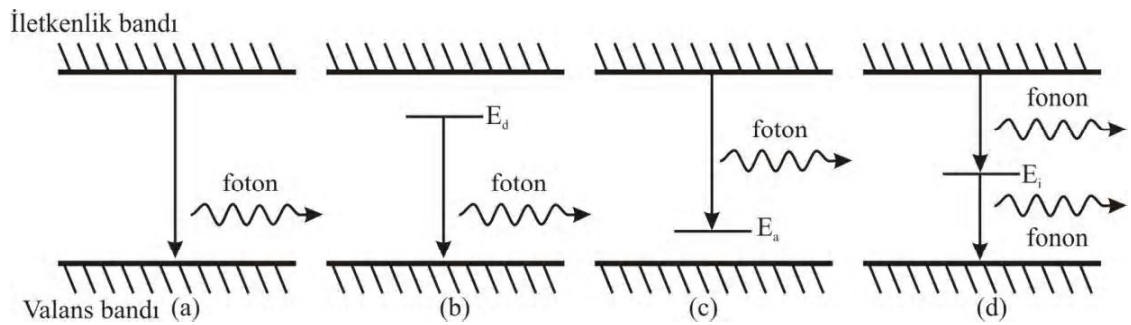
Resim 2. 3. Spektroskopik elipsometre cihazı

Gazi FOTONİK bünyesinde bulunan Spektroskopik Elipsometre (Jobin Yvon-Horiba)

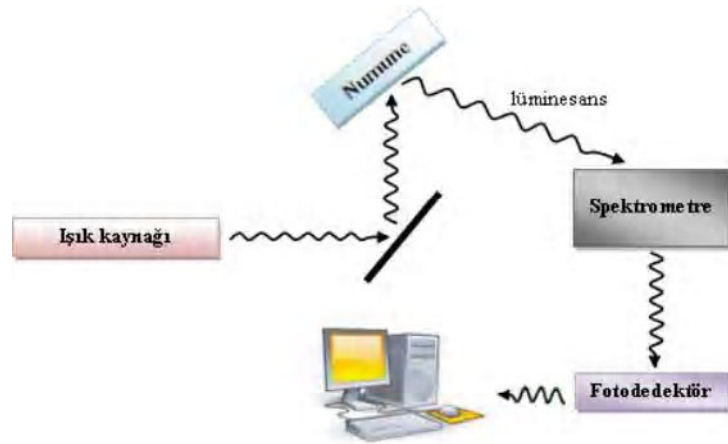
sistemi Resim 2.3’de gösterildi. Bu sistem, 260-2100 nm dalga boyu aralığında ölçüm imkânı veren 0° ve 180° arasında açı değişim özelliğine sahiptir. Ayrıca, sistem bir 75 W gücünde Xenon ışık kaynağı, otomatik goniometre üzerine monte edilmiş bir polarizör ve bir modulator başlığı, bir monokromatör, bir motorize numune platformu ve bir kontrol biriminden oluşmaktadır.

2.4. Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi, malzemenin yapısını bozmayan, yarıiletken malzemelerin optik özelliklerini ve elektronik yapılarını araştırma ve analiz etmekte kullanılan deneysel bir yöntemdir. Fotolüminesans (PL) olayı optik uyarma altında bir malzemeden ışığın kendi kendine yayılmasıdır. Işık, bir malzeme üzerine gönderilerek malzeme tarafından ışığın enerjisi soğrulur ve malzeme, soğurulan bu enerjiyi kendiliğinden bir ışık yayarak salar. Malzemenin ışıkla uyarılması olayına “foto-uyarım”; foto-uyarım sonucunda oluşan kendiliğinden ışımaya “fotolüminesans” ya da foto-ışımaya denir. Foto-uyarım madde içerisindeki elektronların izin verilebilir uyarılmış durumlara hareket etmesine yol açar. Bu elektronlar kendi denge durumlarına dönerken ışımalı ya da ışımasız geçişler yaparlar. Lüminesans geçişlerin şematik olarak gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir.



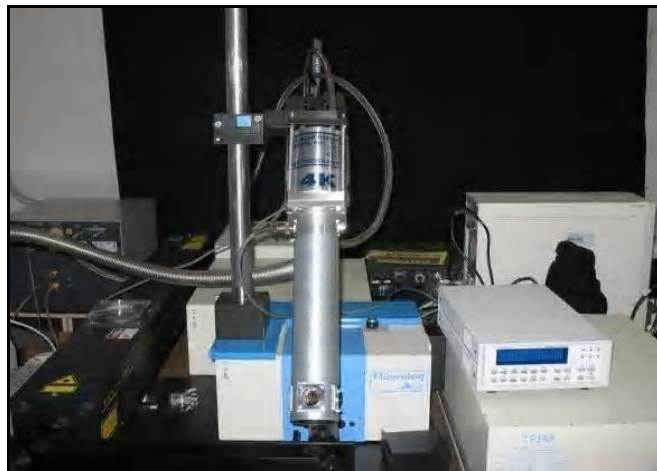
Şekil 2.6. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışımasız geçiş [13]



Şekil 2.7 Fotolüminesans (PL) ölçümü için tipik deneysel düzenek

Yapılan ışımalı geçiş sonucunda malzemeden salınan fotonlar (optik sinyal) ayna sistemi ve monokromatör yardımıyla ayrıştırılarak dedektöre aktarılır. Bu optik sinyal elektriksel sinyaline dönüştürülür. Malzemenin lüminesans ışmasına karşılık gelen bu sinyalin; şiddet-dalgaboyu (veya enerji) grafiği çizilerek fotolüminesans spektrumu elde edilir. Bu spektrum yardımı ile malzeme hakkında; malzeme kalitesi, safsızlık ve katkı miktarı, yasak enerji bant aralığı ve arayüzey pürüzlülüğü bilgileri elde edilir. Tipik bir PL düzeneği şematik olarak Şekil 3.7’de gösterildi [13].

PL ölçümleri, Gazi FOTONİK bünyesinde bulunan Jobin Yvon Florog-550 sistemi ile 50 mW gücündeki (325 nm) He-Cd lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Düzeneğin fotoğrafı Resim 2.4’de verildi.



Resim 2. 4. Kullanılan fotolüminesans düzeneği

BÖLÜM 3

3.YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR

Bu tez çalışmasında, p-n eklem ve süperörgü yapıları büyütülerek, yapısal ve optik özellikleri incelendi. Bu araştırmalar için MBE yöntemi ile büyütülen bir adet p-n eklem yapısı ve iki adet süperörgü yapısı kullanıldı. Bu numunelerin büyütülmesi aşağıda ayrıntılı olarak verildi. Numunelerin yapısal ve optik özellikleri, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD), spektroskopik elipsometre (SE), fotoluminesans (PL) ölçümleri değerlendirilerek belirlendi.

3.1. Yapıların Büyütülmesi

GaAs/GaAs p-n eklem ve InGaAs/GaAs süperörgü p-n eklem (SLpn) yapılarının MBE tekniği ile büyütülmeleri verildi.

3.1.1. p-n Eklem Kalibrasyon Numunelerinin Büyütülmesi

Bu kısımda, büyütülecek pn-eklem ve SL numunelerinin taşıyıcı yoğunluklarını istenilen miktarda belirleyebilmek hedefiyle kalibrasyon örnekleri büyütüldü. Bu büyütmeden, katmanlardaki taşıyıcı yoğunluğu ve katman kalınlıklarının büyüme oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Taşıyıcı yoğunluklarını belirlemek amacıyla yarıyalıtkan (SI) GaAs alttaş üzerine 3 adet epi-tabaka büyütülerek taşıyıcı yoğunlukları ve mobilite değerleri Hall Etkisi sistemi ile ölçülerek analiz edildi. Tabaka kalınlıkları HRXRD desenleri ve MBE’de iç ölçüm tekniği olan yüksek enerjili elektron kırınımı yansıma sistemi (RHEED) ile belirlendi.

GS253 nolu numuneye ait oda sıcaklığında alınan Hall Etkisi sonuçları sunuldu. Diğer kalibrasyon örneklerinin oda sıcaklığı için elde edilen değerler Tablo 3.1’de sunuldu. Bu verilerden yararlanarak bu çalışmanın amacını oluşturan kuantum kuyulu süperörgü yapıları büyütüldü.

Tablo 3.1. Kalibrasyon numunelerinin Hall Etkisi ölçüm sonuçları

	Numune		
	n-GaAs/SI-GaAs (GS253)	n-In _{0,43} Ga _{0,57} As/SI-InP (GS187)	n-In _{0,44} Ga _{0,56} As/SI-InP (GS188)
Taşıyıcı yoğunluğu, (1/cm ²) [T=300K]	-1.4555E+14	-3.1696E+14	-3.9511E+14
Mobilite, cm ² /(VS) [T=300K]	-2.3212E+3	-6.1481E+3	-3.3760E+3
Tabaka kalınlığı (μm)	1	1,5	2

3.1.2. GS261 p-n eklem yapısının MBE ile büyütülmesi

Bu tez çalışmasında hedeflenen p-i-n kuantum kuyulu yapıları büyütmeden önce, kuantum kuyulu yapıların yapısal ve optik farklılıklarını daha iyi değerlendirmek amacıyla 100 yönelimli n-tipi GaAs alttaş üzerine p-tipi GaAs epitaksiyel tabaka büyütülerek p-n eklemli GS261 yapısı büyütüldü.

GS261 p-GaAs/n-GaAs p-n eklem yapısı (100) yönelimli n tipi GaAs alttaş üzerine VG-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GS261 p-GaAs/n-GaAs p-n eklem yapısı Şekil 3.1’de verildi.

p- GaAs	3μm
n- GaAs	0,5 μm(Tampon)
n-GaAs(100)	(Alttaş)

Şekil 3. 1. GS261 p-n eklem yapısı

GS261 p-n eklem yapısının büyütülme şartları ve adımlar aşağıda verildi:

- n tipi GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’ de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi.
- Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG doğru konumlandırılmış oldu.
- Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (8 °C/dak.) ısıtmaya başlandı.
- GS261 yapısını büyütmek için; Arsenik (As), Galyum (Ga), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Tablo 4.2 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15-20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve o sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.

- g) GS261 p-n eklem yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- h) GS261 p-n eklem yapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 600°C 'ye kadar ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 600 °C'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 600 °C'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan As atomlarını telafi etmek için As akısı altında 680 °C'ye kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.
- i) Alttaş sıcaklığı 620 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin belirginleşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 680 °C'ye çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 15 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda; RHEED deseninin netleşerek, beklenen kristal yapı düzeni belirdi. Bunun sonucunda oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra ise alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütülmek üzere 650 °C' ye düşürüldü. n tipi GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 821 °C, Be kaynak sıcaklığı 850°C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak, saatte 0,2 µm büyütme oranı ile 0,5 µm n tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.
- k) GaAs tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 570 °C'ye, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C'ye düşürüldü.
- l) Tampon tabaka yapısı büyütüldükten sonra son tabaka olarak, As, Be ve Si akıları kullanılarak, 3µm p-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

Böylece GS261 p-GaAs/n-GaAs p-n eklem yapısının büyütme süreçleri tamamlanmış oldu. Büyütme süreçleri tamamlandıktan sonra, As akısı altında alttaş sıcaklığı 250°C'

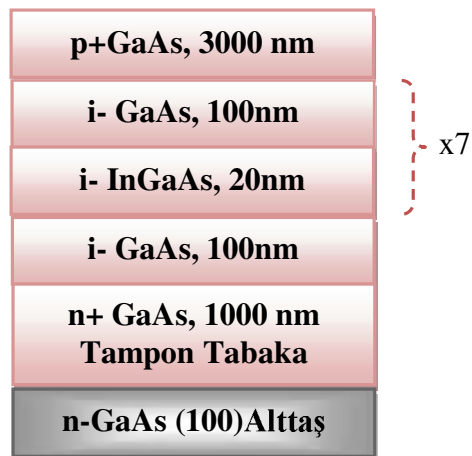
ye kadar soğutuldu. As akısı, alttaş sıcaklığı 250 °C’de iken As valfi kapatılarak kesildi. Alttaş döndürülmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Tablo 3. 1. GS261 p-GaAs/n-GaAs p-n eklem yapısı için akı değerleri

<i>KaynakHücresi</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Demete Eşdeğer Basınç (BEP)(mbar)</i>
Galyum(Ga)	821	$5,0 \times 10^{-7}$
Arsenik Bulk (As_B)	378	-
Arsenik Cracker (As_C)	160	$2,2 \times 10^{-6}$
Silikon (Si)	1200	-
Berilyum (Be)	850	-

3.1.3. GS262 Süperörgü yapısının MBE ile büyütülmesi

GS262 InGaAs/GaAsSLpnyapısı (100) yönelimli n tipi GaAsalttaş üzerine VG-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısı Şekil 4.2’de verildi.



Şekil 3.2. GS262 SL pn yapısı

GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısının büyütülmek için şartları ve adımlar aşağıda verildi:

- a) n tipi GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’ de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- b) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi.
- c) Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG doğru konumlandırılmış oldu.
- d) Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (8 °C/dak.) ısıtmaya başlandı.
- e) GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısını büyütme için; Arsenik (As), İndiyum (In), Galyum (Ga), Fosfat (P) kaynağı olarak kullanılan Galyum Fosfat (GaP), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Tablo 4.3 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15-20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve o sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- f) Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- g) GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- h) GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 630 °C’e kadar

ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 520 °C'e (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 520 °C'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan As atomlarını telafi etmek için As akısı altında 570 °C'e kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.

- i) Alttaş sıcaklığı 620 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin belirginleşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak 680°C'e çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 15dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda; RHEED desenin netleşerek, beklenen kristal yapı düzeni belirdi. Bunun sonucunda oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra ise alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütülmek üzere 650 °C'e düşürüldü. n tipi GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 862 °C, Be kaynak sıcaklığı 875 °C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak, saatte 0,2 µm büyütme oranı ile 1µm n tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.
- k) GaAs tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 640 °C'e, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C'e düşürüldü.
- l) Bu tabakadan sonra; In ve Ga akı kesicileri açılarak ve hâlihazırda ortamda bulunan As kullanılarak, 100nm i-tipi GaAs tabakası büyütüldü.
- m) Yine As akısı altında, 20 nm i-tipi InGaAs tabakası, Ga akı kesicisi açılarak 100 nmi-tipi GaAs tabakası büyütüldü. Bu büyütmenin bir adet süperörgü yapısı oluşturduğu düşünülerek; bu adımdaki büyütme yedi kez daha tekrarlandı.
- n) Süperörgü yapısı büyütüldükten sonra son tabaka olarak, As, Ga ve Be akıları kullanılarak, 3µm p-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

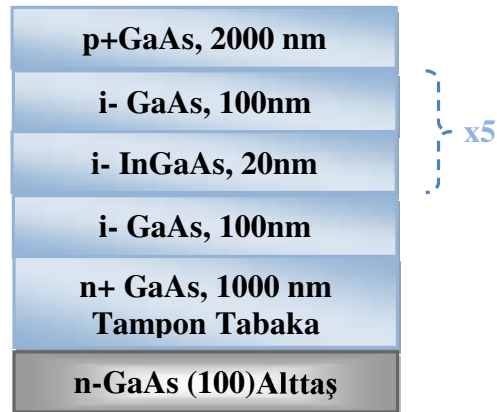
- o) Böylece GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısının büyütme süreçleri tamamlanmış oldu. Büyütme süreçleri tamamlandıktan sonra, As akısı altında alttaş sıcaklığı 250 °C'e kadar soğutuldu. As akısı, alttaş sıcaklığı 250 °C'de iken As valfi kapatılarak kesildi. Alttaş döndürülmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Tablo 3. 2. GS262 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için akı değerleri

<i>KaynakHücresi</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Demete</i>	<i>Eşdeğer</i>	<i>Basınç</i>
Galyum(Ga)	862		$1,8 \times 10^{-7}$	
Indiyum(In)	763		$3,7 \times 10^{-7}$	
ArsenikBulk(As_B)	378		-	
ArsenikCracker(As_C)	154		$2,2 \times 10^{-6}$	
Silikon (Si)	1200		-	
Berilyum(Be)	875		-	

3.1.4. GS263 Süperörgü yapısının MBE ile büyütülmesi

GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısı (100) yönelimli n tipi GaAs alttaş üzerine VG-Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü. GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısı Şekil 3.3'de verildi.



Şekil 3.3. GS263 SLpn yapısı

GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısının büyütölme şartları ve adımlar aşağıda sunuldu:

- a) n tipi GaAs alttaş büyütme odasında transfer edilmeden önce hazırlık odasında 400 °C’de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- b) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipölatöre yüklendi.
- c) Alttaş manipölatöre yüklendikten sonra MIG “IN” pozisyonuna getirildi, yani alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG doğru konumlandırılmış oldu.
- d) Sıvı azotla panel doldurulduktan sonra sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (8 °C/dak.) ısıtmaya başlandı.
- e) GS263 InGaAs/GaAsSLpn eklem yapısını büyötmek için; Arsenik (As), İndiyum (In), Galyum (Ga), Fosfat (P) kaynağı olarak kullanılan Galyum Fosfat (GaP), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Tablo 4.4 ile verilen büyütme sıcaklık değlerlerinin 15-20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- f) Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra tekrardan büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- g) GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- h) GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürölerek, 630 °C’e kadar

ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 520 °C'e (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 520 °C'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan As atomlarını telafi etmek için As akısı altında 570 °C'e kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.

- i) Alttaş sıcaklığı 620 °C olduktan sonra RHEED penceresinden desene bakıldığında oksit tabakasının artık kalkmaya başladığı, desenin belirginleşmeye başlamasından anlaşıldı. Alttaşın sıcaklığı adım adım kontrollü olarak, 685 °C'e çıkarıldı ve bu sıcaklıkta 15 dakika beklenerek tamamen oksit tabakasının alttaş yüzeyinden kalkması sağlandı. Bu işlem sonunda; RHEED deseninin netleşerek, beklenen kristal yapı düzeni belirdi. Bunun sonucunda oksit tabakasının tamamen kaldırıldığı sonucuna varıldı.
- j) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra ise alttaş sıcaklığı tampon tabakası büyütülmek üzere 650 °C'e düşürüldü. n tipi GaAs tampon tabakası için Ga kaynak sıcaklığı 866 °C, Be kaynak sıcaklığı 875 °C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra Ga ve Be akı kesicisi açılarak, saatte 0,2 µm büyütme oranı ile 1µm n tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.
- k) GaAs tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 640 °C'e, Ga kaynak sıcaklığı ise 910 °C'e düşürüldü.
- l) Bu tabakadan sonra; In ve Ga akı kesicileri açılarak ve hâlihazırda ortamda bulunan As kullanılarak, 100nm i-tipi GaAs tabakası büyütüldü.
- m) Yine As akısı altında, 20 nm i-tipi InGaAs tabakası, Ga akı kesicisi açılarak 100 nm i-tipi GaAs tabakası büyütüldü. Bu büyütmenin bir adet süperörgü yapısı oluşturduğu düşünülerek; bu adımdaki büyütme yedi kez daha tekrarlandı.
- n) Süperörgü yapısı büyütüldükten sonra son tabaka olarak, As, Ga ve Be akıları kullanılarak, 3µm p-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

- o) Böylece GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısının büyütme süreçleri tamamlanmış oldu. Büyütme süreçleri tamamlandıktan sonra, As akısı altında alttaş sıcaklığı 250 °C'e kadar soğutuldu. As akısı, alttaş sıcaklığı 250 °C'de iken As valfi kapatılarak kesildi. Alttaş döndürülmesi durdurularak, alttaş önce hazırlık odasına, daha sonra da yükleme odasına transfer edildi.

Tablo 3. 3. GS263 InGaAs/GaAsSLpn yapısı için akı değerleri

<i>Kaynak Hücresi</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Demete Eşdeğer</i>	<i>Basınç</i>
Galyum(Ga)	866	1,8 x10 ⁻⁷	
İndiyum(In)	764	3,7 x10 ⁻⁷	
Arsenik Bulk (As _B)	378	-----	
Arsenik Cracker (As _C)	154	2,2 x10 ⁻⁶	
Silikon (Si)	1200	-----	
Berilyum (Be)	875	-----	

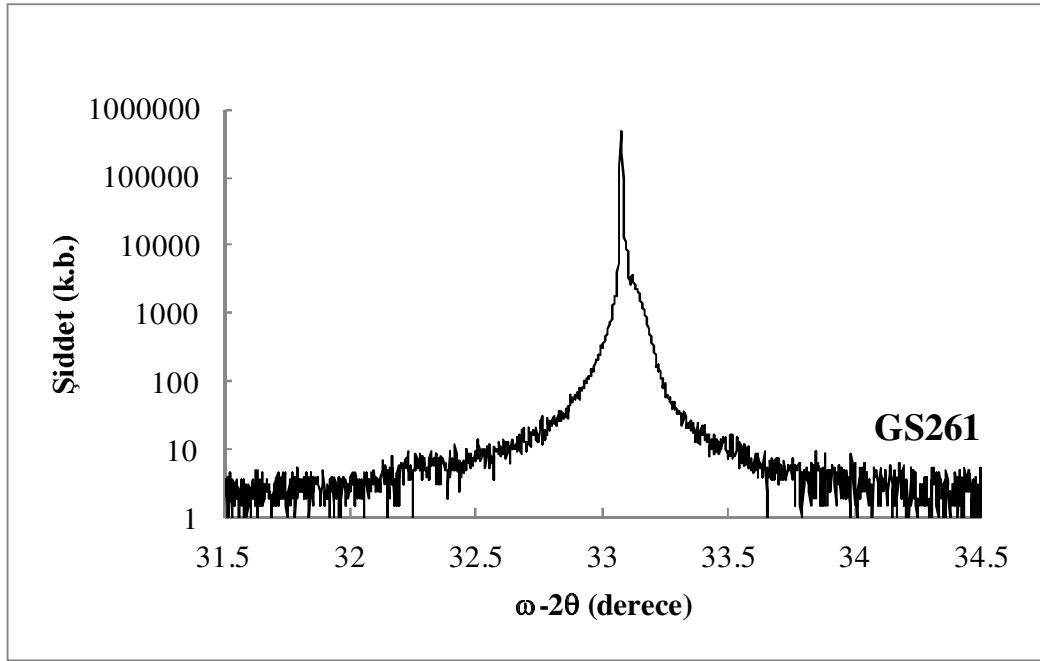
3.2. Yapıların Karakterizasyonları

Numunelerin yapısal ve optik özellikleri, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD), spektroskopik elipsometre (SE), fotoluminesans (PL) ölçümleri değerlendirilerek belirlendi.

3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı analizleri

Numunelerin yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı ölçümleri Bruker D8 Discover X-ışını kırınım cihazı ile yüksek çözünürlüklü Ge (002) monokromatörü kullanılarak yapıldı.

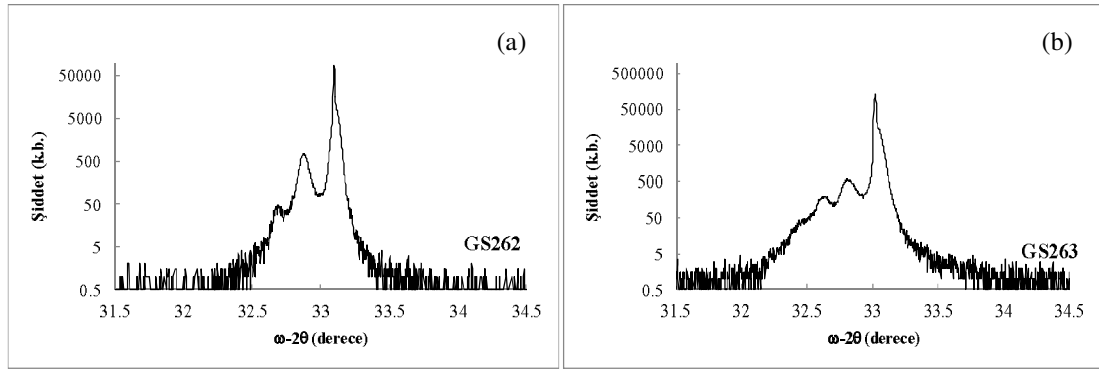
GaAs/GaAs yapısı ve InGaAs/GaAs SL yapıları için HRXRD ölçümlerinden elde edilen (004) simetrik düzlemlerine ait ω -2 θ X-ışını kırınım deseni Şekil 4.4'de verildi. Bu şekilde görülen pik GaAs alttaşın kırınım pikidir. Bu pik aynı zamanda GaAs tampon tabakayı da içermektedir. Bu pikte herhangi bir yarılmaya gözlenmemesi tampon tabakanın iyi bir uyum ile alttaş üzerine büyümüş olduğunu gösterir.



Şekil 3.4. GS261 numunesinin HRXRD kırınım deseni

Şekil 3.5’de (a) ve (b)’de GS262 ve GS263 SL yapılarının ω - 2θ X-ışını kırınım deseni verildi. GaAs yapısına In ilave edildikçe kırınım pik pozisyonunun InAs’ın kırınım pik pozisyonuna yaklaşması gerekir. Bu gerçek altında, büyüttüğümüz yapılarda In oranı arttıkça InGaAs’a ait kırınım piki GaAs’a göre büyük açıya doğru kaymalıdır. Bu durum, bizim örneklerimizde de gözlenmektedir.

XRD kırınım deseninde InGaAs pik açılarının GaAs pikine göre açısal olarak ayrılması, yapıdaki In oranının belirlenmesine imkân verir. Örgü parametresi kullanılarak $A_xB_{1-x}C$ epitaksiyel alaşımındaki A elementinin oranı x , Bölüm 3’de verilen Eş. 3.3 ile tanımlanan Vegard yasası ile belirlenebilir. LEPTOS yazılımı ile deneysel veriler simüle edilerek, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının alaşım oranları (x) belirlendi. Simülasyon sonucunda elde edilen In oranı GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla %49 ve %36 olarak elde edildi.



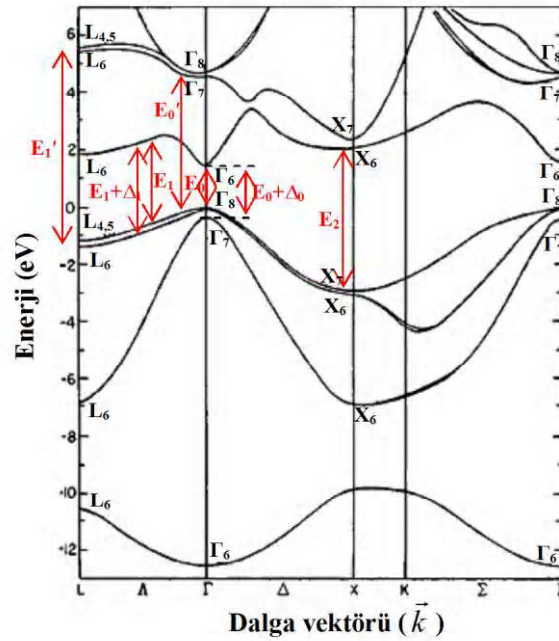
Şekil 3.5. (a) GS262 ve (b) GS263 numunelerinin HRXRD kırınım desenleri

3.2.2. Spektroskopik elipsometre ölçümleri ve değerlendirilmesi

Spektroskopik Elipsometre (SE) ölçümleri, 75 W gücünde Xenon ışık kaynaklı faz modülasyonlu Jobin Yvon-Horiba Spektroskopik Elipsometre sistemi kullanılarak yapıldı.

Yarıiletken malzemelerde dielektrik fonksiyonun davranışı, yapının elektronik geçişleri hakkında detaylı bilgiler vermektedir. Dielektrik fonksiyonu, yarıiletkende bantlar-arası geçişler olarak değerlendirilen kritik enerji noktaları hakkında veriler içerir [43].

Bu tez çalışmasında incelenen yapıların, dielektrik fonksiyonu, kırılma indeksi gibi optik verileri SE ile elde edildi. Bir örnek olarak GaAs yarıiletkeninin enerji bant yapısı ve kritik enerji noktaları Şekil 3.6'da verildi. GaAs'ın direkt yasak enerji aralığı E_0 , E_0 'ın spin-yörünge yarılması olan $E_0 + \Delta_0$ ve E_0 'Brillouin bölgesinin Γ noktası kenarında yerleşmiştir. E_1 ve E_1 'in spin-yörünge yarılması olan $E_1 + \Delta_1$ Brillouin bölgesinin Λ doğrultusunda, E_2 ise Brillouin bölgesinin X noktası kenarında yerleşmiştir.



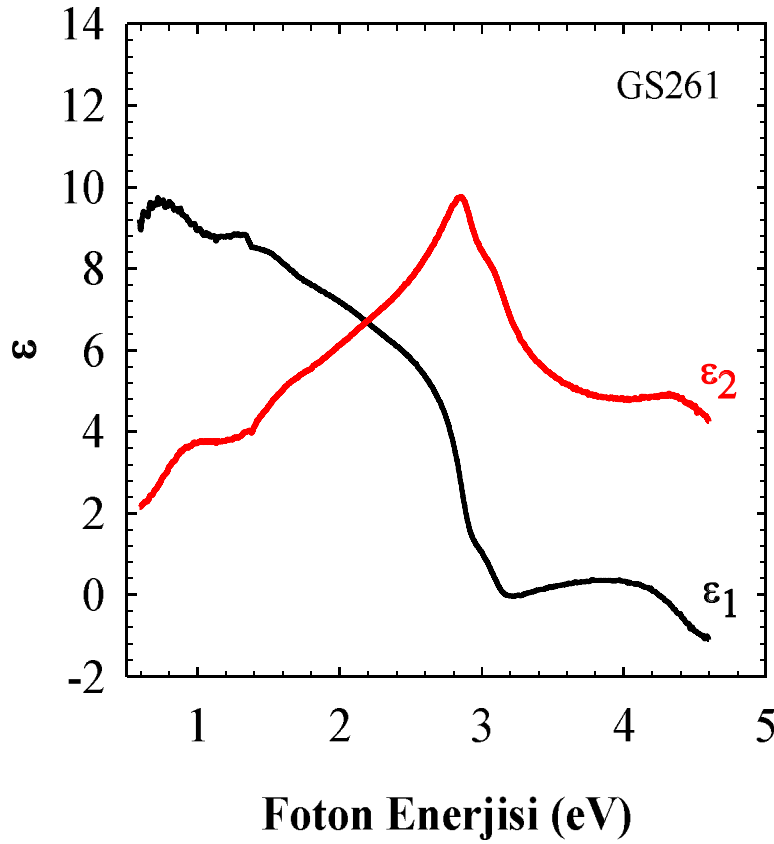
Şekil 3.6. GaAs'ın enerji bant yapısı [44].

Bantlararası geçişlere ait kritik noktalar GaAs'ın enerji bant yapısında kritik nokta enerjileri şu geçişlere karşılık gelmektedir: yasak enerji aralığına karşılık gelen E_0 kritik nokta enerjisi $\Gamma_8^v \rightarrow \Gamma_6^c$ geçişine, $E_0 + \Delta_0$ kritik nokta enerjisi $\Gamma_7^v \rightarrow \Gamma_6^c$ geçişine (E_0 tarafından baskılandığı için bu çalışmada değerlendirilemedi), E_0' kritik nokta enerjisi $\Gamma_8^v \rightarrow \Gamma_7^c$ geçişine, E_1 ve $E_1 + \Delta_1$ kritik nokta enerjileri (valans ve iletkenlik bantları birbirine hemen hemen paraleldir) $\Lambda_{4,5}^v \rightarrow \Lambda_6^c$ ve $\Lambda_6^v \rightarrow \Lambda_6^c$ geçişlerine, E_2 kritik nokta enerjisi ise $X_7^v \rightarrow X_6^c$ geçişine karşılık gelmektedir [24, 45, 46].

Bu tez çalışmasında büyütülen GaAs/GaAs p-n eklem yapısının 0,6-4,6 eV foton enerjisi aralığında alınan dielektrik fonksiyonunun reel (ϵ_1) ve sanal (ϵ_2) kısımlarının spektrumları Şekil 3.7'de verildi. Dielektrik fonksiyon

$$\epsilon = \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi \frac{(1 - \rho)^2}{(1 + \rho)^2} \quad (3.1)$$

eşitliğinden de görüldüğü gibi elipsometrede gelen ışının gelme açısına bağlıdır. SE ölçümlerinde geliş açısı 70° alınmıştır. Kim ve arkadaşları GaAs'ın kritik nokta enerjilerini, E_0 , E_1 , $E_1+\Delta_1$ ve E_0' , sırasıyla 1,42 eV, 2.85 eV, 3,15 eV ve 4,37 eV olarak bulmuşlardır [46]. Grafik üzerinden okunan veriler tam olarak doğru CP enerji değerlerine karşılık gelmez. Elipsometrik verilerden doğru enerji değerlerini elde etmek için literatürde geliştirilen birkaç model vardır [47-48].



Şekil 3.7. GaAs/GaAs p-n eklem yapısının dielektrik fonksiyonunun reel ve sanal kısımları

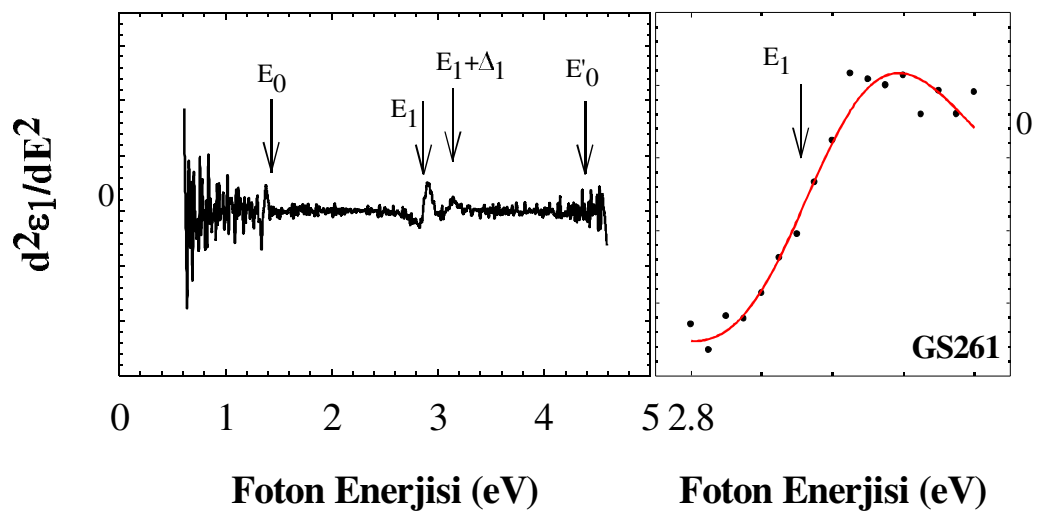
Materyaldeki bantlar-arası geçişler hakkında deneysel bilgiyi içeren Eş. 3.1 ile verilen dielektrik fonksiyonları (DF) yarıiletkenlerin enerji bant yapısının açıklanmasında kullanılabilir. Tek tabakalı ya da daha fazla tabakalı yarıiletken yapıların dielektrik fonksiyonlarından CP enerjilerini elde etmek için, çizgi şekli analizi (line shape analysis, LSA), Harmonik salıncı yaklaşımı (Harmonic Oscillator Approximation, HOA) ve Etkin Ortalama yaklaşımı (Effective-Medium Approximation, EMA) gibi birkaç model geliştirilmiştir [49, 46, 47]. EMA modeli çok tabakalı yapıların analiz

edilmesi için daha uygun bir yöntemdir. Yoon ve arkadaşlarının önerilerine göre, tabaka kalınlığı kritik kalınlık üzerinde ise büyütülen tabaka hacimli (bulk) karakterde değerlendirilebilir [50]. Böylece hacimli yapıların CP enerjilerini analiz etmek için LSA kullanılabilir. Burada ifade edilen “kritik kalınlık”, uyarma dalgaboyundan daha büyük olan kalınlıklar anlamındadır [51]. Bu tez çalışmasında incelenen numunelerin tümünün üst tabaka kalınlığı 1 μm ’den fazla (elipsometre ölçüm aralığı dalgaboyundan daha büyük) olduğu için elipsometrik verilerin analizi LSA yöntemiyle yapıldı.

Bu tez çalışmasında, dielektrik fonksiyonu spektrumundan uygun kritik nokta enerji değerlerini belirlemek için kullanılan algoritma aşağıda verildi. Bu modelde, dielektrik fonksiyonu kritik nokta enerjilerine

$$\varepsilon = C - Ae^{i\phi}(E - E_c + i\Gamma)^n \quad (3.1)$$

şeklinde verilen denklem ile bağlıdır [49, 45]. Burada, A genlik, E foton enerjisi, E_c kritik nokta enerjisi, Γ genişleme faktörü ve ϕ eksitonik faz açısıdır. Bu modelde, çizgi-şekli analizi yapmak için dielektrik fonksiyonunun reel kısmının ikinci türevi, $\partial^2 \varepsilon_1 / \partial E^2$, (Şekil 3.8) spektrumu nümerik olarak hesaplandı.



Şekil 3.8. GS261 yapısının dielektrik fonksiyonlarının ikinci türevlerinin foton enerjisine göre değişimi (Sağdaki grafikte bir örnek olarak E_1 kritik noktası için yapılan fit deneysel değer ile birlikte verilmiştir)

Hesaplanan ikinci türev spektrumu

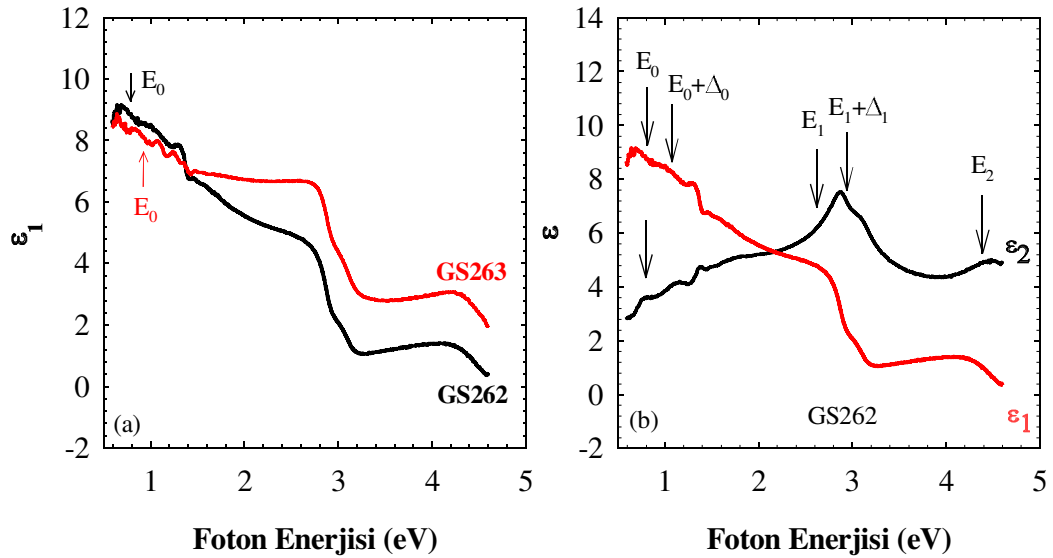
$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial E^2} = -n(n-1)Ae^{i\phi}(E - E_c + i\Gamma)^{n-2}, n \neq 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial E^2} = Ae^{i\phi}(E - E_c + i\Gamma)^{-2}, n = 0 \quad (3.3)$$

olarak verilen “standart kritik nokta çizgi-şekli” eşitliklerine en küçük kareler yöntemi kullanılarak fit edildi. Burada $\frac{1}{2}$, -1/2, 0, 1/2, -1 değerlerine sahiptir; sırasıyla bir-boyutlu, iki-boyutlu, üç-boyutlu ve eksitonik kritik noktalar olarak tanımlanırlar [46]. “ E_1 , $E_1+\Delta_1$ ” ve “ E_0 ” kritik nokta enerjilerini belirlemek için spektruma sırasıyla eksitonik ve üç-boyutlu çizgi-şekli fit edilir. E_2 ve E_0 kritik noktaları için iki-boyutlu çizgi-şekli fit edilir [46, 52, 53, 54]. Lautenschlager ve arkadaşları, kendi yapılarının ($\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$) dielektrik fonksiyonunun sanal kısmındaki küçük enerji bölgesinin duyarlılığındaki düşüklük nedeniyle sadece reel kısmını analiz etmişlerdir [48] ve bizim yaptığımız ölçümlerde de bu kısım benzer davranış gösterdiği için CP analizinden pik pozisyonlarını belirlemek için ε_1 spektrumunun ikinci türevi kullanıldı [55, 56]. GaAs’ın bantlar-arası geçiş kenarlarının kritik nokta enerjileri yukarıda bahsedilen metot kullanılarak belirlendi. GS261 numunesi için bu CP enerjileri sırasıyla 1,429 eV, 2,877 eV, 3,103 eV ve 4,359 eV olarak belirlendi ve literatür ile uyumlu olduğu görüldü [46].

Bu tez çalışmasında büyütülen InGaAs/GaAs SL yapılarının (GS262 ve GS263) 0,6-4,6 eV foton enerjisi aralığında alınan dielektrik fonksiyonunun reel kısmı (ε_1) spektrumları Şekil 3.9 (a)’da verildi. Dielektrik fonksiyon Eş. 3.1’den de görüldüğü gibi elipsometrede gelen ışının gelme açısına bağlıdır. SE ölçümlerinde geliş açısı 70° alınmıştır. Şekil 3.9 (b)’de GS262 numunesi için dielektrik fonksiyonları (DF) verildi. Şekil 3.9 (b)’de dielektrik fonksiyonunun sanal kısmı olan ε_2 spektrumu incelendiğinde pikler gözlenir. Bu piklerin enerji değerleri, bantlar arası geçiş kenarları (E_0 , $E_0+\Delta_0$, E_1 , $E_1+\Delta_1$ ve E_2) olan kritik nokta (CP) enerjilerine karşılık gelir. GS262 numunesi için bu CP enerjileri sırasıyla 0,78 eV, 1,05 eV, 2,70 eV, 2,90 eV ve 4,50 eV olarak belirlenmiştir. Bu veriler tam olarak doğru CP enerji değerlerine karşılık gelmez ve bir model ile bulunması gerekir. GS262 ve GS263 numunelerinin tümünün üst tabaka

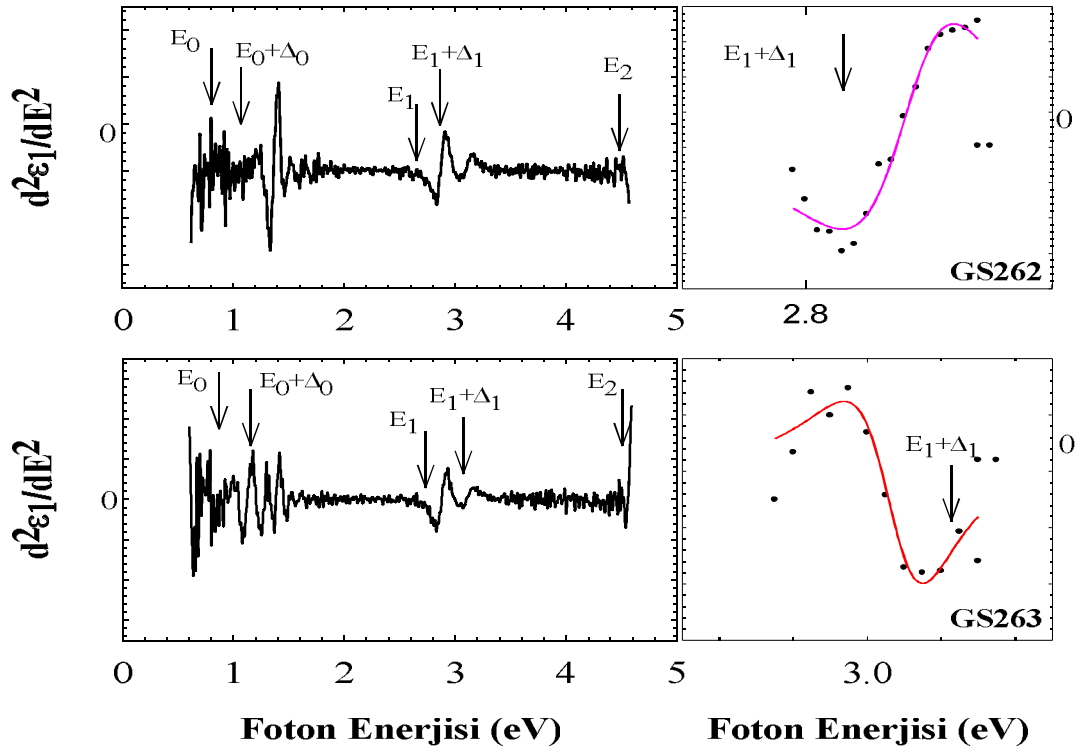
kalınlığı 1 μm 'den fazla (elipsometre ölçüm aralığı dalgaboyundan daha büyük) olduğu için elipsometrik verilerin analizi LSA yöntemiyle yapıldı.



Şekil 3.9. (a) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının dielektrik fonksiyonunun reel kısımları (b) GS262 numunesinin dielektrik fonksiyonunun reel ve sanal kısmı

Bu modelde, çizgi-şekli analizi yapmak için dielektrik fonksiyonunun reel kısmının ikinci türev, $\partial^2 \epsilon_1 / \partial E^2$, (Şekil 3.10) spektrumu nümerik olarak hesaplandı.

Hesaplanan ikinci türev spektrumu “standart kritik nokta çizgi-şekli” eşitliklerine en küçük kareler yöntemi kullanılarak fit edildi. Burada $\frac{1}{2}$, -1/2, 0, 1/2, -1 değerlerine sahiptir; sırasıyla bir-boyutlu, iki-boyutlu, üç-boyutlu ve eksitonik kritik noktalar olarak tanımlanırlar [46]. “ E_1 , $E_1 + \Delta_1$ ” ve “ E_2 ” kritik nokta enerjilerini belirlemek için spektruma sırasıyla iki-boyutlu çizgi-şekli fit edilir. E_0 ve $E_0 + \Delta_0$ kritik noktaları için iki-boyutlu çizgi-şekli fit edilir [57, 58]. CP analizinden pik pozisyonlarını belirlemek için ϵ_1 spektrumunun ikinci türevi kullanıldı [43, 44]. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarının bantlar-arası geçiş kenarlarının kritik nokta enerjileri yukarıda bahsedilen metot kullanılarak belirlendi ve elde edilen değerler Tablo 3.3’de verildi.



Şekil 3.10. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının dielektrik fonksiyonlarının ikinci türevlerinin foton enerjisine göre değişimi (Sağdaki grafiklerde bir örnek olarak $E_1+\Delta_1$ kritik noktası için yapılan fit deneysel değerler ile birlikte verilmiştir).

Tablo 3. 4. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ yapıları için kritik nokta enerjileri ve genişleme parametreleri.

Enerji (eV)	GS262 (x=%49)	GS263 (x=%36)
E_0	0,771	0,890
$E_0+\Delta_0$	1,030	1,160
E_1	2,633	2,701
$E_1+\Delta_1$	2,887	3,015
E_2	4.450	5,552

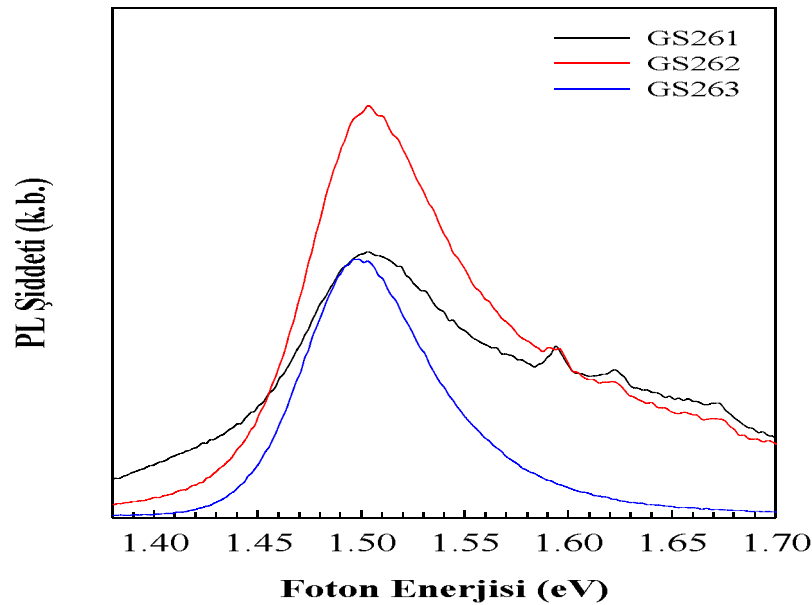
Şekil 3.9 (b)'de GS262'nin dielektrik fonksiyonunun sanal kısmından belirlenen

değerlerle fit sonucu elde edilen değerlerin uyumlu olduğu görüldü. Yapıların E_0 kenarı, fosfor kompozisyonunun artmasına bağlı olarak negatif bükülme ile düşük enerji değerine kaymaktadır. Benzer davranış Adachi ve arkadaşlarının çalışmasında da gözlenmiştir [58]. Adachi ve arkadaşları çalışmalarında Tablo 3.5’de verilen kritik nokta enerjilerini sırasıyla; 0,75 eV, 1.04 eV, 2.57 eV, 2.83 eV ve 4.41 eV ($y=1$ için) belirlemişlerdir [58].

3.2.3. Fotoluminesans ölçümleri ve analizleri

Malzemelerin optik karakterizasyonu Gazi FOTONİK bünyesinde bulunan 50 mW gücünde 325 nm dalga boylu HeCd lazer ışık kaynaklarına sahip ve 200-1600 nm dalga boyu aralığında dedektörlere sahip JobinYvon-Horiba Fluorolog-3 Fotoluminesans spektrometresi kullanılarak yapıldı.

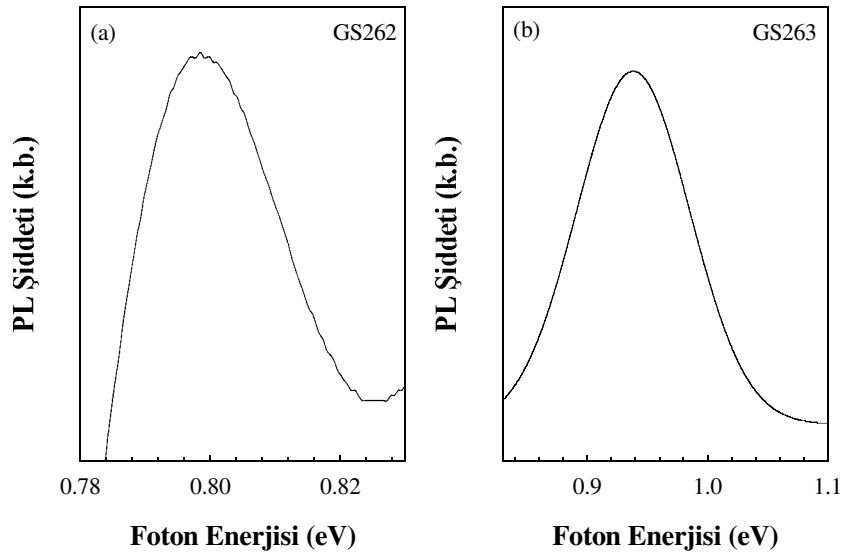
GS261 p-n eklem yapısının ve farklı konsantrasyonlara sahip olan iki adet (GS262 ve GS263) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ SL yapısının oda sıcaklığında (300 K) PL ölçümleri görünür bölgede alındı ve PL şiddetinin foton enerjisi değişimine göre Şekil 3.11’de verildi.



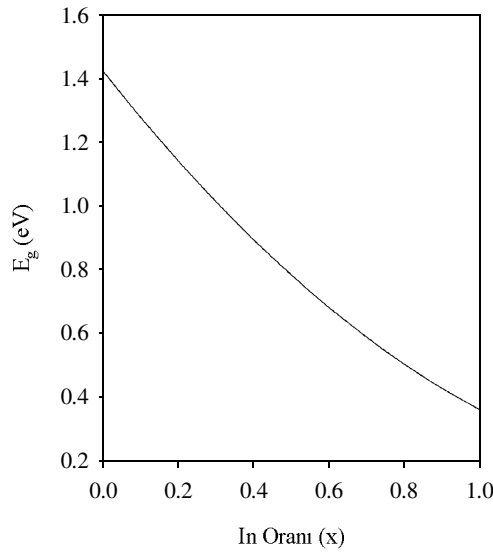
Şekil 3.11. Oda sıcaklığında görünür bölgede GS261, GS262 ve GS263 numunelerinin PL spektrumları

Yarıiletken alaşımların yasak enerji aralığı lüminesans emisyonunun pik pozisyonundan belirlenebilir. Bu şekilden de görüldüğü gibi GaAs'dan kaynaklanan emisyon piki gözlemlendi.

GS262 ve GS263 SL yapılarının kızılötesi bölgede yapılan oda sıcaklığı PL ölçüm sonuçları Şekil 3.12'de verildi. Yarıiletken alaşımların yasak enerji aralığı ve alaşım kompozisyonu lüminesans emisyonunun pik pozisyonundan belirlenebilir. Şekilden de görüldüğü gibi, indiyum kompozisyonundaki artış, beklenildiği gibi, numunelerin banttan banda geçişlerine karşılık gelen ana pik pozisyonunun değişmesine (kırmızıya kaymasına) sebep oldu. Nahary ve arkadaşlarının çalışmasında da (Şekil 3.13) bu durum gözlenmiştir [59,55].



Şekil 3.12. Oda sıcaklığında kızılötesi bölgede GS262 ve GS263 numunelerinin PL spektrumları



Şekil 3.13. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısında yasak enerji aralığının indiyum konsantrasyonuna göre değişimi

Numunelerin PL ölçümlerinden belirlenen banttan banda geçiş enerjileri (yasak enerji aralığı) GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla 0,792 ve 0,938 eV olarak belirlendi. Bu enerji değerlerini kullanarak Vegard yasası denkleminde indiyum içeriğini belirlemek mümkündür. InGaAs 'ın kompozisyona bağlı yasak enerji aralığı değişimi,

$$E_g(x) = (1-x)E_g(\text{GaAs}) + xE_g(\text{InAs}) - bx(1-x) \quad (3.4)$$

Vegard yasası denklemi kullanılarak belirlenebilir. Burada b , E_g 'nin alaşım oranına göre değişimindeki bükülme (bowing) parametresidir [60]. Bu parametre, 0,436 eV olarak, yasak enerji aralığı değerleri ise, GaAs için 1,425 eV ve InAs için 0,36 eV olarak kullanıldı. Bu değerler Eş. 3.4 ile verilen Vegard denkleminde kullanıldığında

$$E_g(x) = 1,425 - 1,501x + 0,436x^2 \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak elde edilen indiyum kompozisyon değerleri (x), GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla %49 ve %36 olarak belirlendi. Bu değerler HRXRD ölçümleri sonucu LEPTOS simülasyon programı kullanılarak elde edilen indiyum kompozisyon değerleri ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca, SE ve PL ölçümleri sonucunda GS262 ve GS263 numunelerine ait banttan banda geçiş enerji (yasak enerji aralığı) değerleri incelendiğinde SE ve PL sonuçlarının

uyumlu olduğu görüldü.

GS262 ve GS263 InGaAs/GaAs SLpn yapılarının oda sıcaklığındaki PL piklerinin pik yarı genişlik (FWHM) değeri hesaplandı. FWHM değeri, sırasıyla, 37 ve 93 meV olarak bulundu. FWHM değeri artan In konsantrasyonu ile azaldığı görüldü.

BÖLÜM 4

4. TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir adet GaAs p-n eklem ve iki adet InGaAs/GaAs süperörgü yapısı (farklı alaşım oranlarına sahip) MBE tekniği ile büyütüldü. Büyütülen numunelerin, yapısal ve optik özellikleri; yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) sistemi, spektroskopik elipsometre (SE) ve fotoluminesans (PL) ölçümleri

yapılarak belirlendi.

Numunelerin yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı ölçümleri Bruker D8 Discover X-ışını kırınım cihazı ile yüksek çözünürlüklü Ge (002) monokromatörü kullanılarak yapıldı.

GaAs/GaAs yapısı ve InGaAs/GaAs SL yapıları için HRXRD ölçümlerinden elde edilen (004) simetrik düzlemlerine ait ω -2 θ X-ışını kırınım desenleri literatürle karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu gözlenmiştir GaAs/GaAs yapısının XRD grafiğinde görülen pik GaAs alttaşın kırınım pikidir. Bu pik aynı zamanda GaAs tampon tabakayı da içermektedir. Bu pikte herhangi bir yarıma gözlenmemesi tampon tabakanın iyi bir uyum ile alttaş üzerine büyümüş olduğunu gösterir.

InGaAs/GaAs yapıları olan GS262 ve GS263 SL yapılarının ω -2 θ X-ışını kırınım deseni XRD sistemi vasıtasıyla elde edildi. Daha önceki literatür değeri olan çalışmalardan görüleceği üzere; GaAs yapısına In ilave edildikçe kırınım pik pozisyonunun InAs'ın kırınım pik pozisyonuna yaklaşması gerekir. Bu gerçek altında, büyüttüğümüz yapılarda In oranı arttıkça InGaAs'a ait kırınım piki GaAs'a göre büyük açığa doğru kaymalıdır. Bu durum, bizim örneklerimizde de gözlenmektedir.

XRD kırınım deseninde InGaAs pik açılarının GaAs pikine göre açısal olarak ayrılması, yapıdaki In oranının belirlenmesine imkân verir. Örgü parametresi kullanılarak $A_xB_{1-x}C$ epitaksiyel alaşımındaki A elementinin oranı x , Bölüm 3'de verilen Eş. 3.3 ile tanımlanan Vegard yasası ile belirlenebilir. LEPTOS yazılımı ile deneysel veriler simüle edilerek, $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ yapısının alaşım oranları (x) belirlendi. Simülasyon sonucunda elde edilen In oranı GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla %49 ve %36 olarak elde edildi.

Numunelerimizin Spektroskopik Elipsometre (SE) ölçümleri, 75 W gücünde Xenon ışık kaynaklı faz modülasyonlu Jobin Yvon-Horiba Spektroskopik Elipsometre sistemi kullanılarak yapıldı.

Yarıiletken malzemelerde dielektrik fonksiyonun davranışı, yapının elektronik geçişleri hakkında detaylı bilgiler vermektedir. Dielektrik fonksiyonu, yarıiletkende bantlar-arası geçişler olarak değerlendirilen kritik enerji noktaları hakkında veriler içerir [43]. Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerin büyütme işleminden sonra, bant yapısı hakkında bilgi sahibi olabilmek için Spektroskopik Elipsometre (SE) ölçümleri alınmış ve literatür ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Tez çalışmamızda büyütülen GaAs/GaAs p-n eklem yapısının 0,6-4,6 eV foton enerjisi aralığında alınan dielektrik fonksiyonunun reel (ϵ_1) ve sanal (ϵ_2) kısımlarının spektrumları karakterizasyon bölümünde şekillerle verilmiştir. Elde edilen veriler literatürdeki algoritmalar kullanılarak hesaplandı. GS261 numunesi için bu CP enerjileri sırasıyla 1,429 eV, 2,877 eV, 3,103 eV ve 4,359 eV olarak belirlendi ve literatür ile uyumlu olduğu görüldü [46].

Tez çalışmamızda büyütülen InGaAs/GaAs SL yapılarının (GS262 ve GS263) 0,6-4,6 eV foton enerjisi aralığında alınan dielektrik fonksiyonunun reel kısmı (ϵ_1) spektrumları hesaplandı. GS262 numunesi için bu CP enerjileri sırasıyla 0,78 eV, 1,05 eV, 2,70 eV, 2,90 eV ve 4,50 eV olarak belirlenmiştir. Bu veriler tam olarak doğru CP enerji değerlerine karşılık gelmez ve bir model ile bulunması gerekir. GS262 ve GS263 numunelerinin tümünün üst tabaka kalınlığı 1 μm 'den fazla (elipsometre ölçüm aralığı dalgaboyundan daha büyük) olduğu için elipsometrik verilerin analizi LSA yöntemiyle yapıldı. Bu modelde, çizgi-şekli analizi yapmak için dielektrik fonksiyonunun reel kısmının ikinci türev, $\partial^2 \epsilon_1 / \partial E^2$ spektrumu nümerik olarak hesaplandı. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarının bantlar-arası geçiş kenarlarının kritik nokta enerjileri yukarıda bahsedilen metot kullanılarak belirlendi ve elde edilen değerler Tablo 4.4'de verildi.

GS262'nin dielektrik fonksiyonunun sanal kısmından belirlenen değerlerle fit sonucu elde edilen değerlerin uyumlu olduğu görüldü. Yapıların E_0 kenarı, fosfor kompozisyonunun artmasına bağlı olarak negatif bükülme ile düşük enerji değerine kaymaktadır. Benzer davranış Adachi ve arkadaşlarının çalışmasında da gözlenmiştir [58].

Yapıların optik karakterizasyonu için Photoluminesans (PL) ölçümleri alındı. GS261

p-n eklem yapısının ve farklı konsantrasyonlara sahip olan iki adet (GS262 ve GS263) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ SL yapısının oda sıcaklığında (300 K) PL ölçümleri görünür bölgede alındı.

Yarıiletken alaşımların yasak enerji aralığı lüminesans emisyonunun pik pozisyonundan belirlenebilir. Elde edilen verilerle GaAs'dan kaynaklanan emisyon piki gözlemlendi.

Yarıiletken alaşımların yasak enerji aralığı ve alaşım kompozisyonu lüminesans emisyonunun pik pozisyonundan belirlenebilir. GS262 ve GS263 için alınmış olan PL ölçümlerinden görüleceği üzere, indiyum kompozisyonundaki artış, beklenildiği gibi, numunelerin banttan banda geçişlerine karşılık gelen ana pik pozisyonunun değişmesine (kırmızıya kaymasına) sebep oldu. Nahary ve arkadaşlarının çalışmasında da (Şekil 4.13) bu durum gözlemlenmiştir [59,55].

Numunelerin PL ölçümlerinden belirlenen banttan banda geçiş enerjileri (yasak enerji aralığı) GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla 0,792 ve 0,938 eV olarak belirlendi. Bu enerji değerlerini kullanarak Vegard yasası denkleminde indiyum içeriğini belirlemek mümkündür. InGaAs 'ın kompozisyona bağlı yasak enerji aralığı değişimi, Vegard yasası denklemi kullanılarak belirlenebilir [60].

Vegard denkleminde kullanılarak elde edilen indiyum kompozisyon değerleri (x), GS262 ve GS263 numuneleri için sırasıyla %49 ve %36 olarak belirlendi. Bu değerler HRXRD ölçümleri sonucu LEPTOS simülasyon programı kullanılarak elde edilen indiyum kompozisyon değerleri ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca, SE ve PL ölçümleri sonucunda GS262 ve GS263 numunelerine ait banttan banda geçiş enerji (yasak enerji aralığı) değerleri incelendiğinde SE ve PL sonuçlarının uyumlu olduğu görüldü.

GS262 ve GS263 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ SLpn yapılarının oda sıcaklığındaki PL piklerinin pik yarı genişlik (FWHM) değerleri hesaplandı. FWHM değerleri, sırasıyla, 37 ve 93 meV olarak bulundu. FWHM değerleri artan In konsantrasyonu ile azaldığı görüldü.

Elektronik araçlarda kullanılan yarıiletken teknolojisi ileri seviyeye ulaşmasına rağmen ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalarda kullanılan malzemelerin birçoğu ithal

edilmektedir. Bu bağlamda bu tez çalışmasının deneysel basamaklarını gerçekleştirdiğimiz Gazi Üniversitesi FOTONİK Uygulama ve Araştırma Merkezi ülkemizdeki bu eksikliği gidermek adına çalışmalar yürütmektedir. Tez çalışmamız kapsamında yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar ışığında, literatüre; fotodedektör yapıları, led yapıları, güneş pili gibi teknolojilerin araştırma-geliştirme adımlarına destekleyici bilgi sağlayacağını umut etmekteyiz.

KAYNAKLAR

1. Ohiso Y. , Iga R., 2013, Two-step growth of metamorphic GaAs/AlGaAs mirror on an InP substrate by MOCVD, *Thin Solid Films*, 542: 317-326.
2. Sze, S. M., 2002 , *Semiconductor Devices Physics and Technology*, John Wiley&Sons, 85-127.
3. Ramaiah, K.S., Su, Y.K., Chang, S.J., Chen, C.H., 2006 , A comparative study of blue, green and yellow light emitting diode structures grown by metal organic chemical vapor deposition, *Solid-State Electronics*, 50: 119-124 .
4. Cho A., 1971, Film Deposition by Molecular Beam Epitaxy, *Journal ScienceTech.*, 8(1): 31-38.
5. Kröncke, H., Figge, S., Aschenbrenner, T., Hommel, D., 2013, Growth of AlN by pulsed and conventional MOVPE, *Journal of Crystal Growth*, 381: 100-106.
6. Sanchez- Nino, F., Anda-Salazar, F.J., 2013, Design of a movement control equipment for crystal growth by the liquid phase epitaxy technique, *Procedia Technology* 7: 181-188.
7. Madejczyk, P., Gawron, W., Martyniuk, P., Keblowski, A., Piotrowski, A., Pawluczyk, J., Pusz, W., Kowalewski, A., Piotrowski, J., Rogalski, A., 2013, MOCVD grown HgCdTe device structure for ambient temperature LWIR detectors, *Semiconductor Science and Technology* 28:105-112.
8. Eaglesham, D.J., Cerullo, M., 1990, Dislocation-Free Straniski-Krastanow Growth of Ge on Si(100), *Physical Review Letters* 64: 1943-1946.
9. Suryanarayana, C., Norton, M.G., 1998 , *X-ray diffraction a practical approach*, Plenum Press, New York, 98, 125.
10. Parker, E.H.C., 1985, *The technology and physics of molecular beam epitaxy*, Plenum Press, New York, 1-679.
11. Herzog, R.F.K., Viehboeck, F, 1949, Ion source for mass spectrography, **Phys. Rev.**, 76 (6): 855–856.
12. Hofmann, S., 2004, Sputter-depth profiling for thin-film analysis, **Phil. Trans. R. Soc.**, 362 (1814): 55–75.

13. Gfroerer, T.H., 2000, Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces, Encyclopedia of Analytical Chemistry R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 9209–9231.
14. Sedrine, N.B., Rihani, J., Stehle, J.L., Harmand, J.C., Chtourou, R., 2008, Spectroscopic ellipsometry analysis of GaAs_{1-x}N_x layers grown by molecular beam epitaxy, Materials Science and Engineering C, 28: 640-644.
15. Bauer, G., Richter, W., 1996, Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers, Springer-Verlag, New York, 6-128, 287-390.
16. Sedrine, N.B., Gharbi, T., Harmand, J.C., Chtourou, R., 2008, Optical constants and critical-point parameters of GaAs_{1-x}Sb_x alloy films grown on GaAs, Phys. Stat. Sol. A, 205(4): 833-836.
17. Dejneka, A., Aulika, I., Trepakov, V., Krepelka, J., Jastrabik, L., Hubicka, Z., Lynnyk, A., 2009, Spectroscopic ellipsometry applied to phase transitions in solids: possibilities and limitations, Optic Express 17: 14322-14337.
18. Seeger, K., 2002, Semiconductor Physics: An Introduction 8th edition, Springer-Verlag, Berlin, 10-32.
19. Yu, P.Y., 1996, Cardona Fundamentals of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2-11.
20. Kim, J.S., Kim, E.K., Song, J.D., Choi, W.J., Lee, J.I., 2006, Study on the Energy-Band Structure of an InAs/InGaAs/GaAs Quantum-Dot Infrared Photodetector Structure, Journal of the Korean Physical Society, 49(5): 2124-2127.
21. Holonyak, Jr.N., Bevacqua, S.F., 1962, Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions, Appl. Phys. Lett., 1: 82-83.
22. Kınacı, B., 2009, In_xGa_{1-x}As / GaAs Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi: Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s:3-4.
23. Kınacı, B., 2009, In_xGa_{1-x}As / GaAs Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi: Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, s:6.
24. Zory, P. S., 1993, Quantum Well Lasers, Academic Press, 1-93.

25. Namegaya, T., Matsumoto, N., Iwai, N., Nakayama, H. and Kasukawa A., 1994, Effects of Well Number in 1.3- μm GaInAsP/InP GRIN-SCH Strained-Layer Quantum-Well Lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30: 2.
26. Conny, H., Krishna K.R., 2006, Comparative Study of Infrared Photodetectors Based on Quantum Wells (QWIPS) and Quantum Dots (QDIPS), School of Information Science, Computer and Electrical Engineering Halmstad University, Sweden, 11-12.
27. Sze, S.M., 2002, Semiconductor Devices, Physics and Technology, John Wiley & Sons, USA, 85-127, 288-294.
28. A Wójcik, T.J Ochalski, J Muszalski, E Kowalczyk, K Goszczyński, M Bugajski, 2002, Photoluminescence mapping and angle-resolved photoluminescence of MBE-grown InGaAs/GaAs RC LED and VCSEL structures, Institute of Electron Technology, Poland, *Thin Solid Films*, 412: 1-2, 3, 114-121.
29. Esaki L., Tsu R., 1970, Energy levels in quasi uni-dimensional semiconductor heterostructures, *IBM J. Res. Devel.* 14(2): 61-69.
30. Keever M., Scichijo H., Hess K., Banerjee S., Witkowski L., Morkoç H., and Steetman B.G., 1981, Measurements of hot-electron conduction and real-space transfer in GaAs-Al_x/Ga_{1-x}/As heterojunction layers, *Appl. Phys. Lett.* 38(1), 36-38.
31. Ploog K., 1981, Molecular Beam Epitaxy of III-V Compounds: Technology and growth Process, *Applied Physics Letters*, 11(1): 171-210.
32. Yu, Y.P., Cardona, M., 2003, Survey of Semiconductors 3rd edition, Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties, Springer – Verlag, Berlin Heidelberg New York, 578.
33. Scuhubert E.F., 2003, What is difference between a MQW and a SL?, *Rensselaer Polytechnic Institute*, *Rensselaer*, 8(2): 85-100.
34. Herman, M. A., Sitter, H., 1996, Molecular Beam Epitaxy, Germany, Springer, 56-118.
35. Durlu, T.N., 1992, Katıhal Fiziğine Giriş, Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilim Yayınları, Ankara 24-25.
36. Zhou, D., Usher, B.F., 2001, Deviation of the AlGaAs lattice constant from Vegard's law, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 34: 1461-1465.

37. Takaqi, S., 1962, Dynamical theory of diffraction applicable to crystals with any kind of small distortion, *Acta Crystallogr.*, 15: 1311-1312.
38. Taupin, D., 1964, Theorie dynamique de la diffraction des rayons x par les crustaux deformes, *Bull. Soc. Fr. Mineral. Crystallogr.*, 87: 469-511.
39. LEPTOS User Manual (www.bruker-axs.de), Version 2 ,2004.
40. Sundaram, M., Wang, S.C., Taylor, M.F., Reisinger, A., Milne, G.L., Rei, K.B., Rose, R.E., Marin, R.R., 2001, Two-color quantum well infrared photodetector focal plane arrays, *Infrared Phys. Technol*, 42: 301-308.
41. Fujiwara, H., 2007, "Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications", John Wiley&Sons, New York, 1-3, 259-260.
42. Sundaram, M., Wang, S.C., Taylor, M.F., Reisinger, A., Milne, G.L., Rei, K.B., Rose, R.E., Marin, R.R., 2001, Two-color quantum well infrared photodetector focal plane arrays, *Infrared Phys. Technol*, 42: 301-308.
43. Lautenschlager, P., Garriga, M., Logothetidis, S., Cardona, M., 1987, Interband critical points of GaAs and their temperature dependence, *Phys. Rev. B*, 35(17): 9174-9189.
44. Anderson, R. L., 1962, Experiments on Ge-GaAs heterojunctions, *Solid State Electronics*, 5(5), 341-344.
45. Morkoç, H., 1999, Nitride Semiconductors and Devices, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 8-44.
46. Tansley, T.L., Egan R.J., 1993, Defects, optical absorption and electron mobility in indium and gallium nitrides, *Physica B: Con. Mat.*, 185(1-4): 190-198.
47. Strite S., Morkoç H., 1992, GaN, AlN and InN: A review, *Journal of Vacuum Science Technology B*, 10(4): 1237-1266.
48. Bloom, S., 1971, Band structures of GaN and AlN, *J. Chem. Phys. Sol.*, 32(9): 2027-2032.
49. Razeghi, M., Henini, M., 2004, Optoelectronic devices: III-Nitrides, Elsevier Ltd., London, 1-8.
50. Johnson, W.C., Parsons, J.B., 1932, Nitrogen compounds of gallium. I, II, *J. Phys. Chem.*, 36: 2588-2594.
51. Tansley, T.L., Foley, C.P., 1986, Optical band gap of indium nitride, *J. Appl. Phys.*, 59: 3241-3244.

52. Alahmary, A., Bouarissa, N., Kamli, A., 2008, Band structure and lattice vibration properties of III-P ternary alloys, *Physica B*, 403 (12): 1990-1995.
53. Boylestad, R., Nashelsky, L., 2000, *Electronic Devices and Circuit Theory*, Prentice-Hall, Inc., New York, 3-25.
54. Matsuoka, T., Okamoto, H., Nakao, M., Harima, H., Kurimoto, E., 2002, Optical Bandgap Energy of Wurtzite InN, *Appl. Phys. Lett.*, 81(7): 1246-1248.
55. Van de Walle, C.G., McCluskey, M.D., Master, C.P., Romano, L.T., Johnson, N.M., 1999, Large and composition-dependent band bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys, *Materials Science and Engineering B*, 59: 274-278.
56. Chiu, S.Y., Anwar, A.F.M., Wu, S., 2000, Base transit time in abrupt GaN/InGaN/GaN HBT's", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 47(4): 662-666.
57. Liou, B.T., Lin, C.Y., Yen, S.H., Kuo, Y.K., 2005, First-principles calculation for bowing parameter of wurtzite $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, *Optics Communications*, 249: 217-223.
58. Nakamura, S., 1999, InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes, *J. Crystal Growth*, 201/202: 290-295.
59. Bayliss, S.C., Demeester, P., Flecther, I., Maretin, R.W., Middleton, P.G., Moerman, I., O'Donnell, K.P., Sapelkin, A., Trager-Cowan, C., Van Der Stricht, W., Young C., 1999, The optical and structure properties of InGaN epilayers with very high indium content, *Materials Science and Engineering B*, 59: 292-297.
60. Hanser, A.D., Banks, A.D., Davis, R.F., Jahnen, B., Albrecht, M., Dorsch, W., Christiansen, S., Strunk, H.P., 2000, Growth and microstructure of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films grown on SiC substrate via low pressure metalorganic vapor phase epitaxy, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 3: 163-171.

EKLER

1. Efker, H. İ., Kızılkaya, K., Asar, T., Özen, Y., Kınacı, B., Karaaslan, T., Yıldırım, S.Ö., Özçelik, S., 2013, The Electrical Properties of TiO₂ AR Coated InGaAs/GaAs SLSCs, TFD 30, Turkey.
2. Efker, H.İ., Kurtuluş, G.,Pişkin, E., Çetin, S.S., Asar, T., Karaaslan, T., Özçelik, S., 2013, InGaAs/GaAs Yapılarının Optik Özelliklerinin Belirlenmesi, YMF 19,Turkey.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Halil İbrahim EFKERE
Uyruğu : T.C.
Medeni Hali : Bekâr
Doğum tarihi ve yeri : 20.03.1987 – KAYSERİ
Telefon : +90 (507) 253 32 58
e-mail : halilibrahimefkere@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi / Fizik Bölümü	2013
Lisans	Selçuk Üniversitesi / Fizik Bölümü	2009
Lise	Kocasinan Y.D.A. Lisesi KAYSERİ	2005

Yabancı Dil

İngilizce