

**$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ TABAKALI
YARIİLETKEN YAPILARIN OPTİK ve YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ**

Sabit KORCAK

**DOKTORA TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2007
ANKARA**

Sabit KORCAK tarafından hazırlanan $Al_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}N$ TABAKALI YARIİLETKEN YAPILARIN OPTİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :Prof. Dr. Ziya B. GÜVENÇ

Üye :Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Üye :Prof. Dr. Ali GENCER

Üye :Prof. Dr. Ergün KASAP

Üye :Prof. Dr. Mehmet KASAP

Tarih :02/02/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sabit KORCAK

**$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ TABAKALI YARIİLETKEN
YAPILARIN OPTİK ve YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ
(Doktora Tezi)**

Sabit KORCAK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2007**

ÖZET

Bu çalışmada elektronik ve opto-elektronik cihazların üretilmesinde kullanılan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ tek kuantum kuyulu (QW), $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyulularının (MQWs) büyütülerek, optik ve yapısal özellikleri incelendi. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (100) LED Moleküler Demet Epitaksi (MBE) ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED ise Metal Organik Buhar Faz Birikimi (MOVCD) teknikleri ile büyütüldü. Büyütülen $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ yarıiletkenlerinin kristal yapı analizi ve optik özellikleri Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Spektroskopik Elipsometre (SE) ve Fotoluminesans (PL) sistemleriyle belirlendi.

Bilim Kodu	:202.1.147
Anahtar Kelimeler	:MBE, MOVCD, QW, MQW, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$
Sayfa Adedi	:92
Tez Yöneticisi	:Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**OPTICAL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF
Al_xGa_{1-x}As AND In_xGa_{1-x}N LAYERED
SEMICONDUCTOR STRUCTURES
(Ph.D. Thesis)**

Sabit Korcak

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
February 2007**

ABSTRACT

In this study, optical and structural properties of Al_xGa_{1-x}As/GaAs single quantum well (SQW), Al_xGa_{1-x}As/GaAs and In_xGa_{1-x}N/GaN multi quantum wells (MQWs) are analyzed by growing, which are used in the production of electronic and optoelectronic devices. Al_xGa_{1-x}As/GaAs (100) LED are grown by Molecular Beam Epitaxy (V80H-MBE), and In_xGa_{1-x}N/GaN LED are grown by using Metal Organic Vapour Chemical Deposition (MOVCD). Crystal Structure analyse and optical properties of grown Al_xGa_{1-x}As/GaAs and In_xGa_{1-x}N/GaN semiconductors and determined by high resolution X-Ray diffraction (HR-XRD), Atomic Force Microscopy (AFM), Spectroscopic Elipsometry (SE), and photoluminescence (PL) systems.

Science Code	:202.1.147
Key Words	:MBE, MOVCD, QW, MQW, Al_xGa_{1-x}As/GaAs, In_xGa_{1-x}N/GaN
Page Number	:92
Adviser	:Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e, tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Tofik MEMEDOV'a, InGaN numunesinin büyütülmesi ve desteklerinden dolayı Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a, Yarıiletken Fiziği ve Teknolojileri Araştırma laboratuvarında (Starlab) çalışan ve her zaman desteklerini gördüğüm Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a, Dr. M. Kemal ÖZTÜRK'e, Dr. Barış AKAOĞLU'na, Süleyman ÇÖREKÇİ'ye ve laboratuvarlarda görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarına 2001 K 120590 nolu proje ile desteklerinden dolayı Devlet Planlama Teşkilatı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. III-V GRUBU YARIİLETKENLER	5
2.1. III-V Grubu Yarıiletken Bileşikler	5
2.2. GaAs, AlAs Yarıiletken Bileşiği	7
2.3. Nitritlerin Genel Özellikleri	8
2.3.1. Nitritlerin kristal yapısı	8
2.3.2. GaN yarıiletken bileşiği	12
2.3.3. InN yarıiletken bileşiği	13
2.3.4. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletken alaşımı	14
3. KRİSTAL BÜYÜTME YÖNTEMLERİ	17
3.1. MOCVD Yöntemi	18
3.2. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Sistemi	19
3.3. MBE’de Epitaksiyel Büyütme Modları.....	23
3.3.1. Frank–van-der-Merwe büyütme modu	24

	Sayfa
3.3.2. Stranski-Krastanov büyüme modu.....	24
3.3.3. Volmer-Weber modu	26
3.4. MBE’de İç-Ölçüm Teknikleri	26
4. MBE’DE İNCE FİLM BÜYÜTME SÜRECİ	30
4.1. MBE’in Kristal Büyütmeye Hazırlanması	30
4.2. Alttaş Hazırlama.....	31
4.3. Büyütme Sürecinin Analizi	32
4.4. Büyüme Oranı Kalibrasyonu.....	33
4.5. Alttaşın Özellikleri	36
4.6. Oksit Tabakasının Kaldırılması.....	37
4.7. Numunelerin Büyütmesi.....	37
4.7.1. $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.2$) süperörgüsünün büyütülmesi	37
4.7.2. $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ($x=0,2 \rightarrow 0,6$) QW büyütülmesi.....	39
5. BÜYÜTÜLEN YAPILARIN KAREKTERİZASYONU	44
5.1. Yüksek Çözünürlükteki X-Işını Kırınımı	44
5.2. $AlGaAs/GaAs$ ve $InGaN/GaN$ Yapılarının Analizi	49
5.2.1 Numunelerin x-ışını kırınımı ölçümleri ve analizi.....	51
5.2.2. $InGaN$ yapısının Atomik Kuvvet Mikroskobu analizi.....	77
5.2.3. $InGaN$ yapısının optik özelliklerinin incelenmesi	78
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Periyodik tablonun bir kısmı	5
Çizelge 2.2. Bileşimleri ile yapay yarıiletkenlerin elde edilebilen, periyodik tablonun II-VI grubunda yer alan bazı elementler.....	6
Çizelge 4.1. Maksimum hücre çalışma sıcaklıkları	30
Çizelge 4.2. Kullanılan taban numunenin özellikleri	37
Çizelge 5.1. Süperörgü yapısının XRR ve HXRD'dan elde edilen sonuçları	52
Çizelge 5.2. QW LED yapısının XRR ve HXRD'dan elde edilen sonuçları	54
Çizelge 5.3. InGaN için XRR ve HXRD'dan elde edilen sonuçlar	55
Çizelge 5.4. GaN simetrik ve asimetrik piklerinin FWHM ve Theta Değerleri	62
Çizelge 5.5. In _x Ga _{1-x} N alaşımında x mol kesrine bağlı olarak bazı sabitlerin Değerleri	71

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. III-V yarıiletken bileşiklerin enerji aralığının örgü parametresine bağlılığı	7
Şekil 2.2. a) ve b) hekzagonal örgüler için Miller indislerine örneklerdir.....	9
Şekil 2.3. Enerji aralığın örgü sabitine karşı grafiği.....	11
Şekil 2.4. Wurtzite yapılı kristaller için Birinci Brillouin Bölgesi.....	11
Şekil 3.1. Epitaksiyel büyümede a) moleküler demetlerin altaşa yönelimi b) altaş üzerinde biriken atomların yeni yapı oluşturmalarının şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.2. MOCVD yada MOVPE sisteminin şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.3. MBE sisteminin vakum odalarının şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.4. MBE Sisteminin şematik diyagramı.....	21
Şekil 3.5. Farklı birikme miktarları (θ) için a) Frank–van-der-Merwe, b) Stranski-Krastanov ve c) Volmer-Weber büyütme modu büyütme modu.....	23
Şekil 3.6. Stranski-Krastanov büyütmesinde a)Altaş üzerindeki maddenin ilk biriktirilmesi; b)Gerilmiş monotabaka meydana gelmesi; c) t_c , kritik kalınlığı oluşana kadar 2D büyütmesi; d)3D büyütme dönüşümü.....	25
Şekil 3.7. RHEED’in temel gösterimi. Üsteki şekil difraksiyon ile saçılmayı. Alttaki şekil yüzeyden saçılmayı gösterir.....	27
Şekil 3.8. Epitaksiyel büyüme sırasındaki RHEED deseni a) Si(100)-1x1 b) Si(100)-2x1	28
Şekil 3.9. a) ve b) RHEED yardımı ile elde edilen yüzey morfolojisinin oluşumunu göstermektedir.....	28
Şekil 3.10. Büyüme Sürecinde RHEED salınımları.....	29
Şekil 4.1. Gelen moleküler demetlerin a) yüzeyde etkileşme potansiyel enerji değişim grafiği, b) uğradığı farklı işlemler.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. III-V grubundaki bazı elementlerin Sıcaklık–Buhar Basıncı değişimi.....	35
Şekil 4.3. In için Sıcaklık–Basıncı eğrisi.....	35
Şekil 4.4. Ga için Sıcaklık–Basıncı eğrisi.....	36
Şekil 4.5. As ₂ için Sıcaklık–Basıncı eğrisi.....	36
Şekil 4.6. 20 periyotlu Al _x Ga _{1-x} As/GaAs süperörgü yapısı.....	38
Şekil 4.7. Kuantum Kuyulu Al _x Ga _{1-x} As/GaAs yapısı.....	40
Şekil 4.8. Büyütme işlemi sırasında sıcaklığın, akının ve Alüminyum yüzdesinin zamana bağlı grafiği.....	42
Şekil 4.9. Al _x Ga _{1-x} As /GaAs Kuantum Kuyulu Yapısı.....	43
Şekil 5.1. XRD ölçümlerinin geometrisi.....	45
Şekil 5.2. XRD şematik resmi.....	45
Şekil 5.3. Hekzagonal sistemlerin yatay ve düşey eksenle gösterimi.....	47
Şekil 5.4. Yansıma şiddetinin gelme açısına bağlılığı.....	48
Şekil 5.5. Yansıma şiddetinin büyütülen filmin kalınlığına bağlı değişimi (Si alttaş üzerine büyütülen Ir metal filmi).....	48
Şekil 5.6. Yansıma şiddetinin elde edilen tabakalarının yüzey pürüzlülüğüne bağlı grafiği.....	49
Şekil 5.7. In _x Ga _{1-x} N/GaN LED Yapısı.....	50
Şekil 5.8. MOCVD yöntemiyle safir üzerine mavi LED büyütme sürecinin zaman-sıcaklık şeması.....	50
Şekil 5.9. Al _{0.2} Ga _{0.8} As/GaAs MQW süperörgü yapısının ω -2 θ taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ QW LED yapısının ω -2 θ taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir.....	53
Şekil 5.11. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapısının w-2 θ grafiği.....	54
Şekil 5.12.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (002) filminin simetrik rocking eğrileri.....	56
Şekil 5.13.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (004) filminin simetrik rocking eğrileri.....	56
Şekil 5.14.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (006) filminin simetrik rocking eğrileri.....	57
Şekil 5.15.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (101) filminin simetrik rocking eğrileri.....	57
Şekil 5.16.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (102) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	58
Şekil 5.17.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (103) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	58
Şekil 5.18.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (105) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	59
Şekil 5.19.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (112) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	59
Şekil 5.20.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (121) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	60
Şekil 5.21.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (204) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	60
Şekil 5.22.Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (213) filminin asimetrik rocking eğrileri.....	61
Şekil 5.23. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW LED yapısının yansıma grafiği.....	63
Şekil 5.24. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapısının yansıma grafiği.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapısının a) (002) ve b) (004) ω -2 θ simetrik taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir.....	64
Şekil 5.26.Safir üzerine GaN(101) düzleminin asimetrik θ açıları.....	65
Şekil 5.27.Safir üzerine GaN(102) düzleminin asimetrik θ açıları.....	66
Şekil 5.28.Safir üzerine GaN(103) düzleminin asimetrik θ açıları.....	66
Şekil 5.29.Safir üzerine GaN(105) düzleminin asimetrik θ açıları.....	67
Şekil 5.30.Safir üzerine GaN(112) düzleminin asimetrik θ açıları.....	67
Şekil 5.31.Safir üzerine GaN(121) düzleminin asimetrik θ açıları.....	68
Şekil 5.32.Safir üzerine GaN(204) düzleminin asimetrik θ açıları.....	68
Şekil 5.33.Safir üzerine GaN(213) düzleminin asimetrik θ açıları.....	69
Şekil 5.34.Safir üzerine GaN (102) düzleminin asimetrik θ açıları ve pik değerleri.....	69
Şekil 5.35.Safir üzerine GaN (105) düzleminin asimetrik θ açıları ve pik değerleri.....	70
Şekil 5.36.Alttaşın (102) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	71
Şekil 5.37.Alttaşın (103) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	72
Şekil 5.38.Alttaşın (105) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	72
Şekil 5.39.Alttaşın (112) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	73
Şekil 5.40.Alttaşın (121) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	73
Şekil 5.41.Alttaşın (204) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.42. Alttaşın (213) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	74
Şekil 5.43. Alttaşın (004) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	75
Şekil 5.44. Alttaşın (002) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	76
Şekil 5.45. Alttaşın (002) yöneliminde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW ölçülen ters uzay haritası.....	76
Şekil 5.46. a) İki boyutlu b) üç boyutlu GaN yüzeyinin AFM görüntüsü	77
Şekil 5.47. Aynı sıcaklıkta enerjinin kuyu yüksekliğine bağlı PL spektrumu.....	79
Şekil 5.48. LED yapısının fotolüminesans spektrumu.....	80
Şekil 5.49. LED yapısının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ve GaN tabakalarının optik aralıklarının gösterimi.....	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. MBE (VG80H-10) sisteminin resmi.....	19
Resim 4.1. Molibden numune tutucuya yerleştirilmiş GaAs alttaş.....	32

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

E_g	Yasak enerji aralığı
$\vec{k}$	Dalga vektörü
h	Planck sabiti
m_e	Elektronun kütlesi
m_h	Holün kütlesi
a	Örgü sabiti
c	Örgü sabiti
λ	Dalga boyu
b	Eğrilme parametresi
x	In ve Al konsantrasyonu

Kısaltmalar

Açıklama

MBE	Molecular Beam Epitaxy
LED	Işık veren diyot(Light Emitting Diyode)
RHEED	Reflection High Energy Electron Diffraction
QW	Kuantum kuyusu
MQW	Çoklu kuantum kuyusu
MOCVD	Metal Organik Buhar Faz Epitaksi
TMG	Trimetilgalyum
TMA	Trimetilalüminyum
TMI	Trimetilindiyum
BEP	Demet Eşdeğer Basıncı
UHV	Çok Yüksek Vakum (Ultra High Vacuum)
ML	Momotabaka (Mono Layer)

Kısaltmalar	Açıklama
FWHM	Yarı Genişlik
XRD	X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction)
HR-XRD	Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskopi
RSM	Ters Uzay Haritası
RMS	Root-Mean Square
PL	Fotoluminesans (Photoluminescence)
SE	Spektroskopik Elipsometre
LPE	Sıvı Faz Epitaksi (Liquid Phase Epitaxy)
QMS	Quadropol Mass Spectrometer
VPE	Buhar Faz Epitaksi (Vapour Phase Epitaxy)

1. GİRİŞ

Tabiatta bulunan yarıiletken malzemeler Si ve Ge'dur. Bunlar elementer yarıiletken olup mikrochip üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanısıra indium-fosfat (InP) ve galyum-arsenik (GaAs) gibi ikili, InGaAs gibi üçlü ve InGaAlAs gibi dördümlü alaşımlar da elektronik ve opto-elektronik cihazların üretiminde temel elemanlardır. Ancak bu yarıiletkenleri doğada saf olarak bulmak mümkün değildir. Bunlar yapay olarak belirli ve yüksek teknoloji ihtiva eden sistemlerle (yapay büyüme teknikleriyle) üretilmektedir. Bu malzemelerin üretilmesi yüksek teknolojinin varlığını ve yüksek teknolojinin varlığı da bu malzemelerin üretilmesine bağlıdır.

Kristal büyüme tekniklerindeki en son gelişmeler, yarıiletkenleri çok daha değişik amaçlı kullanım durumuna getirmiştir. Yapay büyüme teknikleriyle, yüksek hassasiyetli tabaka-tabaka yarıiletken malzeme üretimini yapılmaktadır. Bu sistemler dünyadaki birçok araştırma merkezinde ve gelişmiş üniversitelerde bulunmaktadır.

Günümüzde sanayide, üniversite ve diğer araştırma birimlerinde teknolojik uygulamaları olan epitaksiyel yarıiletken malzemeler ülkemizde sınırlı sayıda üretilmektedir. Tek kristal bir alttaş üzerine tek kristal yarıiletken ince yapıların büyüme süreci olarak tarif edilen epitaksi, yarıiletken teknolojisinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Kimyasal Buhar Birikimi (CVD) ve Metal-Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) geliştirilen epitaksiyel tekniklerin en önemlilerindendir. Bu tekniklerden MBE sistemi düşük büyüme hızına sahip rağmen, ultra yüksek vakumda ve kontrollü kristal büyütülmesine imkan sağlaması açısından tercih edilen tekniklerin ilk sırasında yer almaktadır [1]. Bununla birlikte özellikle GaN bazlı yarıiletken yapıların büyütülmesinde MOCVD tekniği büyütülecek yapının hekzagonal ve büyüme sıcaklığının yüksek olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. MBE sistemi ülkemizde ilk olarak, DPT-2001K120590 nolu proje kapsamında Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünde Yarıiletken Malzeme ve Teknolojileri Araştırma Biriminde;

MOCVD tekniği ise yine ülkemizde ilk olarak Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kurulmuştur.

Yukarıda bahsedilen yapay büyütme teknikleriyle yarıiletken malzemelerin çeşitliliği artarak GaAs tabanlı kristallerin yanı sıra GaN, InGaN, AlGaIn, SiC gibi mavi ışık veren diyotlar [2-5] elde edilmiş bunlarla ilgili kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları üretilmeye başlanmıştır [6, 7]. Bu rnekleri diğer yarıiletken cihazlar üzerinde de çoğaltmak mümkündür. Mikrodalga bölgesinde ve dijital devrelerde kullanılan SiGe, heteroyapılı çift kutuplu transistörlerin yapımında kullanılan SiGe [8, 9], optik yayıcılar, optik dalga kılavuzları, dedektörler, optiksel haberleşme sistemlerinde kullanılan InGaAlAs [10], LED olarak kullanılan GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ [11, 12] bunlara örnek olarak verilebilir. Günümüz Lazer teknolojisinin malzemesi olan yarıiletken kuantum kuyu ve noktaları en iyi şekilde MBE ve MOCVD teknikleri ile üretilmektedir [13-17]. Uzun dalga boylarında iletişimin daha hassas olmasından dolayı bu tür yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Bu konuda halen yoğun çalışmalar büyük araştırma merkezlerinde ve üniversitelerde devam etmektedir.

Günümüz yarı iletken malzeme ve üretim teknolojisini kullanarak, uzun ömürlü ve verimli yüksek-güçlü yarı-iletken lazerleri ve fotodedektörleri uygun maliyetlerle tasarlayıp üretimini gerçekleştirmek ve bu teknolojiyi geliştirmek mümkündür.

Elektrik enerjisini doğrudan ışık enerjisine eviren yarı-iletken lazerler, elektro-optik ve lazer teknolojisinde çok önemli bir yere sahiptirler [18]. İletişimden sağlığa, sağlıktan malzeme teknolojilerine kadar bir çok sivil uygulamalarda kullanıldıkları gibi, mesafe lme, hedef belirleme, kimyasal gaz tespiti, güvenli ve yüksek hızda kesintisiz iletişim gibi çok çeşitli askeri uygulamalarda da yaygınca kullanılmaktadırlar. Günümüzde, yüksek-güçlü yarı-iletken lazerler düşük verimli ve kısa ömürlü ışık kaynaklarının yerine geçmişlerdir [19]. Yarıiletken lazerlerin getirdiği avantajları sayarsak; uzun ömürlüdürler ve daha az bakım isterler, kk boyutları sayesinde az yer kaplarlar, %50'ye varan verimleri sayesinde ısıya dönüşen kayıpları diğer ışık kaynaklarına göre çok daha düşüktür, bundan dolayı daha basit ve

az yer kaplayan soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulur, flaş-lambalarının aksine belirli bir dalgaboyunda yaydıkları ışınım sayesinde katı-hal lazerlerinin pompalanmasında en ideal durumu yaratırlar ve bu durum katı-hal lazer sistemlerinin verimini ayrıca arttırır.

Son 20 yıl içerisinde araştırmacılar, birkaç nanometre kalınlığında değişik katmanları üst üste koyarak ilginç yapılar elde ettiler. Kuantum kuyusunun kalınlığındaki küçülmeler, düşük eşik akım yoğunluğu ve eşik akımının ısıya bağlı değişiminin çok küçük olmasını sağlaması açılarından son derece önemlidir [19].

Yarı-iletken tabaka yapıları dışında diyot lazerlerin paketlenmesi ve elektronik parça haline getirilmesi de iyi düzeyde malzeme teknolojisi gerektirmektedir. Oldukça küçük boyutlarda yüksek güçlerin harcandığı yarı-iletken lazerlerin oluşturduğu ısıyı emecek, ısı değişikliklerinde yarı-iletken yapıya düşük mekanik gerilim uygulayacak paket yapılarının tasarımı ve üretimi de önemlidir. Bu yapılar, yarı-iletken lazerlerin uzun ömürlü olmasını sağlar.

Sensör teknolojisi, çevre birimlerden yayılan bilgiyi algılamak amacıyla çeşitlenmekte ve gelişmektedir. Gelişen sensör tiplerinin en önemlilerinden biri de Kızılötesi-infrared-(KÖ) dedektörlerdir. KÖ algılama görünür ve mikrodalga spektrumları (~700 nm to 0.1 mm) arasındaki dalgaboylarını içerir.

KÖ algılama, yangında, gaz analizlerinde; sağlık alanında: hızlı ve doğru sıcaklık ölçümü, vücut sıvısı analizi ve çeşitli hastalık teşhislerinde; askeri alanda; hedef belirleme-izlemede, tank ve uçak gibi sıcak hedeflerin belirlenmesinde, gecegörüş sistemlerinde yararlı olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada, önce elektronik ve opto-elektronik cihazların üretilmesinde kullanılabilen tek kuantum kuyulu $Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletkeni, yapay büyütme tekniklerinden MBE tekniği kullanarak elde edildi. Elde edilen bu yarıiletken yapı ve Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında MOVCD ile büyütülen $In_xGa_{1-x}N$ yarıiletkeninin kristal yapı analizi ve optik özellikleri, X-Işını Kırınım

Spektrometresi, Atomik Kuvvet Mikroskopy, Spektroskopik Elipsometre ve Fotoluminesans Spektroskopisi sistemleri ile belirlendi. Yapısal ve optiksel karakterizasyonları belirlenen bu yarıiletken yapıların opto-elektronik cihaz üretimine uyumluluğu tartışıldı.

Bu çalışmanın 2. Bölümünde Yarıiletken Fiziğinin Temel Kavramları, 3. Bölümde Kristal Büyütme Yöntemleri, 4. Bölümde Moleküler Demet Epitaksi Sistemi ile kristal büyütme süreci anlatıldı. 5. Bölümde Büyütülen Yapıların Karakterizasyonu sunularak, son bölüm olan 6. Bölümde ise Sonuçlar ve Öneriler kısmında elde edilen bulguların analizi ve sonuçları irdelendi.

2. III-V GRUBU YARIİLETKENLER

2.1. III-V Grubu Yarıiletken Bileşikler

Bileşimli yarıiletkenlerin çoğu periyodik tablonun II-VI, III-V ve IV-VI grubunda yer alan materyaller (Çizelge 2.1) kullanılarak yapay tekniklerle elde edilebilmektedir.

III-grubu elementlerden Alüminyum (Al), Galyum (Ga) ve İndiyum (In) ile V-grubu elementlerden Fosfor (P), Arsenik (As) ve Antimon (Sb) elementlerinin alaşımı (bileşimi) ile elde edilen GaAs, InP, InGaAs, AlGaAs gibi yarıiletken malzemeler elde edilebilmektedir. Ayrıca grup-III-nitrür bileşimleri son yıllarda teknolojik uygulamaları ile önemini artıran yarıiletken malzemelerdir.

Çizelge 2.1. Bileşimleri ile yapay yarıiletkenlerin elde edilebilen, periyodik tablonun II-VI grubunda yer alan bazı elementler

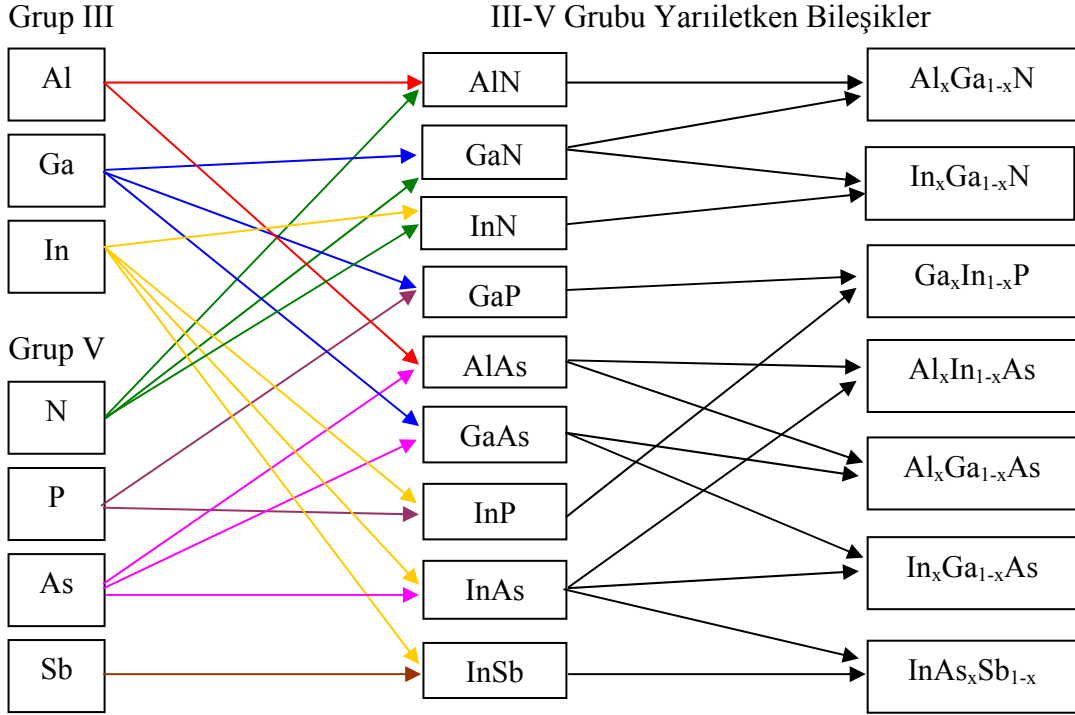
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
-	Mg	Al	Si	P	S	-	-
-	Zn	Ga	Ge	As	Se	-	-
-	Cd	In	Sn	Sb	Te	-	-

III ve V gruplarına ait olan elementlerin yarıiletken bileşikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir [20].

Yeryüzünde bolca kaynağı bulunan alüminyum ve fosfor haricinde, yarıiletken bileşiklerinde bulunan diğer elementler, silikonla karşılaştırıldıklarında çok az bulunurlar. Bu yarıiletken bileşikler, ham madde elde etme ve kristalleri saflaştırma işleminin maliyetinden dolayı silikondan daha pahalıdır. Yarıiletken bileşiklerin maliyetinin yüksek olmasına ve silikonun her yerde bulunmasına rağmen diğer

yarıiletken bileşikler dünya çapında talep görmektedir. Bunun için geçerli nedenler vardır:

Çizelge 2.2. III-V grubu yarıiletken bileşikler.



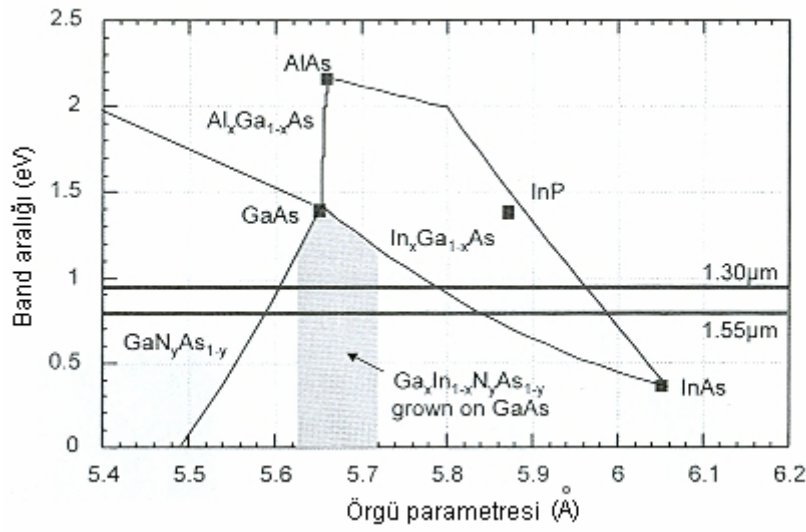
1. Silikonla çoğunlukla pn eklemleri kullanılmaktadır. GaAs ve InP gibi yarı iletken bileşikler kolaylıkla iki tür yarıiletken arasında farklı eklemler oluşturabilir.
2. Yarıiletken bileşikler silikonda olmayan eşsiz fiziksel özellikler sağlar: Lazer ışınları emisyonu ve yüksek mobiliteli elektronları meydana getirilmesi.

Yarıiletken bileşiklerin eşsiz fiziksel özelliklerinden yarıiletken lazerler, mikrodalga yarıiletkenler ve yüksek hızlı dijital integral devrelerde (IC) faydalanınız. Örneğin,

1. Uzayda kurulmuş yeryüzüne enerji göndermek için mikrodalgalar kullanan güneş enerji istasyonları; Bu tarz istasyonlar küresel ısınma problemini azaltabilir,
2. Herhangi bir yerde ya da zamanda tek bir tuşa basarak, herhangi bir yere bilgi gönderilmesine imkan sağlayan yüksek kapasiteli optik haberleşme,
3. Bir TV istasyonu lazer ışınlarıyla ayın yüzeyine (ayın sinema ekranı olarak kullanma) görüntüler yansıtabilir,

gibi ileriki yıllarda rüyalarımızı gerçeğe çevirebiliriz.

Yukarıda sözü edilen gruptaki elementlerin bileşiminden uygun yapılarda yarıiletken kristal büyütmede temel parametrelerden biri örgü uyumudur. Örgü sabitleri birbirine yakın olan elemet ya da alaşımlar bir arada yeni yapı oluşmasına imkan sağlar. III-V yarıiletken bileşiklerin enerji aralığının örgü sabitine bağlılığı Şekil 2.1’de verilmiştir [21].



Şekil 2.1. III-V yarıiletken bileşiklerin enerji aralığının örgü parametresine bağlılığı

2.2. GaAs, AlAs Yarıiletken Bileşiği

Al(GaAs) çok yönlü olarak araştırılmakta ve yarıiletken malzemelerde bileşik olarak kullanılmaktadır. GaAs; Ga ve As elementlerinden oluşan bir yarıiletken bileşiktir. AlAs ise Al ve As elementlerinden oluşan bir bileşiktir. GaAs yarıiletken bileşiği mikro dalga frekans entegrelerinde, kızıl ötesi dedektörlerde, LED’lerde ve güneş pillerinin yapımında kullanılır [22]. Yarıiletken cihaz yapımında en çok tercih edilenlerden biri de GaAs tabanlı yapılardır. GaAs ve AlAs enerji bant aralıkları sırasıyla 1,42 eV ve 2,16 eV’tur [23].

Al_xGa_{1-x}As yarıiletkenlerinde enerji band aralığı AlAs ve GaAs bileşiklerinin örgü sabitlerine bağlıdır. Bu durumda enerji band aralığı değeri 1,42 eV (GaAs) ve 2,16 eV (AlAs) arasında değişir. Al konsantrasyonu (x değeri) ise 0-1 arasında bir değer

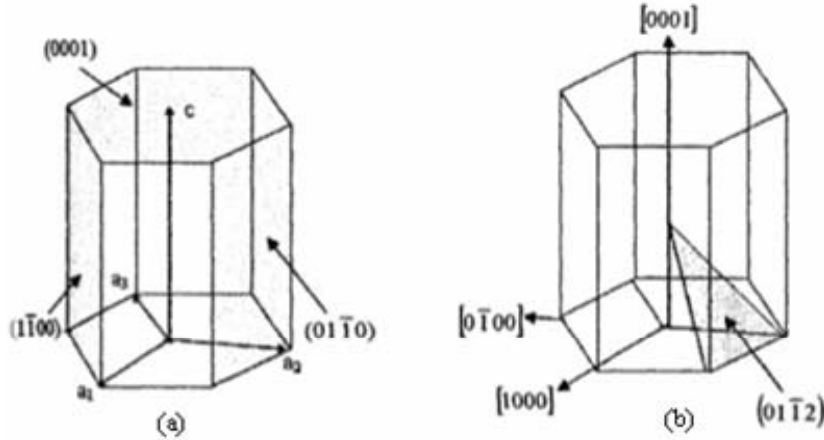
alır ve bu değer alaşımdaki AlAs ve GaAs oranına bağlı olarak değişir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; GaAs tabanlı yarıiletken malzeme yapımında bariyer olarak kullanılır. Elektronik cihazların yapımında genellikle $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasının ince veya Al konsantrasyonunun düşük olması tercih edilir [23].

2.3. Nitritlerin Genel Özellikleri

Yarıiletken nitritler, üstün optik ve elektriksel özelliklere sahip mükemmel materyallerdir. İlgili parametrelerin cihazlarda kullanılabilirliğini ve bu materyallerde uygulanabilirliğinin açıklanabilmesi açısından aşağıda verilecek konular aydınlatıcı olacaktır.

2.3.1. Nitritlerin kristal yapısı

Grup-III nitritleri, Wurtzite, zincblende (çinko sülfür) ve rocksalt (kaya tuzu) olmak üzere üç farklı kristal yapıda oluşur. Öncelikle zincblende yapıda grup-III yapısı oluşturulmuş ve incelenmiştir. Fakat geniş bant aralıklı AlN, GaN ve InN yarıiletken bileşiklerin çevreleyen koşullar altında, termodinamik olarak kararlı yapıları wurtzite yapısıdır. GaN ve InN için Zincblende yapı kübik alttaşların (örneğin Si, MgO ve GaAs gibi) $\{011\}$ kristal düzlemleri üzerine ince filmlerin epitaksiyel olarak büyümesiyle kararlı bir yapı olur. Kaya tuzu veya NaCl yapı, çok yüksek basınç altında AlN, GaN ve InN'da bir akım meydana getirebilir. Wurtzite yapı bir altıgen (hekzagonal) birim hücreye sahiptir. Bu nedenle Wurtzite yapıda a ve c olmak üzere iki örgü sabiti vardır. Her bir örgü sabiti, tipinin 6 atomunu kapsar. Wurtzite yapı, iç içe geçmiş iki hekzagonal sıkı paketli yapıdan (hcp) oluşmaktadır. Şekil 2.2'de hekzagonal bir yapı görülmektedir [24].



Şekil 2.2. a) ve b) hekzagonal örgüler için Miller indislerine örneklerdir [24]

Zincblende yapı, dört grup-III elementi ve dört azot elementini kapsayan kübik birim hücreye sahiptir. Birim hücresi içinde atomların pozisyonu, elmas kristal yapıya özdeştir. Her iki yapı, iki yüzey-merkezli kübik alt örgülerin tamamen iç içe girmesiyle oluşurlar.

Zincblende ve wurtzite yapıları, benzerdirler. Her iki durumda, her bir grup-III atomu, dört azot atomuyla düzenlenir. Bunun aksine ise, her bir azot atomu, dört grup-III atomları tarafından düzenlenebilir. Bu iki yapı arasındaki ana fark, sıkı paketlenmiş iki atomlu düzlemlerinin sıralı yapışmasındadır. Wurtzite yapı için, (0001) düzleminde yapışma sırası (dizilişi) $\langle 0001 \rangle$ yöneliminde olup ABABAB şeklindedir. Zincblende yapı için, (111) düzleminde yapışma sırası $\langle 111 \rangle$ yöneliminde olup ABCABC şeklindedir.

GaN, AlN ve InN III-V nitrit bileşikler, InN için 1,89 eV, AlN için 6,2 eV ve GaN için ise 3,4 eV doğrudan ve geniş bant aralığına sahip yarıiletkenlerdir. Bu özelliklerinden dolayı III-V nitrit yarıiletken bileşiklerine geniş bant aralıklı yarıiletken bileşikler de denilmektedir. Kısa dalga boylu optoelektronik ve elektronik cihazlar için uygun özellikleri nedeniyle üzerlerine olan ilgi son yıllarda artmıştır. III-V nitrit yarıiletken bileşikler çoğunlukla mavi ve ultraviyole (UV) dalga boylarında çalışan optoelektronik yarıiletken cihazlar için kullanılmaktadır: Yüzey

akustik dalga cihazı, UV dedektörü, UV ve görünür ışık yayma diyotları (LED'ler) ve lazer diyotlardır.

Geniş bant aralığı, düşük saf taşıyıcı konsantrasyonuna yol açar. Böylece geniş bir sıcaklık aralığında, serbest taşıyıcı konsantrasyonu kesinlikle kontrol edilebilir.

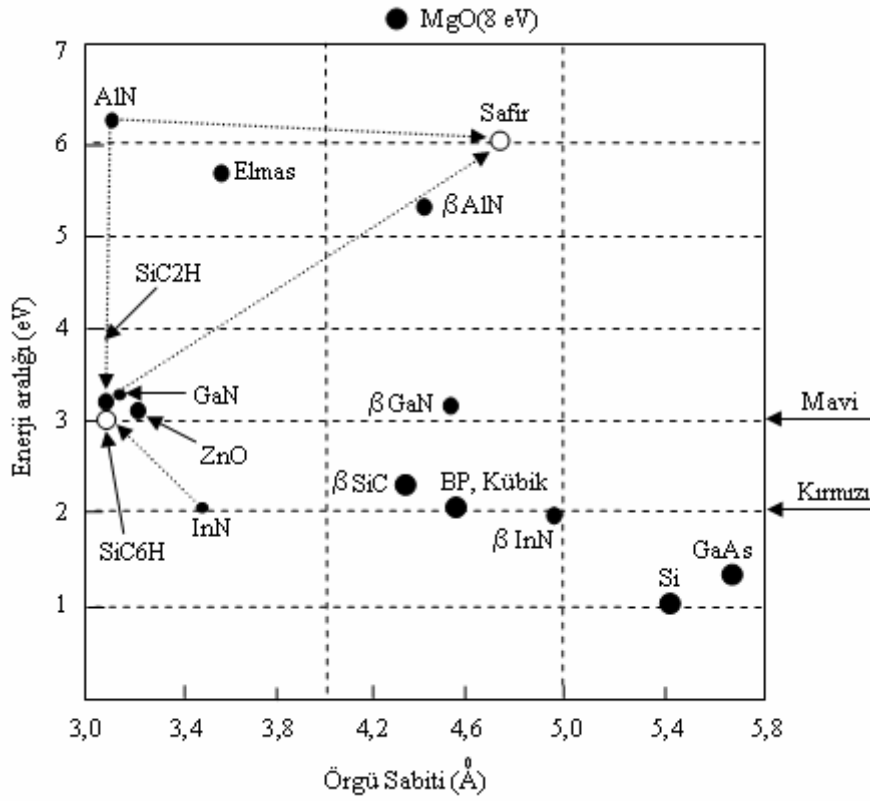
Nitritler, nitritler için kullanılan alttaşlar ve diğer yarıiletkenlerin örgü sabiti-bant aralığı grafiği Şekil 2.3'de görülmektedir.

Wurtzite yapıya sahip grup III-nitrit yarıiletken bileşiği için Brillouin Bölgesi Şekil 2.4'de verilmiştir. Hekzagonal yapıya sahip olduğu için birinci Brillouin Bölgesinin ve birim hücresinin hacimleri sırasıyla,

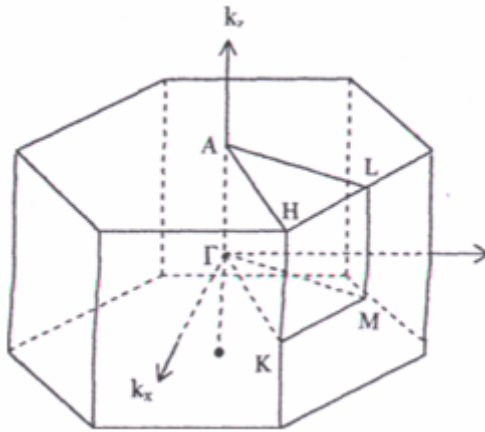
$$2(2\pi)^3 (\sqrt{3}a^2c)^{-1} \quad (2.1)$$

$$\frac{(\sqrt{3}a^2c)}{4} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Wurtzite yapıda Γ simetri noktası Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, hekzagonal yapının merkezinde bulunmaktadır. Bu yapıya sahip materyallerin bant yapılarında Γ noktası merkezdedir. A noktası ise en üst bölgenin merkezindedir. Fakat wurtzite yapının bant yapısı hakkında henüz tam olarak yeterli bilgi yoktur [25].



Şekil 2.3. Enerji aralığının örgü sabitine karşı grafiği [25]



Şekil 2.4. Wurtzite yapılı kristaller için Birinci Brillouin Bölgesi [25]

Grup-III-nitrit yarıiletkenler doğaları gereği polar yarıiletkenlerdir. Polar yarıiletkenler diğer yarıiletkenlere göre daha geniş ve doğrudan bant aralığına sahiptirler [26]. İletim bantları ve valans bantları s ve p durumlarından oluşur [27]. İletim bandı kenarındaki elektronlar tetrahedral grubun işlemlerinden sorumlu olan s

fonksiyonlarının simetri özelliklerine sahip dalga fonksiyonlarıdır. Bunlar düzlem dalgalarla ifade edilirler. Bant kenarının yukarısındaki enerjilere sahip elektronlar ise lokalize olurlar ki, örgünün p orbital durumlarına sahiplerdir. Kane'a [28] göre; parabolik olmayan yapılarda elektron dalga fonksiyonu s ve p fonksiyonlarının lineer bir bileşkesidir. Böylece, elektron enerjisinin kristal momentumuna bağıllığı artık parabolik değildir.

2.3.2. GaN yarıiletken bileşiği

AlN ve InN bileşikleri içerisinde GaN bileşiği, yüksek dielektrik kırılma alanı, yüksek ısı iletkenliği olması nedeniyle yüksek güç gerektiren elektronik cihazlar için dikkat çekmiştir [6]. Grup III-Nitrit yarıiletken bileşikler arasında üzerinde en çok çalışma yapılanı GaN bileşiğidir. Çünkü GaN geniş bant aralığına sahip olmasının yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda da kimyasal kararlılığını korumaktadır. GaN bileşiği yüksek *n-tipi taşıyıcı* konsantrasyonuna sahiptir. Ayrıca GaN yarı-yalıtkan da olabilir. Bu verici (V_N) ve kompanse (G_N) baskınlığına bağlıdır. Verici düzeyleri 10 meV ile 40 meV aralığında bulunmuştur [29]. Bu materyalde ve diğerlerinde de N boşluktan alıcı olarak düşünülerek, iletimi sağladıkları kabul edilmektedir [30]. GaN bileşiğini p-tipi olarak oluşturmak hayli güçtür. Buna ilaveten geliştirilmesindeki zorluklar nedeniyle geçmiş yıllarda GaN materyali ile çalışmalar zor olmuştur. Teknolojinin ilerlemesi ile gelişen kristal üretim yöntemleri ve oluşum teknikleri bu zorlukları ortadan kaldırmaya başlamıştır. Böylece GaN bileşiği üretilmiş ve Mg ile katkılandığında p-tipi yarıiletken olarak da oluşturulmuştur [29]. Günümüzde GaN tabanlı cihazlar üretmek üzere çalışmalar artarak devam etmektedir.

Wurtzite yapılı GaN, $a=3,18\text{\AA}$ ve $c=5,16\text{\AA}$ örgü sabitlerine sahiptir. Bilindiği gibi, GaN iki hekzagonal yapının iç içe geçmesi ile oluşmuştur. Wurtzite yapılı Ga-N ikili bileşikler için Ga ve N bileşenlerinin atomik tabakalarının sıklığı $[0001]$ ve $[000\bar{1}]$ doğrultuları boyuncadır. (0001) ve $(000\bar{1})$ yüzeylerine Ga-yüzeyi ve N-yüzeyi karşılık gelir. Bu yüzeylere göre de Ga-yüzeyi polarizasyonuna ve N-yüzeyi polarizasyonuna sahip olur [31].

GaN yarıiletken bileşiğinin ilk bant yapısı Bloom tarafından hesaplanmıştır [32]. GaN yarıiletken bileşiğinin enerji bant aralığı doğrudan bant aralığı olup, oda sıcaklığında 3,4eV değerine sahiptir. İletim bandı minimumu ve valans bandı maksimumu Γ noktasında bulunmaktadır [33].

2.3.3. InN yarıiletken bileşiği

20. yüzyılın başlarında InN bileşiği üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmış ve bu çalışmalar başarılı olmamıştır. Bu nedenle InN bileşiği GaN ve AlN kadar ilgi çekmemiştir. InN bileşiği uygun taban materyali olmaması, yüksek kusursuz konsantrasyonlu olması yanında, In ve N atomik yarıçapları arasındaki fark nedeniyle geliştirilmesi oldukça güçtür [34]. 1970'li ve 1980'li yıllarda deneysel tekniklerin gelişmesi ile InN yarıiletken bileşiği elde edilmiştir. Fakat iyi nitelikli bir yarıiletken bileşiği olarak değil, çok kusurlu bir bileşik olarak elde edilmiştir. Daha sonraki yıllarda tek kristal olarak InN yarıiletken bileşiği elde edilmiş ve incelemeler yapılmıştır [35].

InN bileşiğinin bant aralığının geniş, düşük etkin kütleli ve yüksek optik fonon enerjisine sahip olması nedeniyle elektronlar, yüksek pik ve doyum sürüklenme hızına sahip olurlar. Bu özellikleri nedeniyle de, yüksek güçlü ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Böylece InN bileşiği üzerine yapılan çalışmalar önem kazanmıştır.

InN yarıiletken bileşiği de GaN gibi wurtzite (hekzagonal) yapıdadır. Örgü sabitleri $a=3,53\text{\AA}$ ve $c=5,69\text{\AA}$ değerlerindedir. InN için piezoelektrik sabiti henüz bilinmemektedir. Bu nedenle, dielektrik sabitlerine bağlılığı, yaklaşık olarak AlN bileşiğinin piezoelektrik sabitinin yarısı olan bir değere sahip olduğu varsayılır [36].

InN yarıiletken bileşiği Γ noktasında 1,89eV'luk doğrudan bant yapısına sahiptir [34, 37]. InN yarıiletken bileşiğinin bant aralığının 1.89eV olarak belirlenmesine karşın 1,7-2,07eV aralığında bir değerde alabileceği belirtilmektedir. InN bileşiğinin bazı

parametrelerinin net olarak bilinmemesi nedeniyle, bant aralığının incelenmesi üzerine çalışmalar son yıllarda artmıştır [38-40].

InN bileşiği, GaN bileşiği gibi taban durumunda n-tipi yarıiletkenidir. InN yarıiletken bileşğinde de N boşlukları (V_N) alıcı olarak düşünülür. Böylece; iletme bu doğal kusurlar olan N boşluklarının neden olduğu belirtilmektedir [3]. InN için alıcı düzeyleri 25 meV ve 95 meV olarak hesaplanmıştır. InN yarıiletken bileşiği $n > 10^{18} \text{cm}^{-3}$ olduğunda dejenere olur ki, bu durumda elektron mobilitesi en düşük değerinde bulunur [41].

2.3.4. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletken alaşımı

Grup III-nitritleri ile yapılan çalışmalar çoğunlukla ikili bileşikleri, GaN, AlN ve InN, üzerine olmuştur. Daha sonraları ikili bileşikleri ile üçlü ve dördü alaşımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Fakat bu çalışmalar, GaN, AlN ve bunların üçlü alaşımları üzerine yoğunlaşmıştır. Daha önce de dediğimiz gibi, InN bileşiğinin iyi nitelikli olarak geliştirilememesi nedeniyle bu bileşikler ile oluşturulan alaşımlar üzerine çalışmalar az olmuştur.

Son yıllarda Nakamura'nın $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı üzerine yaptığı çalışmalar bu ilgiyi daha da arttırmıştır [29, 42, 43]. Yüksek parlaklıkta mavi, yeşil, sarı ışık yayan diyotları ve mavi lazer diyotların yapımında kullanılırlar [44-46]. Bu cihazlarda InGaN yarıiletken bileşiği kuantum kuyusu (QW) olarak kullanılır [47]. Aktif tabaka olarak kullanılan InGaN kırmızıdan UV ışığına kadar ışık çıkarabildiği için LED'lerde ve lazer diyotlarında (LD) taban olarak kullanılır. InGaN aktif tabakasına enjekte edilen elektronlar ile deşiklerin birleşmesi sonucu ışık yaymaktadır [44]. Bu nedenle çok önemli bir bileşiktir. Katkı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı da, GaN ve InN gibi n-tipi yarıiletkenidir [48].

Wurtzite GaN ve In bileşikleri ile oluşan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı da wurtzite yapıdadır. Wurtzite yapılı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının örgü sabitleri ise bu alaşımı oluşturan iki bileşiğin örgü sabitleri arasındaki bağıntı lineer olarak verilir [49]. Yani bu ifade

Vegard yasasına uygun olarak alınır. Bu yasaya göre $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımasının a ve c örgü sabitleri

$$a_{(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})} = xa_{(\text{InN})} + (1-x)a_{(\text{GaN})} \quad (2.3)$$

$$c_{(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})} = xc_{(\text{InN})} + (1-x)c_{(\text{GaN})} \quad (2.4)$$

şeklinde verilir [50, 51]. Örgü sabitlerinin birimleri Å cinsindedir. Burada x(In) mol kesrini ifade etmektedir.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımasının bant yapısı Γ noktasında doğrudan bant aralığına sahiptir. X mol kesrinin çeşitli değerleri için $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımasının bant yapısı literatürde verilmiştir [50]. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımasının bant aralığının x(In) mol kesri ile değişimi Vegard yasasına uygun olarak,

$$\varepsilon_g^{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = x\varepsilon_g^{\text{InN}} + (1-x)\varepsilon_g^{\text{GaN}} - x(1-x)b \quad (2.5)$$

şeklindedir [52]. Burada b eğrilme parametresidir.

Bir yarıiletken alaşımda, eğrilme parametresine iki katkı vardır. İlk katkı alaşımı oluşturan ikili bileşiklerin gerçek kristal potansiyellerinden gelir. İkinci katkı ise alaşımın oluşmasında meydana gelen potansiyel dalgalanmalardan oluşur. Gerçek kristal potansiyeli eğrilme parametresine ya pozitif ya da negatif katkı verir. Fakat bu katkı oldukça küçüktür. Katkı potansiyel dalgalanmalardan oluşuyorsa bu durumda b eğrilme parametresi pozitif değer alır [50]. Dridi ve arkadaşları $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ in eğrilme parametresinin pozitif işaretli olduğunu söylerler [53]. Eğrilme parametresi genel olarak 1 eV alınması uygundur [27]. Fakat deneysel çalışmalar ile uygunluk açısından değişik değerlerde alınmaktadır [53, 54]. Bechstedt ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada b eğrilme parametresinin x mol kesrine bağlılığı,

$$b(x) = (1 - x)(11.4 - 19.4x) \quad (2.6)$$

şeklinde olup birimi eV'tur [54]. Bu ifadeye göre eğrilme parametresine bağlı olarak bant aralığının değeri önemli ölçüde değişmektedir. Bu nedenle b parametresi alaşımların bant aralığının hesaplanmasında önemli bir sabit olup ihmal edilmemelidir.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının yoğunluğunun x mol kesrine bağlı değişimi,

$$d = (6,1 + 0,7x) \cdot 10^3 \quad (2.7)$$

ifadesiyle verilir [27]. Burada yoğunluğun birimi ise kg/m^3 'tür. GaN bileşiğine In katkılanması sonucu ses hızındaki değişim,

$$v_s = (6,59 - 0,35x) \cdot 10^3 \quad (2.8)$$

ifadesiyle verilir [27]. Burada hızın birimi m/s'dir.

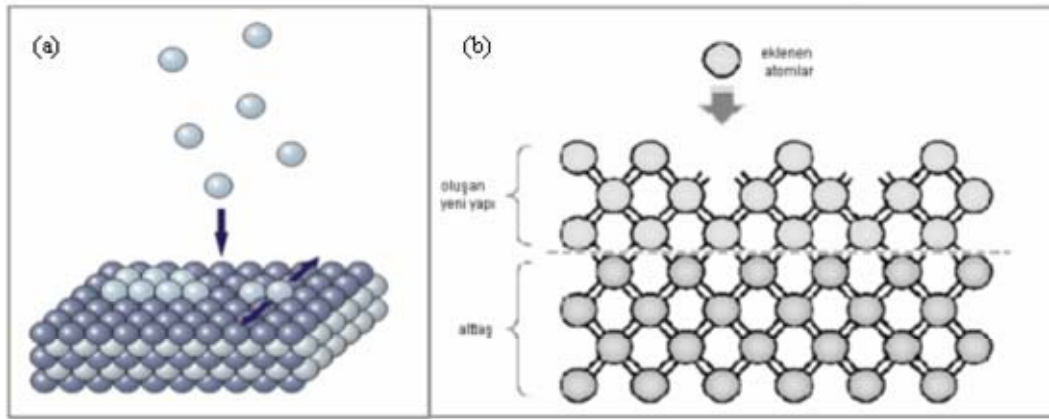
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının etkin kütlesi $0,115m_0$ - $0,22m_0$ aralığında değişmektedir. Etkin kütlenin In kesrine bağlılığı,

$$m^* = (0,22 - 0,105x)m_0 \quad (2.9)$$

ifadesiyle verilir [27]. Burada etkin kütle kg birimindedir.

3. KRİSTAL BÜYÜTME YÖNTEMLERİ

Bilindiği gibi bir sıra “hacimli tek kristal” büyütme yöntemleri vardır. Bu yöntemler içerisinde Czochralski ve Bridgman-Stockbarger yöntemi temel yöntemlerdir. Bu yöntemlerle elde edilen Si veya GaAs gibi yarıiletken malzemeler elektronik sanayisinde kullanılabilecek kalitede üretilmektedir. Gelişen teknoloji ve geliştirilen kristal büyütme yöntemleri ile nm mertebesindeki kalınlıklarda kristal büyütülmesine imkan sağlamıştır. Czochralski ve Bridgman teknikleri ile elde edilerek ince dilimler haline getirilebilen “çekirdek” kristal tabanlar (alttaş) üzerine tek kristal tabakalar büyütülebilmekte ve böylece elde edilen katmanlı yapılar üstün özelliklere sahip olabilmektedirler. Bir tek kristal numune üzerine yine tek kristal tabakaları büyütme işlemine epitaksi denir. Yüksek vakumda atomların bir demeti daha genel olarak moleküllerin bir demeti alttaş kristaline yöneltilmiştir. Böylece atomlar veya moleküller alt tabakanın yüzeyine yapışırlar ve yeni birikmiş madde tabakası oluşur (Şekil 3.4) [55].



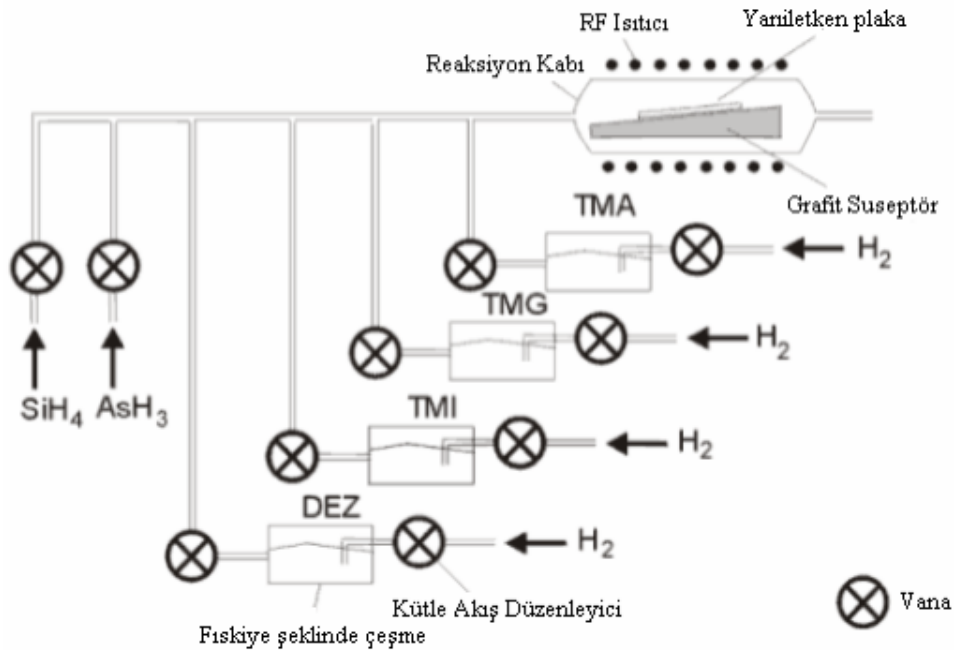
Şekil 3.1. Epitaksiyel büyümede a) moleküler demetlerin alttaşa yönelimi b) alttaş üzerinde biriken atomların yeni yapı oluşturmalarının şematik gösterimi

Günümüzde epitaksiyel büyütme için geliştirilen; Buhar-Faz Epitaksi (VPE), Sıvı-Faz Epitaksi (LPE), Metal Organik Kimyasal Buhar birikimi (MOCVD) ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yaygın olarak kullanılan teknik ya da yöntemlerdir. Biz burada bunlardan iki tanesini açıklayacağız.

3.1. MOCVD Yöntemi

MOCVD ya da MOVPE (Metal Organik Buhar Faz Birikimi) bir alttaş materyali üzerine atomik biriktirme ile kontrol edilebilir epitaksiyel tabakaların oluşumunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk olarak Maruska ve Tietjen tarafından [3] GaN büyütme reaktörü olarak tasarlandı ve InN'lı filmlerin büyütülmesi için de kullanılabilir düzeyde geliştirildi. Günümüzde çeşitli reaktör geometrilerinde üstün kalitede III-nitrit yapıların üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde, bu çalışmada kullandığımız InGaN yapısının üretildiği, ilk MOCDV reaktörü Bilkent Üniversitesinde kurulmuştur.

Alttaş bir reaksiyon tankı (kabı) içindeki duyarlı grafit üzerine yerleştirilir ve bir RF indüksiyonlu ısıtıcıyla ısıtılır (Şekil 3.2). Sıcaklık büyüyen bileşiğin cinsine bağlıdır. Büyüme 100 ve 700 Torr'luk bir basınç arasında hidrojen atmosferinde oluşur.



Şekil 3.2. MOCVD yada MOVPE sisteminin şematik gösterimi

Büyümenin habercisi ise epitaksiyel tabaka formunun sıcak alttaş ile temas halinde ayrışmasıdır. Grup III kaynağı Ga(CH₃)₃ Trimetilgalyum (TMG) iken grup V

kaynağı AsH_3 arsindir. Diğer grup III materyalleri Şekil 3.2'den de görüldüğü gibi: Alüminyum için $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ Trimetilalüminyum (TMA), İndiyum için $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ Trimetilindiyum (TMI), Silikon için SiH_4 Silan ve Çinko için $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ Dietilçinko'dur [49]. Bu kaynak malzemeler reaktör içerisine çoğunlukla hidrojen taşıyıcı gazı ile transfer edilir. MOCVD'de, $1000\text{ }^\circ\text{C}$ civarına kadar ısıtılan allttaş üzerinde NH_3 ile TMG, TMA, TMI gazlarının reaksiyonu sonucunda GaN, AlGaN ve InGaN gibi yarıiletken bileşimler elde edilebilmektedir [56].

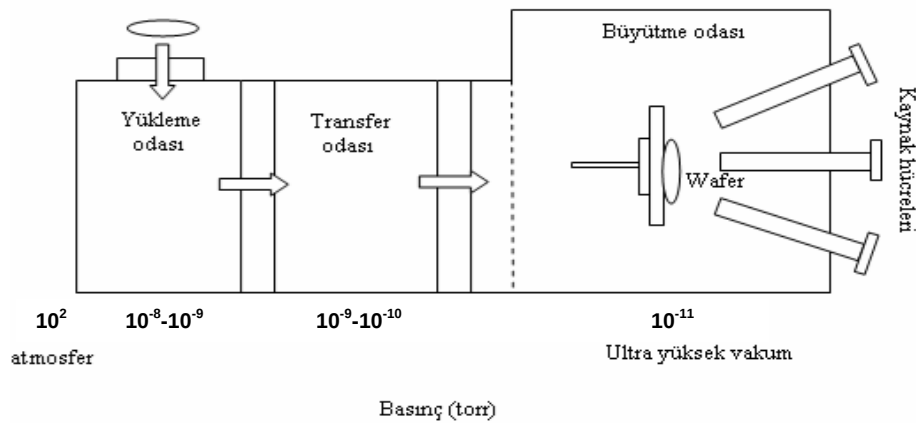
3.2. Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Sistemi

Moleküler Demet Epitaksi (MBE), yüksek saflıkta yarıiletken epitaksiyel tabakalar büyütmek için bir araç olarak 1970'li yılların başlarında geliştirildi [57, 58]. O zamandan bu yana MBE, diğer çeşitli malzemeler örneğin oksitler, Si ve Ge gibi III-V ve II-VI yarıiletken bileşikleri büyütmek için popüler bir teknik haline geldi. MBE yarıiletkenler, metaller yada yalıtkanlardan elde edilen ince epitaksiyel yapıların büyütülmesi için çok yönlü bir tekniktir [59]. MBE'de çok kaba ara yüzeyli, iyi (monolayer) kontrol kalınlığıyla, kusursuz katkılamayla ve doğru bileşimle yüksek kalitede tek tabakalı kristaller üretilebilir. MBE ile mümkün olan yüksek derecedeki kontrolden dolayı, karmaşık elektronik ve optoelektronik araçların gelişmesinde önemli bir kristal büyütme sistemidir [60].



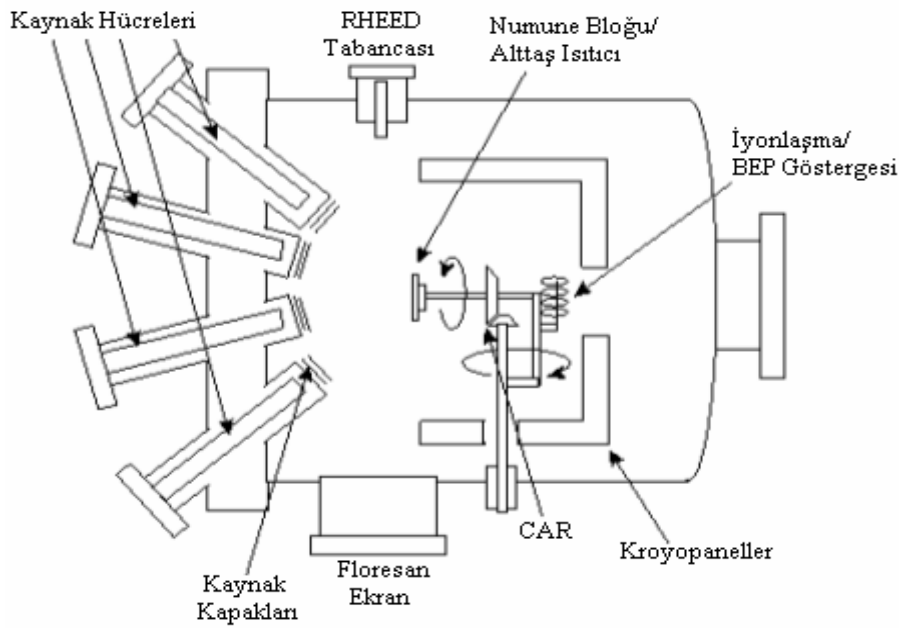
Resim 3.1. MBE (VG80H-10) sisteminin resmi [61]

Ülkemizde ilk olarak Gazi Üniversitesi Fizik Bölümünde kurulan katı-kaynaklı Moleküler Demet Epitaksi Resim 3.1’de Sisteminin resmi görülmektedir. Ultra yüksek vakumda kristal büyütme tekniği olarak da tarif edilebilen MBE sistemi yükleme/giriş, tampon/hazırlık ve büyütme olmak üzere üç ana vakum odasından oluşur. En önemli oda numunenin büyütüldüğü büyütme odasıdır. Tampon/hazırlık odası büyüme odasına girmeden önce numunenin hazırlanması ve saklanması için kullanılan odadır ve 10^{-10} mbar mertebesinde vakumlanabilmektedir (Şekil 3.4). *Yükleme/giriş odası* ise 10^{-8} mbar’lık vakum büyüklüğü ile diğer odaların vakum bütünlüğü korunurken numunenin vakum odasına getirilmesinde ve vakum odasından çıkarılmasında kullanılır. Aynı anda birden fazla numuneyi barındırabilecek bir kasete sahiptir. *Tampon/Hazırlık/Transfer Odası*: Numunenin hazırlanması ve saklanması için kullanılır. Numunenin su, yağ ve benzeri buharlaşabilen kirliliklerden ısıtılarak (450°C) ilk sistem içi temizliğin yapıldığı birimdir. *Büyütme Odası*: Genel MBE sisteminin büyütme odasının ve onun bazı alt sistemleri Şekil 3.3’de görülmektedir [62]. Büyütme odası: numunenin büyütüldüğü yerdir. Taban numune, manyetik olarak bağlantılı bir transfer çubuğu ile büyütme odasındaki numune tutucuya/ısıtıcıya taşınır. Üretilecek olan yarıiletken malzeme kaynağı (effüzyon hücreleri) arzu edilen malzeme akısı elde edilecek ve birbirinden bağımsız olacak şekilde ısıtılır. Büyütme sırasında bu hücrelerden bilgisayarla kontrol edilen bir aralıktan belirli zamanlarda elementler vakum ortamındaki taban üzerine gönderilerek büyütme yapılır.



Şekil 3.3. MBE sisteminin vakum odalarının şematik gösterimi

MBE nin bir şematik yapısı Şekil 3.4’de görülmektedir. Şeklin sol tarafında kaynak (effusion) hücreleri vardır. Kaynak hücreleri, ya bulk bileşenleri ya da katkı bileşenleri için moleküler demeti sağlar. Bu hücreler termal buharlaşma hücreleri, gaz ortamda oluşan hücreler ya da plazma kaynaklarından oluşur.



Şekil 3.4. MBE Sisteminin şematik diyagramı

Kaynakların önünde hızlı açılıp kapanabilen bir kaynak kesici vardır. Bu da demetin gönderilip gönderilmemesini sağlar. Hücreler ve kaynak kapaklarının karşısında ısıtılabilen ve dönebilen bir tablaya yerleştirilmiş alttaş tabaka vardır.

Yarıiletken malzemenin bir alt tabaka üzerine epitaksiyel büyütülmesi için Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yönteminin gelişmesi, kimyasal bileşiminin bir atom uzunluğu ölçeğinde değiştiği yarıiletken yapıları üretmeyi mümkün kılmaktadır [63]. Bu yöntemde yeni malzeme, bir atomlar demeti biçiminde alt tabakaya ulaşırlar. Bağımsız kaynak hücreleri, demetteki her bir element için kullanılırlar. Böylece alt tabakaya ulaşan farklı elementlerin bağıl miktarını değiştirmek mümkündür. Bu yolla yeni malzemenin kimyasal bileşimi kontrol edilebilir ve değiştirilebilir. Büyütme

hızları genellikle $1\mu\text{m/sa}$ civarındadır. Alt tabakanın sıcaklığı iyi epitaksiyel büyütme için yeterince yüksek, ancak yerleştirilen atomların önemli mesafelere difüzyonunu önlemek için yeterince düşük olabilmelidir [64, 65].

MBE’de bir yarıiletken alaşımı meydana getiren elementler, moleküler demet formunda ince epitaksiyel tabaka biçiminde kızgın bir alttaş kristali üzerine tortu bırakır. Moleküller demet, termal olarak buharlaşan kaynaklardan gelir. Yüksek saflıkta tabakalar elde etmek için, malzeme kaynakları aşırı derecede saf ve tüm işlemler çok yüksek vakumda yapılması çok önemlidir. Bu tür vakum şartlarında uzun bir ortalama serbest yola sahip serbest atomlar arasında çarpışma ihtimalleri yok denecek ölçüdedir. Böylece kaynaklardan gelen atomlar alttaş materyali ile çarpışana kadar düz bir doğrultuda hareket ederler. Diğer bir önemli özellik; büyütme oranlarının tipik olarak birkaç $\text{\AA/s}$ mertebesinde olmasıdır [66]. Hücre kapaklarının bir saniyeden daha az bir sürede kapatılabilir olması nedeniyle ışınlar atomik olarak bir maddeden diğer bir maddeye ani geçişlere izin verir.

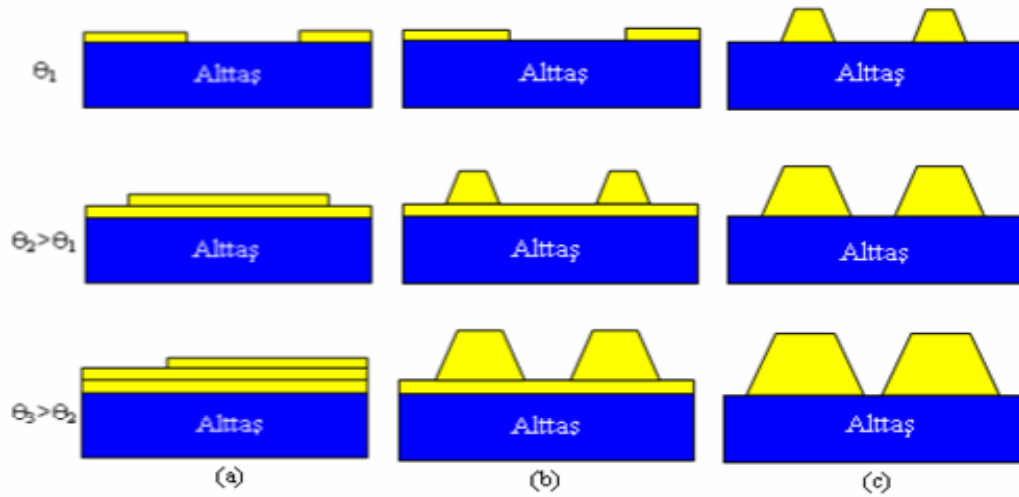
Bu açıklamalardan sonra özetle MBE büyütme tekniğinin başlıca özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [67]:

1. Çok düşük büyüme basıncı ($\sim 10^{-9}$ Torr): Temiz yüzey üzerine atomik olarak tabaka tabaka büyütme izin verir.
2. Düşük büyüme sıcaklığı ($350\text{-}600^\circ\text{C}$): Katı halde difüzyon ve kendiliğinden katkılamaı azaltır.
3. Yavaş büyüme oranı ($0,1\text{-}5 \text{\AA s}^{-1}$): Atomik olarak ince tabaka büyütme ve daha iyi tekdüzeliğe izin verir.
4. Çok tabaka büyütme kapasitesi: Kuantum kuyusu ve süper örgü yapılarının büyütülmesine izin verir.
5. Yüzey analiz kapasitesi: Örneğin Yansıma Yüksek-Enerji Kırınımı (RHEED), Auger Elektron Spektroskopisi (AES) ve X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) gibi.

MBE sisteminde kullanılan vakum pompalarına ek olarak, büyüme odasında sıvı azot kroyopanelleri mevcuttur. Hem ana oda duvarını hem de kaynak kenarlarını içten çevreler. Soğuk duvar tekniği, diğer sıcak hücrelerin başka kısımlardan tekrar buharlaşmayı önlemesini, farklı hücreler arasındaki ısı izolasyonu sağlamasını ve aynı zamanda artık gazların tuzaklanmasını sağlayarak ultra yüksek vakuma ulaşmada yardımcı olmaktadır.

3.3. MBE’de Epitaksiyel Büyütme Modları

Bir madde diğer bir madde üstüne epitaksiyel büyütülürken, üç olası durum vardır. Birincisi, Frank–Van der Merve; alttaş kristaline iki boyutlu katmanın başarılı bir şekilde basitçe eklenmesi işlemidir. İkincisi, Volmer Weber; ara yüzey alanını düşürerek yüzey alanının artırmayla serbest enerjisini düşürebilen, eklenen maddenin camın üzerine düşen su damlalarına benzer şekilde bir adanın oluşması şeklinde oluşturulabilir. Üçüncü durum ise Stranski–Krastanov büyüme modu denir. Bu durumda eklenen maddenin örgü boşluğu alttaşın uyumsuzluğuyla yükselebilir. Burada büyüme 2-boyutlu ıslatılmış katmanla başlar, fakat adalar ilk birkaç katmandan sonra oluşur.



Şekil 3.5. Farklı birikme miktarları (θ) için a) Frank–van-der-Merwe, b) Stranski-Krastanov ve c) Volmer-Weber büyüme modu büyüme modu

Şekil 3.5’de büyüme modlarının farklı birikme miktarlarındaki karakteristikleri gösterilmektedir. Bu büyüme modlarından hangisinin baskın olduğu kullanılan

madde sisteminin ve biriktirilen madde için kullanılan büyütme şartlarının ne olduğuna bağlıdır.

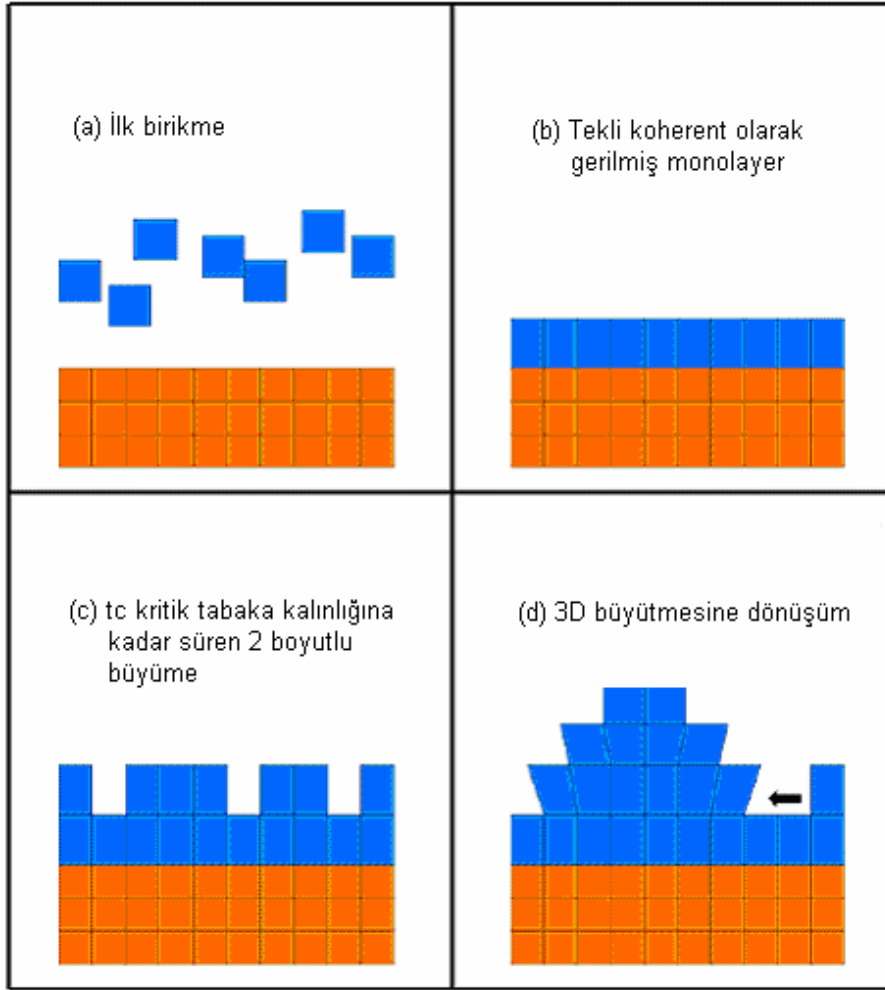
3.3.1. Frank–van-der-Merwe büyütme modu

Bu büyütme “Katman Katman Büyütme modu” olarak bilinir. Alttaş ile üsttabaka (epi-tabaka) arasındaki örgü sabiti farkı (Δa) çok küçüktür. Üst tabakanın enerjisi yeterli olduğu için alttaşa uyumlu olarak büyüme gerçekleşir. Tabaka tabaka büyümenin olduğu Frank-van-der-Merwe modunda, biriktirilen tabakalar 2 boyutlu olarak büyütülür. Bu rejimde gerilme, biriktirilen maddenin ilk birkaç tabakasında örgü uyumsuzluğunun azaltılmasına neden olur. İlk tabaka sıkıca sınırlandırılır, bu durum onun örgü yerleşimi alttaşın örgü sabitiyle eşitlemek için bir kuvvet uygulandığında meydana gelir.

3.3.2. Stranski-Krastanov büyüme modu

Bu yöntem “Katman Sonrası Adacık Büyütme” de denir. Yöntemde alttaşın yönelimi ve yüzeyi, örgü sabiti farkı ve çöktürülen (biriktirilen) madde miktarı çok önemlidir. Üst tabakanın enerjisi yeterli olduğu için 2-boyutta katman oluşumu başlar. Fakat belirli bir kritik kalınlığa gelindiğinde alttaş-üsttabaka arası gerilmesi ve bu gerilmeden dolayı meydana gelen gerilme enerjisi sebebiyle, 2D büyüme 3 boyutlu büyüme şeklinde devam eder.

Stranski–Krastanov modelinde bir değişiklik Si üzerine Ge büyütmede bulunur. Bu sistemde, ilk 3-6 mono katmandan sonra bir wetting katman (adalar) oluşur. Ge noktaların kendi kendine toplanması basitçe Si alttaş üzerine adalar oluşturmaktan gerçekte daha karmaşıktır. Büyütme, büyük adalarda sonlanma oluşmadan önce küçük ada içeren büyüme görünür. Haberci adalar geometrik piramit biçimindeki şekillerinden dolayı genellikle “kulube kümeleri” olarak isimlendirilir. Daha büyük adalar çok-yüzlü veya düzensiz şekildedirler. Büyütmenin aşamaları sıcaklığa bağlıdır; Örneğin kulube kümelerinin büyüklüğü ve sayısı büyütme sıcaklığının bir fonksiyonudur.



Şekil 3.6. Stranski-Krastanov büyütmesi a)Alttaş üzerindeki maddenin ilk biriktirilmesi; b)Gerilmiş monolayer meydana gelmesi; c) t_c , kritik kalınlığı oluşana kadar 2D büyütmesi; d)3D büyütme dönüşümü.

Şekil 3.6’de Stranski–Krastanov büyütmesini çeşitli durumlarda daha detaylı olarak göstermektedir. İlk durum a örgü sabitli alttaş üzerine, a_1 örgü sabitli epitaksiyel olarak biriktirilen maddeden oluşur, $a_0 < a_1$. Biriktirilen madde tek gerilmiş tabaka meydana getirir ve t_c kritik kalınlığına kadar büyüme devam eder. Kritik kalınlıkta, 2 boyutlu büyütme için gerilme çok büyük olur. Gerilmeyi azaltmak için, biriktirilen madde 3 boyutlu ada meydana getirir. Eğer iki madde arasındaki gerilme çok düşük ise, gerilmeyi azaltmak için üç boyutlu yapılar meydana gelmeden önce 2 boyutlu büyüme daha uzun sürer. Eğer gerilme yüksek ise, 3 boyutlu büyütme çok ince ıslak tabaka ile meydana gelecektir. GaAs üzerine InAs için, ıslak tabakanın kritik

kalınlığı yaklaşık 1,6 ML' dir. InAs' a daha fazla Ga eklenir, bu ıslak tabaka kalınlığı genişler.

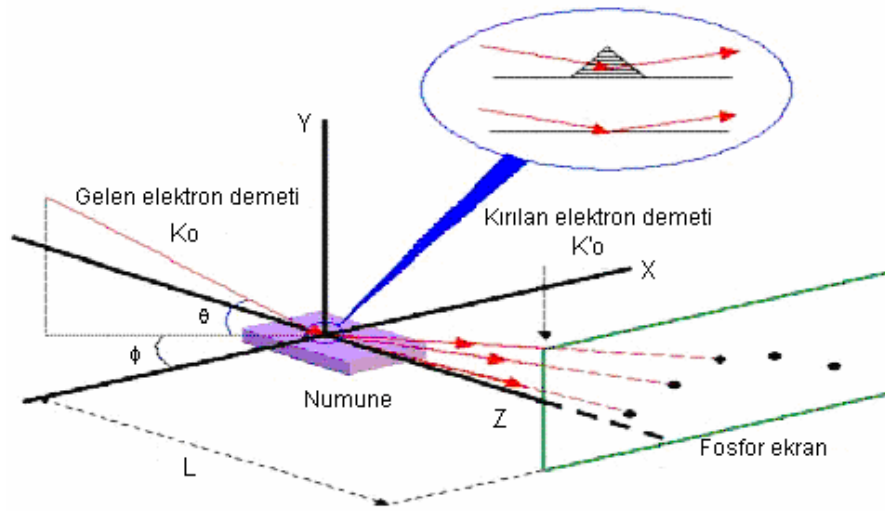
3.3.3. Volmer-Weber modu

Adacık Büyütme Modeli olarak bilinen Volmer-Weber yönteminde; alttaş ile epi-tabaka (üsttabaka) arasındaki örgü sabiti farkı (Δa) çok büyüktür. Üsttabakanın enerjisi yeterli olmadığı için alttaşı ıslatamaz. Yüzeyin geometrisine göre yüzeyde adalar meydana gelir. Bu adaların oluşumunda alttaşın yönelimi çok önemlidir. Volmer-Weber büyütmesinde, biriktirilen madde bütünüyle 2 boyutlu tabakalardan meydana gelmez, bunların yerine 3 boyutlu adalardan meydana gelir. Bu tip büyütme genellikle madde tamamıyla farklı tip madde ile biriktirildiğinde ve her iki maddenin de örgü sabitlerinin farklı olması durumunda meydana gelir.

3.4. MBE'de İç-Ölçüm Teknikleri

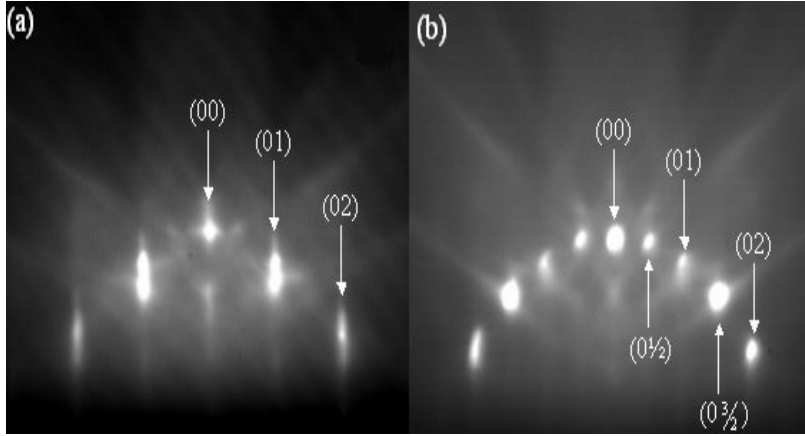
İç ölçüm tekniklerine sahip olması MBE sistemini üstün kılan önemli özelliklerden biridir. Tampon odasına bağlanabilen XPS, Auger elektron spektroskopisi vb. Sistemlerle numunenin atmosfer ortamına çıkarılmadan nicel analizlerini yapmak mümkündür. Büyütme odasına, büyütme sürecinde optik ve yapısal parametrelerin belirlenebileceği elipsometre ve yüksek enerjili elektronların difraksiyonu (RHEED) gibi sistemleri monte etmek mümkündür. RHEED, MBE sisteminde en özel analiz ve vazgeçilmes araçlarından biridir. Laboratuvarımızda mevcut olan bu cihaz hakkında detaylı bilgi sunmak yararlı olacaktır: RHEED sistemi güç kaynaklı elektron tabancası ve fosfor ekrandan meydana gelir. Tabancadan numune üzerine elektron demeti gelir ve kırılan demet fosfor ekranda gözlenir. Bir tabakanın tamamen büyüüp büyümediği hakkında bilgi verir ve büyüme oranı RHEED ile belirlenebilir. 3°'lik açıyla kristal yüzeyine elektron gönderdiğimizde yüzeyde elektron demeti saçılmaya uğrar. Fosfor ekranda beliren izler vasıtasıyla kristal yapılanma değerlendirilir. Mevcut sistemimizde 15 keV'luk elektron tabancası kullanılabilmektedir.

Elektronların kırınım/saçılma geometrisi Şekil 3.7’de görüldüğü gibi oldukça basittir. Genel olarak bir MBE sisteminde 5-40 keV arasında yüksek enerjili elektron demeti düşük bir açı ile (1-3 derece) yüzeye gönderilir. Bu elektronların de Broglie dalga boyu 0,17-0,06 Å arasındadır ve yüzeye girme miktarı düşüktür. Yani giricilik en dış birkaç atomik katman boyunca sınırlandırılmıştır.

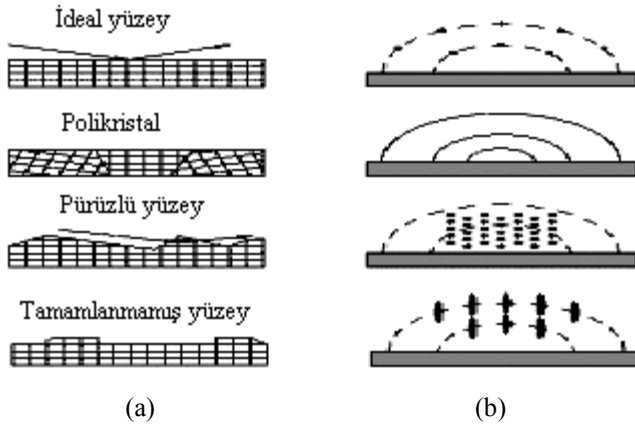


Şekil 3.7. RHEED'in temel gösterimi. Üsteki şekil difraksiyon ile saçılmayı. Altteki şekil yüzeyden saçılmayı gösterir

Pratikte hemen hemen bütün yüzeyler şekil ve boyutlarda farklı üç boyutlu özelliklere sahiptirler. Bu özellikler yapıların biriktirilmesi veya numunenin kimyasal temizlenmesi esnasında şekillenir. Düz yüzeyden gelen yansıma ve pürüzlü yüzeyden iletilen yansıma difraksiyonları, difraksiyon örneğinin şekillerinden ayırt edilebilir. Düz yüzeyden difraksiyon örneğinin yansıması Şekil 3.8’da a) Laue çemberleri üzerinde uzanan dik çizgileri içerir. Diğer taraftan b) ise pürüzlü yüzeylerden yansıma difraksiyonunun difraksiyon noktalarını içerir. Şekil 3.9’da RHEED ekranında gözlenebilecek desenler gösterilmiştir. Bu desenlerden yüzey morfolojisi hakkında bilgi edinmek mümkündür.



Şekil 3.8. Epitaksiyel büyüme sırasındaki RHEED deseni a) Si(100)-1x1, b) Si(100)-2x1

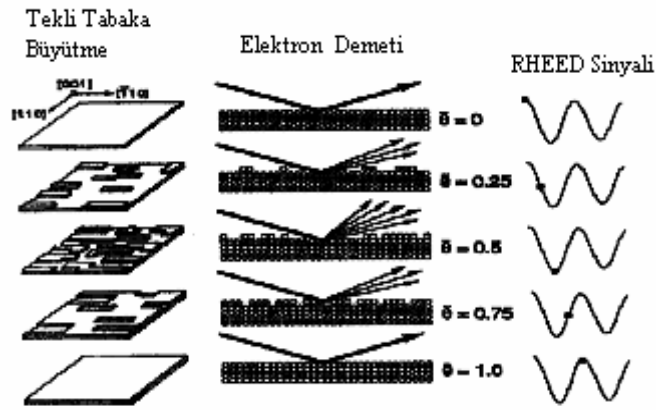


Şekil 3.9. a) ve b) RHEED yardımı ile elde edilen yüzey morfolojisinin oluşumunu göstermektedir

RHEED, MBE ile büyütme esnasında kristallerin yüzey yapısını analiz etmek için ve film kalınlığını kontrol etmek için kullanılabilir. Gelen elektronların gelme açısının (θ) bir fonksiyonu olarak RHEED şiddetinin gözlemlenmesi ile yüzeydeki doğal atomik pozisyonlar hakkında bilgi elde edilebilir; demet akışını ayarlamaya ve alaşımın bileşimini kontrol etmeye ayrıca kuantum kuyuları ve süper örgülerin kalınlıklarını bulmaya imkan verir.

RHEED şiddet osilasyonlarının değerlendirilmesi tabaka büyüme süreci hakkında bilgi verir: Şekil 3.10'dan da görüldüğü gibi ($\theta=0$) salınımın başlangıcı düz bir yüzeyi tarif eder. Sonraki üç basamakta yüzey üzerinde birikim devam etmekte ve yüzey pürüzlü

bir yapı almaktadır; bu durumda salınımlar ara açı değerlerine karşılık gelir. Salınım bir tam peryoda ulaştığında ($\theta=1$) yüzey tekrar düzleşmiş, bir monotabaka büyümüş anlamını taşır. Bu salınım değişimi bir çizici ile tespit edilebildiği gibi, fosfor ekran üzerinde ışık spotlarının sönüp parlaması süreci olarak ta belirlenebilir: her spot değişimi bir monotabakanın büyüdüğü bilgisini verir. Bununla birlikte spotların çizgi genişliği ve dizilişi büyüyen tabakanın yüzey kalitesi ve yapılanması hakkında somut bilgiler içerir.



Şekil 3.10. Büyüme Sürecinde RHEED salınımları

4. MBE'DE İNCE FİLM BÜYÜTME SÜRECİ

4.1. MBE'in Kristal Büyütmeye Hazırlanması

MBE sisteminde bu çalışmada büyütülen ve analizleri yapılan AlGaAs/GaAs kristallerinin büyütülme sürecinde aşağıdaki işlem ve adımlar takip edildi:

MBE deki yükleme, hazırlık ve büyütmeye odaları vakuma alınır. Odaların tam temizliğini sağlamak amacıyla tüm sistem 200°C'de fırınlanır. Önerilen fırınlama süresi 72 saattir. Fırınlama işlemi yapmadan önce yanacak her şeyi o ortamdan uzaklaştırmak gerekir. Hücreler ters birikimi önlemek için ortam sıcaklığından 30°C daha sıcak olmalıdır. Bu süreçte vakum 1×10^{-5} mb'ın altına düşmelidir. Fırınlama işleminden sonra sistem 6'dan 12 saate kadar sürede 50°C'nin altına soğutuldu. Önce kaynak hücreleri sonra numuneleri koyacağımız potalar takılarak ayrı zamanlarda ısıl işlemle, Çizelge 4.1'de verilen sıcaklık değerleri dikkate alınarak gaz temizliği yapıldı. Bu işlem boyunca basınç 10^{-7} mbar'dan küçük tutularak, hücre ve potaların ısı karşısında deforme olup olmadığı bilgisini de içerecek şekilde kütle spektrometresi (QMS) ile odadaki kalıntı gaz analizi yapıldı.

Çizelge 4.1. Maksimum hücre çalışma/gaz-temizliği sıcaklıkları

Hücre Tipi	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	
	Potalı	Potasız
Standart K-hücre (40cc)	1270°C	1100°C
Termohücre (80cc)	1230°C	1350°C
Dimer kaynak bileşiği (80cc)	1230°C	1350°C
Geniş As hücresi (su soğutulmadan)	700°C	800°C

Bu işlem tamamlandıktan sonra sistemde yüksek saflıkta azot gazı (N₂) altında atmosfere açılarak hücreler sökülüp, potalar içerisine kaynak malzemeler (Al, In, Ga

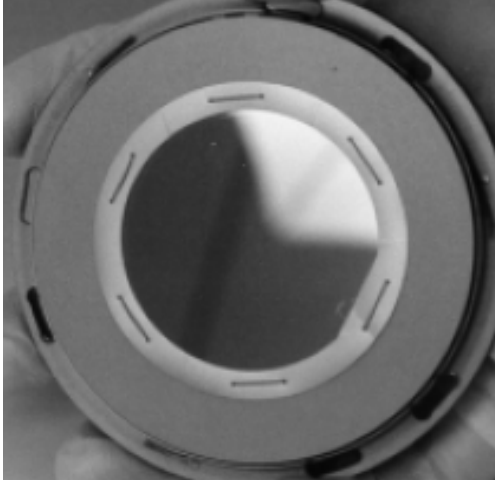
ve diğer kaynaklar) yerleştirildi. Sistem pompalanarak yapılış vakuma alındı ve tekrar fırınlama yapıldı. 7N saflığındaki kaynak maddenin kirliliğini yok etmek amacıyla tüm hücrelerin yeniden uygun sıcaklıkta ısıtılma yöntemiyle gaz temizliği yapıldı. Ve bu süreçte kaynakların demet akıları ölçüldü. Giriş yükleme kabini (FEL) kuru azot ile temizlendi, içerisindeki kasete alttaş yerleştirildi. Numune tampon odasına transfer edildi. Bu odada alttaş 400°C'ye kadar ısıtılarak, sahip olduğu buharlaşabilen kirliliklerden temizlenerek, büyütme odasına geçebilecek duruma getirildi. Büyütme odasının vanası açılır, manüplatöre alttaş transfer edildi.

4.2. Alttaş Hazırlama

Alttaş'ın özelliği önemlidir. Çünkü alttaş teki herhangi bir kristal kusurlar veya safsızlıklar üzerine büyütülecek epitaksiyel tabakaların kalitesini ciddi olarak etkileyebilir. Bugün alttaş genellikle yüksek kalitede üretilebilmektedir ve imalatlar epitaksi bütümeye hazır "epi-ready" olarak satın alınabilmektedir. Bunun anlamı ise alttaş'lar herhangi bir ilave veya ek kimyasal temizliğe ihtiyaç duymadan kullanılabilir olmasıdır. Alttaşlar büyütüldükten sonra yüzeylerinde oksit tabakası oluşturularak dış etkenlerden korunması sağlanır. Bu oksit tabakası arsenik basıncı altında büyüme öncesi büyüme odasında ısıtılma yöntemiyle kolayca uzaklaştırılabilir.

Bütün "epi-hazır" alttaşlar, MBE içine konmadan (yüklenmeden) önce yüzey üzerindeki herhangi bir şüphe uyandırıcı atıklar için yüzey dikkatlice kontrol edilmelidir. Alttaş "epi-hazır" olarak üretilmiş olsa dahi, yüzeyi üzerinde parmak izleri veya yağ damlacıkları varsa sistem temizliğine zarar verebilir. Bu durumda yükleme öncesinde alttaş bu ve benzeri kirliliklerden temizlendikten sonra yükleme odasına konmalıdır.

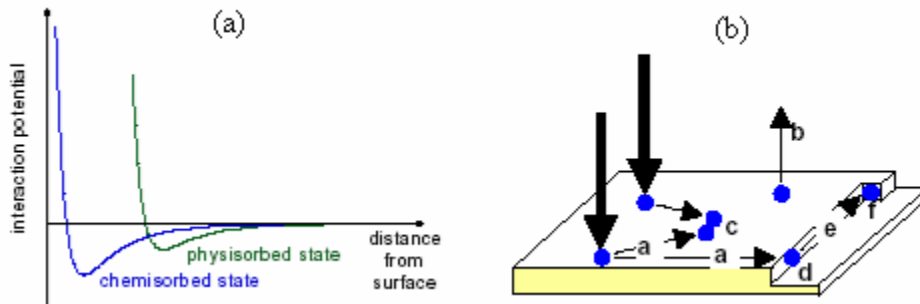
Alttaş'lar küçük yaylarla molibden tutuculara tutturularak monte edilir. Numune tutucuya yapıştırılarak yerleştirilen tipleri olmasına rağmen bu tür tutucular tercih edilmemektedir. Resim 5.1'de 2-inç'lik wafer, 3-inç'lik Mo tutucu üzerindeki 2-inç'lik yere teller kullanılarak yerleşimi görülmektedir. Laboratuvarımızda bulunan sistemimizde alttaş ince tellerle tutucuya monte edilmektedir.



Resim 4.1. Molibden numune tutucuya yerleştirilmiş GaAs alttaş

4.3. Büyütme Sürecinin Analizi

Genelde, MBE büyütme odasında meydana gelen olaylar üç farklı bölgede incelenebilir [62]. Birincisi alttaş üzerinde oluşan kristal büyüme fazıdır. Atomik ya da moleküler türler, yüzeyde kimyasal ya da fiziksel tutunma meydana getirirler (Şekil 4.1.a). Burada atomlar ya da moleküller farklı işlemlere uğrayabilirler (Şekil 4.1.b).



Şekil 4.1. Gelen moleküler demetlerin a) yüzeyde etkileşme potansiyel enerji değişim grafiği, b) tabaka büyümede oluşan mümkün olaylar

Bu işlemler; atomlar düz yüzey üzerine difuz edebilir a), burada onlar tekrar buharlaşabilir b), diğer atomlarla karşılaşarak 2-boyutlu küme oluşturabilir c), onlar birleşecekleri bir step oluşturabilir d), ya da stepin diğer ucuna göç eder e), halatda birleşmek üzere f). Her bir olayın enerjileri ve bunların zamanı ve uzunluk oranları bir dizi faktörlere bağlıdır [61]. Örneğin eğer yüzey atomik olarak kaba ise göç

önemsizdir. Ancak normal MBE şartlarında büyüme, ML stepleri tarafından ayrılmış pürüzsüz teraslar üzerinde meydana gelir. Bu tür yüzeyler için kristolografik uyum önemlidir. Ayrıca gaz faz bileşimi ve sıcaklık tarafından belirlenen yüzeyin yeniden yapımı ve yeniden uyumu içinde önemlidir. Teraslanmış yüzeyler için, iki boyutlu ada çekirdeklenmesi oluşumu veya steplerde birleşim ve halatlarda alttaşın yanlış uyumu ve yüzey difüzyonu tarafından belirlenir.

Diğer bölge atom demetlerinin alttaş yakınında karışım bölgesidir. Bu bölgede meydana gelen olaylar hakkında yeterince bilgi yoktur. Üçüncü bölge kaynak hücrelerinde bulunan materyalin ısı etki altında moleküler demet oluşturduğu kısım olarak tarif edilebilir. Büyütme odasında kalıntı gaz ve molekülerlerin basıncı oldukça düşüktür. Bu da Moleküllerin çarpışması için ortalama serbest yolun kaynaktan alttaşa olan mesafeden uzundur. Bu yüzden MBE demet akımları akımların difüz olduğu MOCVD aksine gaz fazında homojen olmayan tepkimeler oluşturmaz.

4.4. Büyüme Oranı Kalibrasyonu

MBE sisteminde büyüme oranını belirlemek için bir dizi işlem ve deney süreci gerekir. Büyümeyi sağlayan kaynak hücrelerinin akı değerlerini sıcaklığa hücre sıcaklığının fonksiyonu olarak belirlemek ilk adımdır. Daha sonra belirli bir akı değerine karşılık, büyütülen bir örnek kristalin, RHEED desenleri kullanılarak tahmini büyüme oranı tesbit edilir. GaAs salınımları gözlenirken sadece Ga ve As; AlGaAs büyüme salınımları gözlenirken her üçünün kaynak kesicileri açık tutulmalıdır. Büyütülen bu deneme numunesinin XRD veya elipsometrik yöntemle kalınlıkları tesbit edilir. Böylece herhangi bir akıya karşılık gelen büyüme oranı tesbit edilmiş olur. $Al_xGa_{1-x}As$ gibi üçlü bir yapı büyütüldüğünde bileşimdeki Al miktarının (x) da kalibre edilmesi gerekmektedir. Yapıdaki GaAs'in büyüme oranı $GR(GaAs)$ ve AlGaAs'in büyüme oranı $GR(AlGaAs)$ olmak üzere, Al yüzdesi,

$$x = \frac{GR(AlGaAs) - GR(GaAs)}{GR(AlGaAs)} \quad (4.1)$$

ifadesinden elde edilir. Ayrıca RHEED salınımları kullanılarak (Ga kaynak kesicisi kapatılarak elde edilebilir) AlAs'ın büyüme oranı ($GR(AlAs)$) belirlenebilir; bu durumsa Al yüzdesi

$$x = \frac{GR(AlAs)}{GR(AlAs) + GR(GaAs)} \quad (4.2)$$

denkleminde belirlenebilir. Büyüme oranları bir kez belirlendikten sonra bu oran için akı değeri bilindiğinden; herhangi bir büyüme oranı için, ilgili kaynağın akı değeri

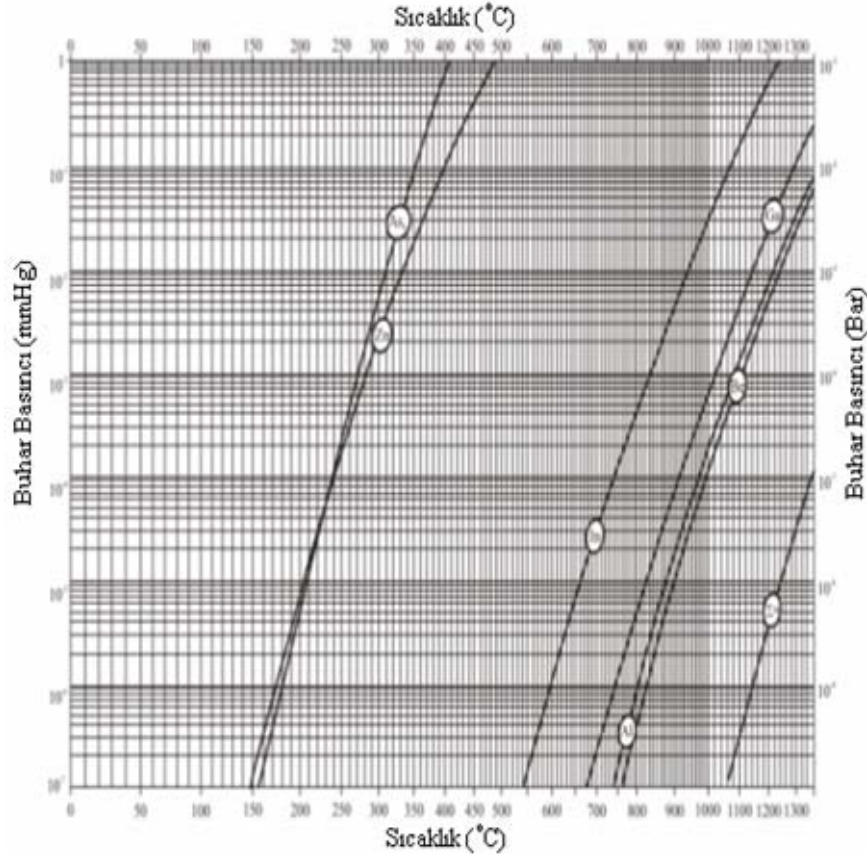
$$I(hedeflenen) = \frac{GR(hedeflenen)}{GR(bilinen)} * I(bilinen) \quad (4.3)$$

basit orantısı ile tayin edilir.

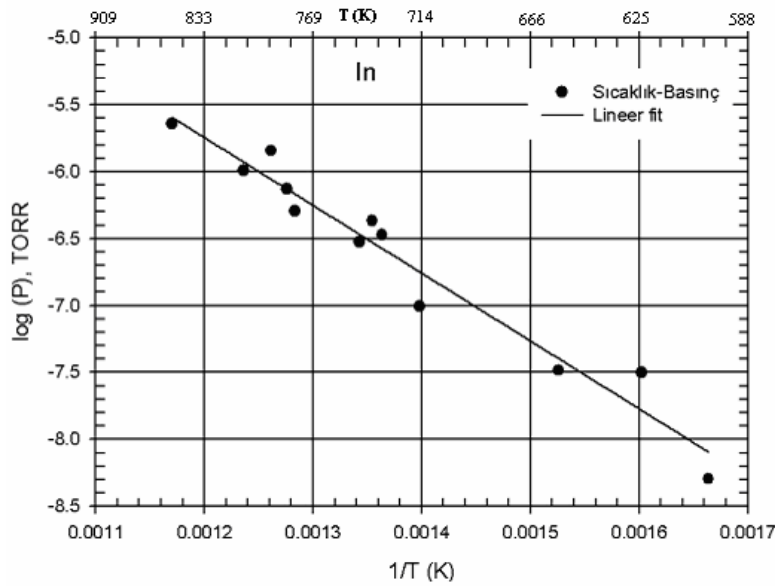
Büyüme oranını ve özellikle kristal kalitesini etkileyen diğer önemli bir faktör alttaş sıcaklığıdır. AlGaAs için genel büyüme sıcaklığı 580-600 °C aralığında olmalıdır. Bu ölçülen sıcaklığın numune yüzeyinden doğrudan pyrometre ile ölçülen sıcaklık olduğunu belirtmek gerekir. Bilindiği gibi numune tutucuda, numunenin arkasında bulunam termo-çitf numune ile direk temas sağlamadığından bununla ölçülen sıcaklık değeri gerçek sıcaklıktan 70 °C civarında (bu değer sistemlere göre farklılık içerebilir) düşüktür. Kristal büyütmede önemli bir parametre de As ve Ga (veya Ga+Al) akılarının oranıdır. Bu oran yüzeyde atomik demetlerin bileşimi açısından önemlidir. V/III akı oranı olarak tarif edilen bu değer her büyütme sistemi sıcaklık ve diğer etkenlere göre sabit bir değeri olmamakla birlikte genel olarak <20 (bazı çalışmalarda <10) olacak şekilde ayarlanması yararlı olacaktır.

Yukarıda açıklanan büyüme oranı ve malzeme yüzdelерinin belirlenmesi amacıyla sistemimizde bulunan kaynakların sıcaklık-basınç değişimleri kaydedildi. Hesaplamalarımızda akı olarak basınç karşılığı kullanıldı. Sıcaklık-basınç eğrilerinden hangi sıcaklıkta hangi basınç (akı) değerinin olduğunu belirlemek mümkündür. İstedığımız akıyı ayarlayabilmemiz için gerekli olan sıcaklık değerini

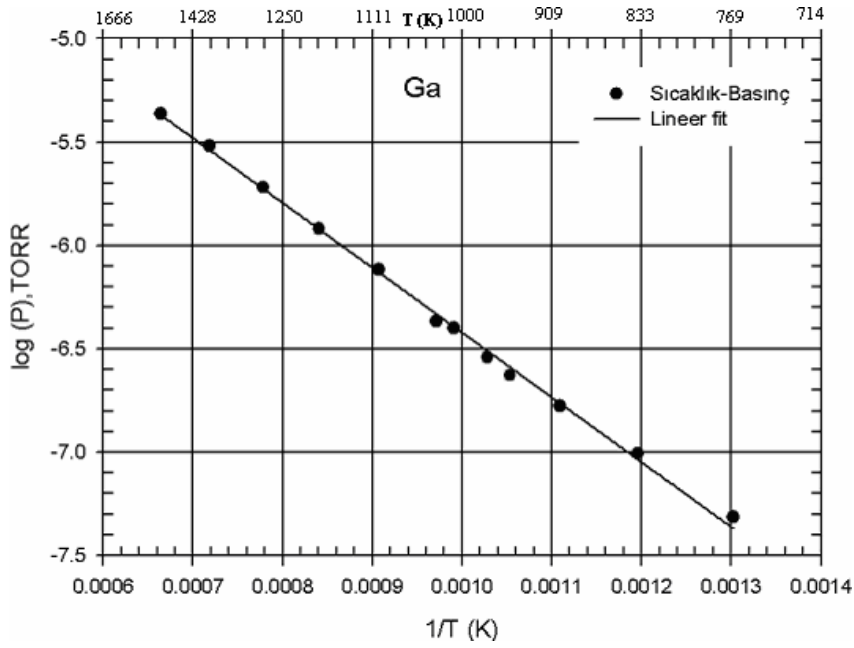
ayarlamak yeterli olacaktır. Bazı elementlerin sıcaklığa göre buhar basınçları Şekil 4.2 ve ölçülen sıcaklık-basınç değerleri Şekil 4.3-Şekil 4.5 grafiklerinde verildi.



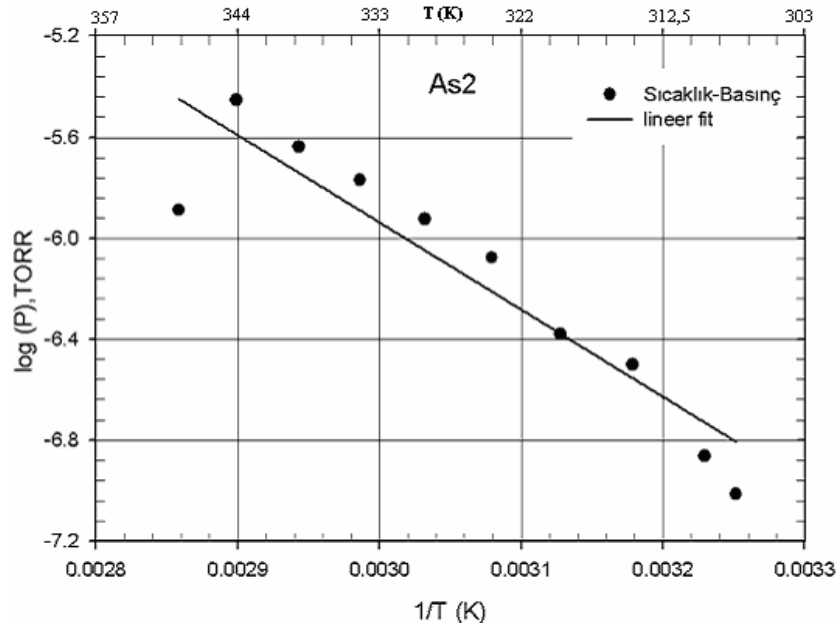
Şekil 4.2. II, III ve V grubundaki bazı elementlerin Sıcaklık-Buhar Basıncı değişimi



Şekil 4.3. In için Sıcaklık-Basınç eğrisi



Şekil 4.4. Ga için Sıcaklık–Basınç eğrisi



Şekil 4.5. As₂ için Sıcaklık–Basınç eğrisi

4.5. Altaşım Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan taban numune Czolhralski tekniği ile üretilmiş ve epi-hazır olarak satın alınan 3” çapında p-GaAs ince dilimidir. Bu numunun özellikleri Çizelge

4.2’de verildi. Alttaş yüzeyine herhangi bir kimyasal işlem uygulanmadan doğrudan MBE sistemine yüklenilerek gerekli büyütme sürecine tabi tutuldu.

Çizelge 4.2. Kullanılan taban numunenin özellikleri

Alttaş İsmi	Katkı	Tip	Kalınlık	Yönelim
Epi-hazır GaAs	Zn (Çinko)	p-tipi	625±25 µm	(100)±0.1°

4.6. Oksit Tabakasının Kaldırılması

Yeni bir alttaş MBE odasına yerleştirildiğinde alttaş yüzeyi oksit içerir. Alttaş üzerinde büyüme meydana gelmeden önce yüzeydeki bu oksiti uzaklaştırmak gereklidir. Uzaklaştırma (kaldırma) süreci “ısıt oksit uzaklaştırma” olarak adlandırılır. Oksitle kaplı yüzey amor yapıda olduğundan RHEED salınımları gözlenemez.

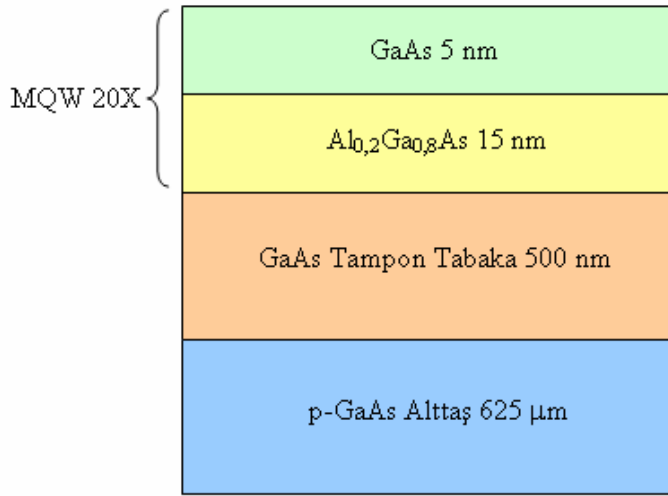
Alttaş büyütme odasında 400 °C ye kadar ısıtıldıktan sonra As kayak vanası açılarak, As buhar basıncı altında 620-650°C’ye ulaştığında meydana gelen oksidin uzaklaşmaya başladığı RHEED spotlarının gözlenmeye başlaması ile anlaşıldı. Bu spotlar başlangıçta daha daireseldir. Şekilleri ince çizgiler halini alması, elektron kırınımının meydana geldiğini, yüzeyin oksitten temizlendiğini, tek kristal yapının yüzeyde ortaya çıktığını anlatır. Mükemmel yüzey temizliği için bu sıcaklığın 10-20 °C üzerinde en az 20 dakika süreyle bu durumda bırakılır. Artık alttaş büyüme sürecine hazır hale gelmiştir.

4.7. Numunelerin Büyütmesi

4.7.1. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.2$) süperörgüsünün büyütülmesi

Bu çalışmada MBE ile büyütülmesi hedeflenen asıl yapı 4.7.2 bölümünde tanımlanan LED ya da laser malzemesi olarak kullanılması hedeflenen $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x=0,2 \rightarrow 0,6$) tek kuantum kuyulu yapıdır. Bu yapıyı büyütebilmek amacıyla, % 20 ve % 60 aliminyum yüzdelerinin sağlanabilmesi için en az iki kalibrasyon numunesi

büyütmek gerekir. Bunlardan birinde Al oranı 0,2 ve diğerinde 0,6 olacak şekilde akılar ayarlandı. Bu numunelerden sadece 0,2 oranlı olan örnek olarak sunuldu ve yapısal analizi yapıldı. Bu yapı tek katmanlı AlGaAs seçilebilir olmasına rağmen, yapının bir süperörgü örneği teşkil etmesi amacıyla 20 periyotlu kuantum kuyulu bir yapı olarak büyütüldü. Büyütülen yapının şematik gösterimi Şekil 4.6’da verildi.



Şekil 4.6. 20 periyotlu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ süperörgü yapısı

Bu yapı p-tipi GaAs alttaş üzerine 500 nm tampon tabaka üzerinde 15nm AlGaAs ve 5nm GaAs’ten oluşan çoklu yapı şeklinde tasarlanmıştır.

Tampon tabakanın büyütülmesi: Alttaşın oksit temizliği yapıldıktan sonra GaAs yüzeyi açığa çıkar. Alttaş olarak üretilmiş ince tabakaların kalitesine bağlı olarak, bu yüzey büyütme işlemi için yeterince pürüzsüz olmayabilir veya yüzeyinde çeşitli kusurlar bulunabilir. Epi tabakaları pürüzsüz yüzeyde büyütebilmek için alttaş üzerine bir tampon tabaka büyütüldü.

p-tipi GaAs tampon tabaka 585°C alttaş sıcaklığında büyüme oranı $\text{GR}(\text{GaAs})=2,78\text{\AA}/\text{s}$ olacak şekilde ayarlandı. Buna karşılık gelen “demete özdeş” (BEP) Ga basıncı (akısı) $7,3 \times 10^{-7}$ mbar ve As_2 akısı $1,0 \times 10^{-5}$ mbar olarak (V/III akı oranı ~ 14) ayarlandı. Büyümenin homojen bir biçimde olabilmesi için numune eksen üzerinde dönmeye ayarlandı. Tampon tabaka büyütülmesinin başlatılması için Ga

kesicileri açıldı. Numune MBE'nin içine yerleştirildikten sonra Arsenik vanası örnek büyüme bitimine kadar açık kaldı. Kalınlığı d olan bir tabakanın toplam büyüme zamanı;

$$t = d \left(\frac{2}{ra_0} \right) \quad (4.4)$$

İle hesaplanır. Burada a_0 çöken materyallerin örgü sabiti ve r ise ML/s biriminde büyüme oranıdır.

Bu şekilde büyütülen tampon tabaka üzerine, 0,2 Al yüzdesini verecek şekilde belirlenen akılar Şekil 4.3-Şekil 4.5 eğrilerinden belirlenerek 15nm kalınlığında AlGaAs ve 5 nm kalınlığında GaAs tabakalar 20 üstüste 20 kez büyütüldü. Bu büyütme süreçleri yazılan program sonucunda sistemin yazılımı kullanılarak bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirildi. Bu numunenin XRD analiz sonuçları bir sonraki bölümde sunulmuştur. Gerek burada tanıtılan 0,2 Al yüzdeli örnek numune ve gerekse tanıtımı bu çalışmada sunulmayan 0,6 Al yüzdesi içeren diğer örnek numune verileri kullanılarak tek QW yapısı büyütülecektir.

4.7.2. $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ($x=0,2 \rightarrow 0,6$) QW büyütülmesi

Tek kuantum kuyulu (QW) $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ yapısında bariyerin Al yüzde değeri 20 ile 60 arasında düzgün olarak değişecek şekilde tasarlandı. Bu yapı laser malzemesi olarak kullanılabilir.

Büyütülme sürecinde yukarıki kısımda tanımlanan büyütme metodolojisi kullanılmıştır. İlk olarak benzer yöntemle alttaş üzerindeki oksit tabakası kaldırılmıştır. Tampon tabaka büyütülmesinde bu numune süperörgü yapısından farklı olarak Be katkı malzemesi kullanılmıştır.

Tek kuantum kuyulu (QW) $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ yapısının şematik gösterimi Şekil 4.7'de verilmektedir.



Şekil 4.7. Kuantum Kuyulu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ yapı

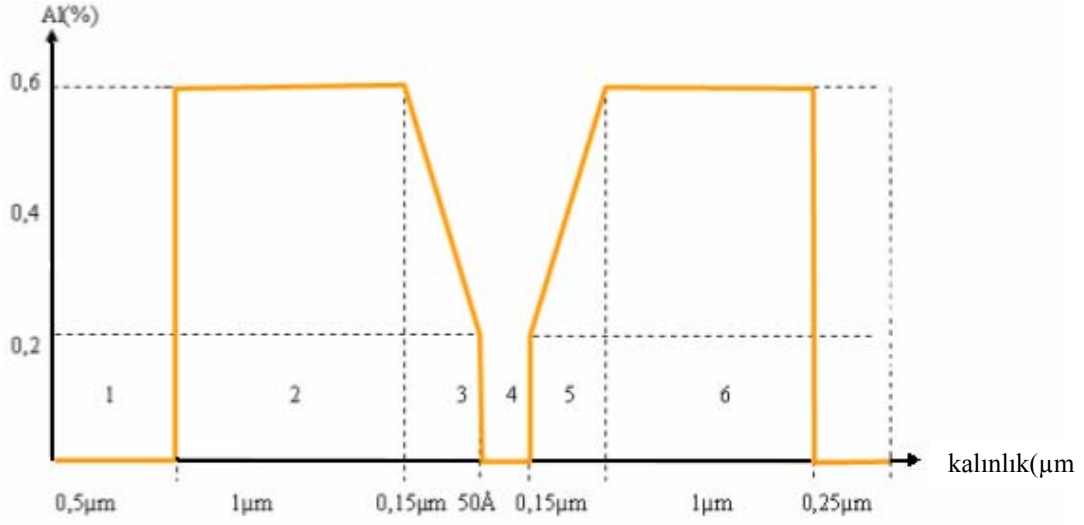
Şekil 4.7’de verilen QW yapısının büyütülme sıcaklığı 660°C olarak tasarlandı. Bunu takiben alttaş üzerine ilk olarak 5000 Å kalınlığında p-tipi (Be katkılı) GaAs tampon tabakası $2,78 \text{ Å/s}$ ’lik Ga büyüme oranıyla büyütüldü. Daha sonra $1 \mu\text{m}$ kalınlığında p-tipi $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ ($n_{\text{Be}}=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) tabakası büyütüldü. Bu işlem sırasında büyüme oranları sırasıyla Al için 1 Å/s ve Ga için $0,67 \text{ Å/s}$ ’dir. Bunu takiben $0,15 \mu\text{m}$ kalınlığında $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x=60%→20%) tabakası büyütüldü. Bu tabaka boyunca Al oranı % 20 den % 60’a kadar lineer olarak artacak şekilde Al hücre sıcaklığı otomatik olarak (bilgisayar kontrollü) artırıldı. Burada büyüme oranları sırasıyla AlAs için $0,447 \text{ Å/s}$ ve GaAs için $0,67 \text{ Å/s}$ ’dir. Daha sonra 50 Å kalınlığında katkısız GaAs kuyu tabakası $0,67 \text{ Å/s}$ ’lik büyüme oranıyla büyütüldü. Bunu takiben $0,15 \mu\text{m}$ kalınlığında $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x=20%→60%) tabakası büyütüldü. Bu tabaka boyunca Al oranı % 20 den % 60’a kadar lineer olarak azalacak şekilde Al hücre sıcaklığı otomatik olarak (bilgisayar kontrollü) azaltıldı. Burada büyüme oranları sırasıyla

AlAs için 0,447 Å/s ve GaAs için 0,67 Å/s'dir. Bunu takiben 1 µm kalınlığında n-tipi $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ ($n_{\text{Si}}=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) tabakası büyütüldü. Daha sonra 0,25 µm kalınlığındaki n- tipi GaAs ($n_{\text{Si}}=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) üst tabakası 2,78 Å /s'lik büyüme oranıyla büyütüldü. Son olarak alttaş sıcaklığı 0,1 °C/s lik adımlarla 250 °C'ye düşürüldü ve As_2 akısı vanası kapatılarak sonlandırıldı ve büyütme işlemi tamamlandı.

Büyütme işlemi sırasında sıcaklığın, akının ve Alüminyum yüzdesinin tabaka kalınlığına bağlı değişimleri Şekil 4.8'de verildi. Bu şekilde ayrıca hangi kaynakların kesicilerinin ne kadar süre açık kaldığı, açılıp kapanma süreleri de görünmektedir.

Büyüme işlemi tamamlandıktan sonra numune sıcaklığı 250°C'nin altına düştüğünde, numune büyütme odasından taşıyıcı yardımıyla çıkarılarak yükleme odasından dışarıya alınır.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs Kuantum Kuyulu (QW) yapının tabaka kalınlıklarına bağlı şeması, kuyu yapısının engeldeki Al yüzdesine bağlı eğimli değişiminin daha iyi açıklanması amacıyla Şekil 4.9'da verildi.



Şekil 4.9. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs Kuantum Kuyulu Yapısı

Şekil 4.9’da verilen bölgeleri sırasıyla tanımlayalım.

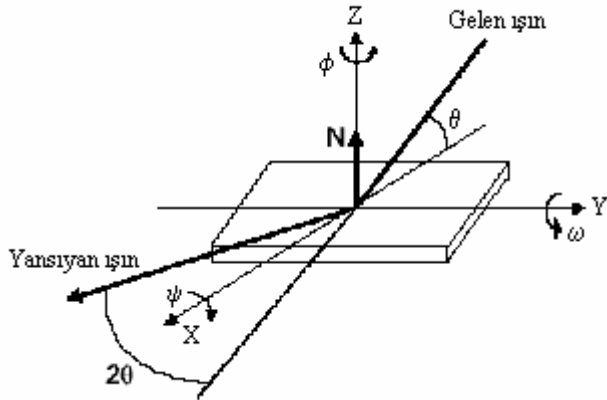
1. Bölge: 0.5 μm kalınlığında Be ile katkılanmış p-tipi GaAs tampon tabaka;
2. Bölge: 1 μm kalınlığında Be ile katkılanmış p-tipi $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ tabaka;
3. Bölge: Al yüzdesi 0,6’dan 0,2’ye monoton olarak azalırken, Ga yüzdesi 0,2’den 0,6’ya monoton olarak artar ve 0,15 μm kalınlığında $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($60 \geq x \geq 20$) tabaka.;
4. Bölge: 50 Å kalınlığında katkılanmamış GaAs kuantum kuyusu;
5. Bölge: Al yüzdesi 0,2’den 0,6’ya monoton olarak artarken, Ga yüzdesi 0,6’dan 0,2’ye monoton olarak azalır ve 0,15 μm kalınlığında $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($20 \leq x \leq 60$) tabaka;
6. Bölge: 1 μm kalınlığında Si ile katkılanmış n-tipi $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ tabaka;
7. Bölge: 0,50 μm kalınlığında Si ile katkılanmış n-tipi GaAs tabaka.

5. BÜYÜTÜLEN YAPILARIN KAREKTERİZASYONU

5.1. Yüksek Çözünürlükteki X-Işını Kırınımı

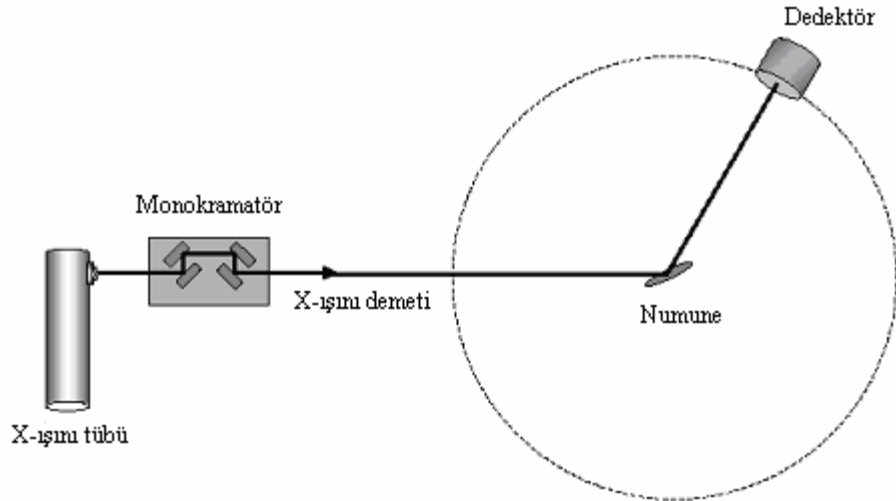
Herhangi bir metotla üretilen bir kristalin birim hücresinin simetrisini ve boyutunu tanımlamak ilk öncelik içerisinde yer alır. Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları kırınımı sistemi (HR-XRD), yapı karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılır. X-ışınları, epitaksiyel tabakaları geçer ve böylece hem filmin hem de alttaşın özelliklerini belirlemek için bilgi verebilir. İnce film numunelerini karakterize etmek için XRD kullanılırken birçok özel durum vardır. İlk olarak iletim için alttaş çok kalın olduğunda bu ölçümler için yansıma geometrisi kullanılır. İkinci olarak, yüksek açısal ayrışma gerektirir. Bu işlemler için yüksek çözünürlüklü monokromatörler kullanılır. Burada kullanılan kristal monokromatörler bu ölçümler için X-ışınları demetini paralel hale getirmeyi sağlamaktadır. Ayrıca bu metotla birim hücrenin şekli, simetrisi ve boyutu otomatik olarak tayin edilir. Bunlara ilaveten şayet numune kusursuz kristal veya tabakalı yapıda ise x-ışınları demeti gelme açısının yaklaşık iki katı bir açı ile saçılacaktır. Çoklu heteroepitaksiyel tabakalardaki ölçümlerde filminden gelen ana kırınım piki çevresinde uydu pikleri ortaya çıkar. Buradan elde edilen bilgiler kullanılarak numunenin kimyasal bileşenleri, kristal tabakanın kalınlığı, örgü kusurları ve örgü uyumsuzluğu gibi özellikler belirlenebilir [68].

XRD ölçümleri, numuneye Bragg açısıyla gelen x-ışını demeti düzlem örgüden yansıdığı zaman saçılan demetlerin yoğunluğu keskin bir maksimum verir. Düzlemler arası mesafe Bragg kanunu ile tanımlanan saçılma açısıyla belirlenir. Filmlerin yapısını analiz etmek için θ -2 θ genişliğinde taramalar ve ters uzay harita ölçümleri yapılır. Yansıma ölçme aygıtı, çok küçük açılarda ($0 < \theta < 4^\circ$), ortalama θ -2 θ taramasıyla tabakaların kalınlık ve pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılır: θ -2 θ modunda x-ışını demeti Şekil 5.1'den görüldüğü gibi düzlem yüzeye bir θ açısıyla gelir. Yansıyan demetlerin yoğunluğu, yansıyan demetler ile gelen demetler arasındaki 2θ açısıyla ölçülür.



Şekil 5.1. XRD ölçümlerinin geometrisi

Bu tip taramalar, örnek içindeki mevcut elementleri teşhis etmeye ve yüzeydeki düşey yönelim içindeki örgü sabitlerini belirtmeye izin verir. Ayrıca büyüme modu ve düzlem içindeki örgü sabitleri hakkındaki bilgiler verir. XRD şematik resmi Şekil 5.2’de görülmektedir [59].



Şekil 5.2. XRD şematik resmi

HR-XRD heteroyapılar ve özellikle bunların ara yüzeylerinin kritik kimyasal ve yapısal bilgileri hakkında bilgi edinmemizi sağlarlar. Deneysel yüksek çözünürlükteki x-ışınları kırınım desenlerinden açılal pozisyonun simülasyonu, şiddet alakası ve bütün uydu piklerinin çizgi şekli kuyu ve bariyer genişliği ayrıca belirlenir. Bunların yanında arayüzey bileşimi de belirlenebilir.

Tipik çoklu kuantum kuyusu için x-ışınları rocking eğrileri baskın alttaş piki ve birçok eşit yönelimli uydu pikleri ($0, \pm 1, \pm 2$, v.b.) hetero yapıda yer alır. Genellikle sıfır piki bütün uydu pikleri arasında en yüksek şiddete sahiptir. X ışınları kaynak şiddetleri ile gözlenen uydu pikleri sayısı bağlantılı olduğunda, aralarındaki açısal ayırım hetero yapının periyodu P (kuyunun toplamı ve bariyer kalınlığı) ile, büyütülen periyotların sayısı ile yapının görüntüsü ile doğrudan bağlantılıdır. Uydu piklerinin şiddeti ara yüzey bileşimi ve pürüzlülük hakkında bilgi verir.

X-ışınları bir kristal örgüden saçıldığında, yapıcı bir girişim meydana gelir. Bu girişim Bragg kanunuyla

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (5.1)$$

ile verilir. Burada λ , X-ışınının dalga boyu, 2θ gelme açısıyla kırılma açısı arasındaki açıdır (ayrıca kırılma açısı olarak da bilinir), d ise yansıma düzlemleri arasındaki mesafedir. Bu ifade kristal yapı hakkında detaylı bilgileri hesaplamalarımızda yardımcı olur. Kübik kristaller için d değeri Miller indisleriyle (hkl),

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (5.2)$$

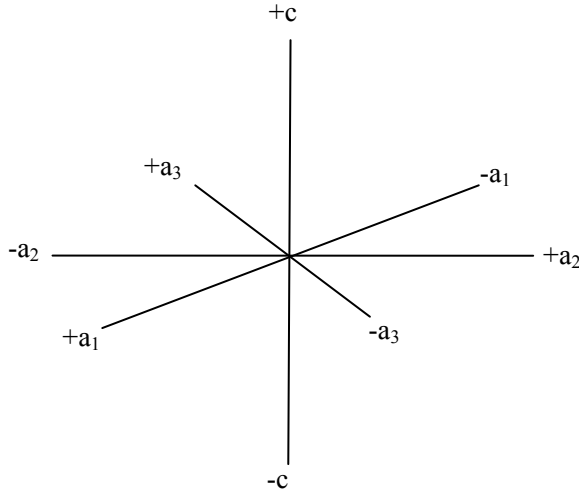
tanımlanır [63]. Burada a örgü sabitidir. Wurtzite GaN hekzagonal yapısı için d ,

$$d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{4}{3}\right)\left(\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2}\right) + \frac{l^2}{c^2}}} \quad (5.3)$$

şeklinde verilir [68]. Hekzagonal yapılar ise Miller indisleriyle ($hkil$) şeklinde tanımlanır. Burada i ,

$$i = -(h + k) \quad (5.4)$$

ile verilir. Hekzagonal Kristal Sistemlerinin 3 yatay eksen ve 1 düşey eksen (Şekil 6.3) vardır.



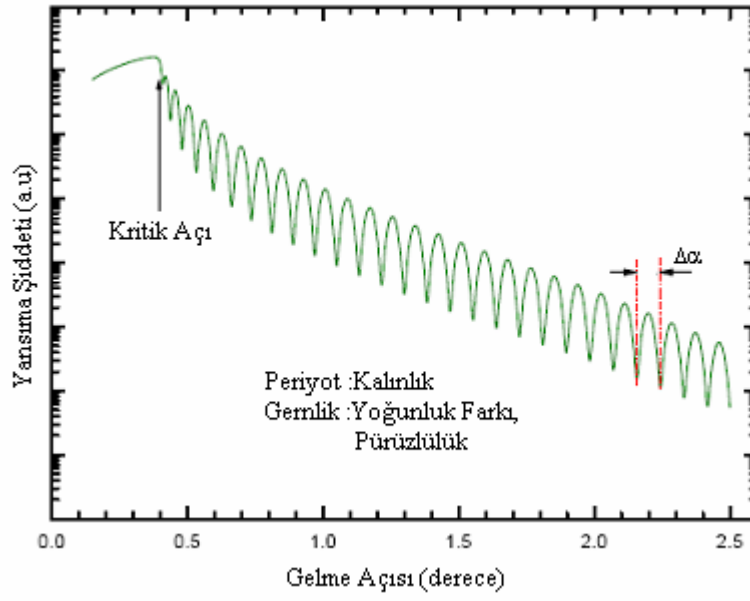
Şekil 5.3. Hekzagonal sistemlerin yatay ve düşey eksenle gösterimi

Burada hki Miller indisleri sırasıyle a_1 , a_2 , a_3 ve c ile temsil edilmektedir. Bu Miller indisleri,

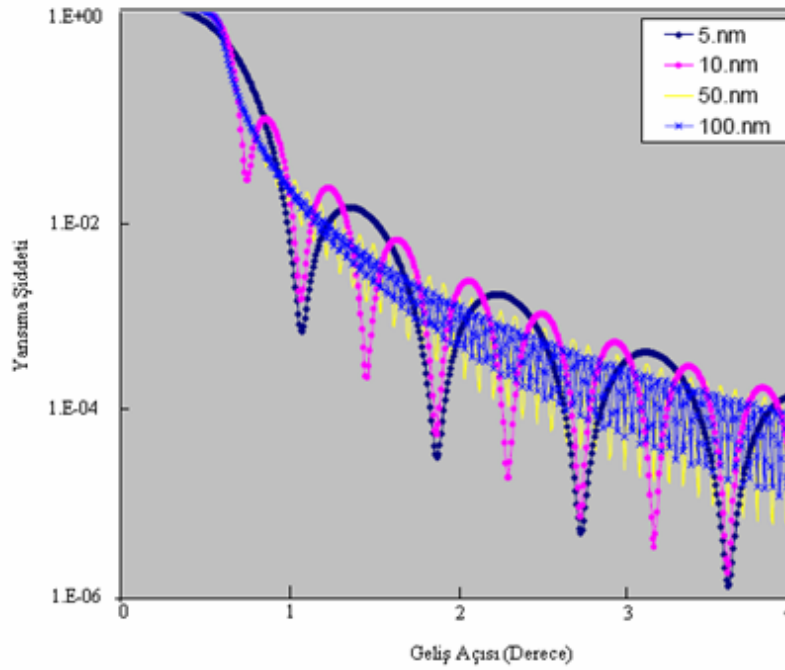
$$a_1 = \frac{1}{h}, a_2 = \frac{1}{k}, a_3 = \frac{1}{i}, c = \frac{1}{l} \quad (5.5)$$

şeklinde verilmektedir.

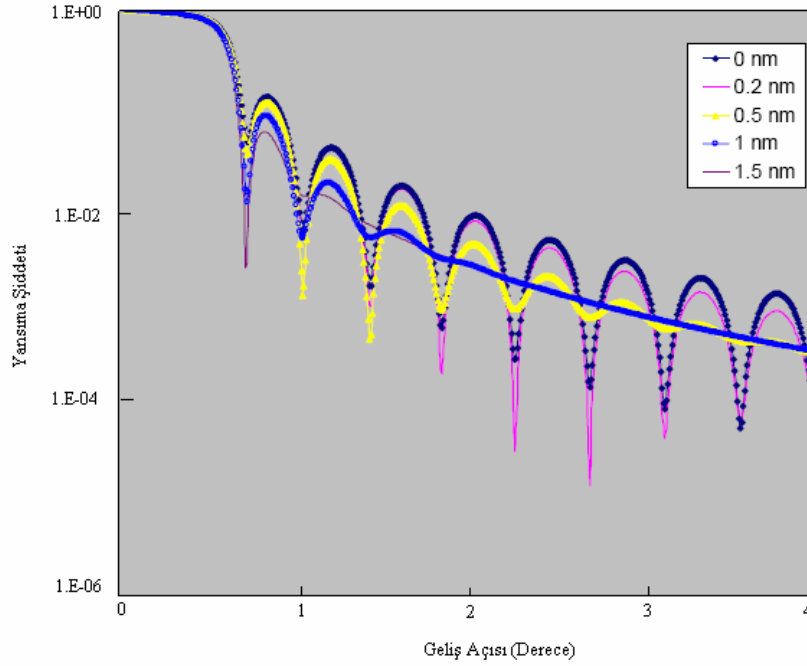
HR-XRD’de yansıma şiddetinin gelme açısına bağlı olarak değişimi Şekil 5.4’de görülmektedir [69]. Burada periyot tabaka kalınlığını, genlik ise tabakalar arası yoğunluk farkını ve pürüzlülüğü vermektedir. Yansıma şiddetinin yüzey pürüzlülüğüne ve büyütülen filmin kalınlığına bağlı grafikleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmektedir. Şekil 5.5’de tabaka kalınlığı artıkça yansıma şiddetine bağlı olarak saçakaların netleştiği, Şekil 5.6’da ise tabaka kalınlığı artıkça pürüzlülüğün azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Yansımada şiddetinin gelme açısına bağıllığı



Şekil 5.5. Yansımada şiddetinin büyütülen filmin kalınlığına bağılı değişimi (Si alttaş üzerine büyütülen Ir metal filmi)

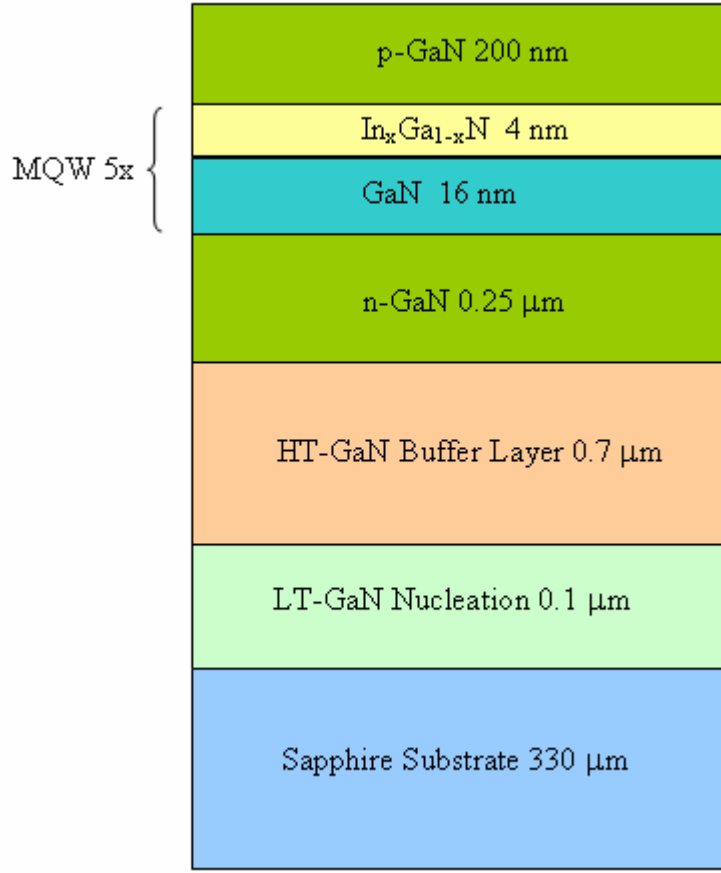


Şekil 5.6. Yansıma şiddetinin elde edilen tabakalarının yüzey pürüzlülüğüne bağlı grafiği

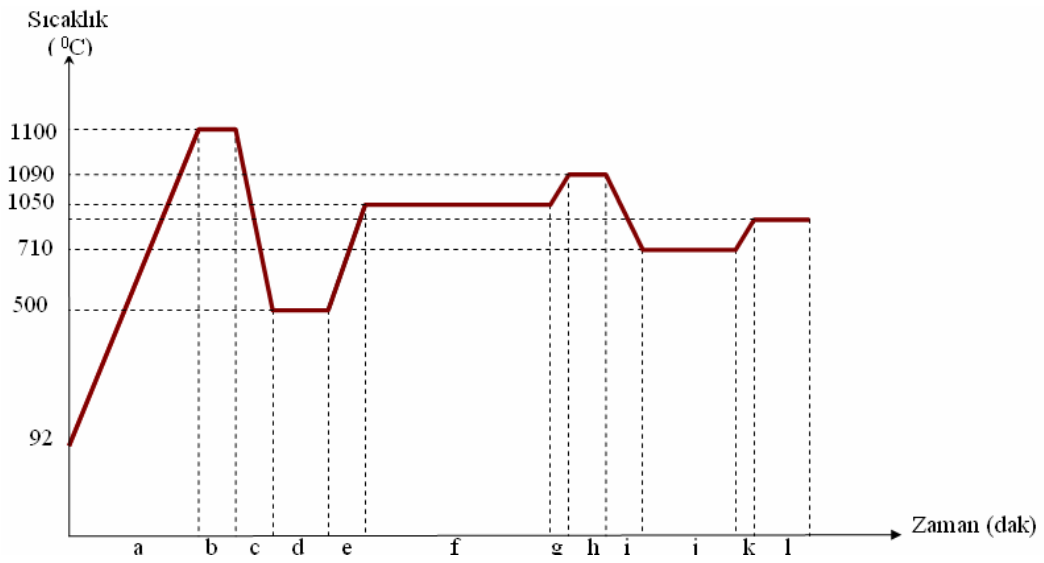
5.2. AlGaAs/GaAs ve InGaN/GaN Yapılarının Analizi

Bu Bölümde, 4.7.1 ve 4.7.2 Bölümlerinde büyütülme aşamaları sunulan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ süperörgü, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ QW yapılar ve özellikleri aşağıda sunulan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW LED yarıiletkeninin X-ışını kırınımı tekniği ile yapısal özellikleri verildi.

Bu çalışmada yapısal ve optik özellikleri belirlenen, Bilkent Üniversitesi Laboratuvarında MOCVD cihazı ile LED yapımında kullanılması tasarlanarak büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW LED yapısı Şekil 5.7’de gösterildi. Bu yapının büyütme sürecinin zaman-sıcaklık değişimi ise Şekil 5.8’da sunuldu.



Şekil 5.7. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED Yapısı [70, 71]

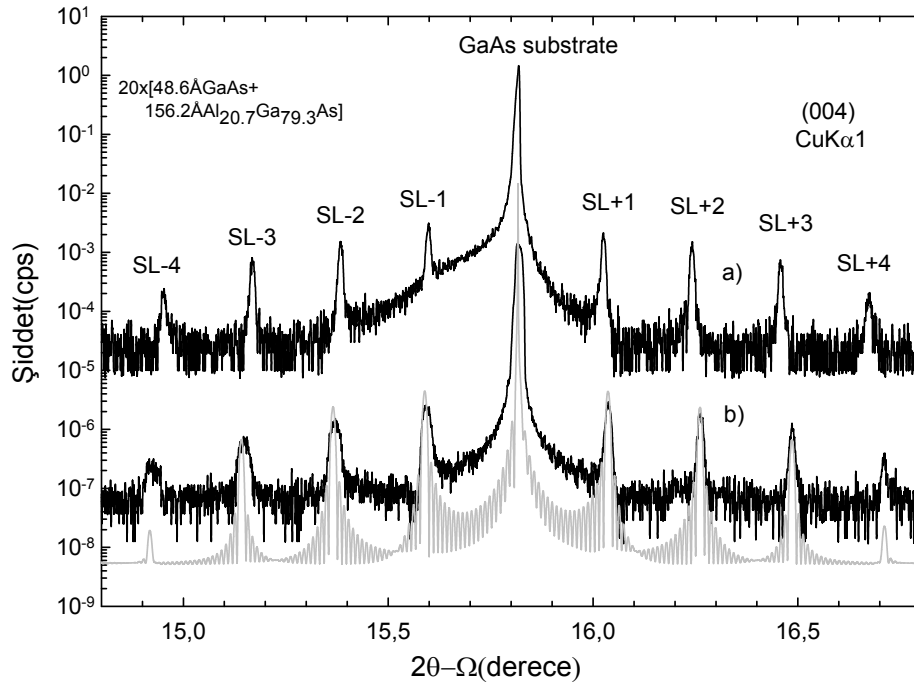


Şekil 5.8. MOCVD yöntemiyle safir üzerine mavi LED büyütme sürecinin zaman-sıcaklık şeması

Şekil 5.8'daki LED yapısı: a-Isıtma, b-Nitridasyon sıcaklığı (1100°C), c-Soğutma, d-Düşük sıcaklıkta GaN nucleation tabaka büyütme (500°C), e-Sıcaklığı, büyütme sıcaklığına artırma, f-Yüksek sıcaklıkta GaN tampon tabaka büyütme (1050°C), g-Sıcaklığı, büyütme sıcaklığına artırma, h-n tipi GaN tabaka büyütme (1090°C), i-Sıcaklığı, büyütme sıcaklığına azaltma, j-LED'in büyütülmesi (710°C), k- Sıcaklığı, büyütme sıcaklığına artırma, l-GaN üst tabaka büyütülmesi (1030°C) şeklindedir.

5.2.1 Numunelerin x-ışını kırınımı ölçümleri ve analizi

Öncelikle, AlGaAs QW yapısının büyütülmesinde kalibrasyon amacıyla üretilen $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ süperörgüsünün, büyüme oranını belirlemek amacıyla kalınlık ve Al yüzdesini belirlemek amacıyla malzeme oranlarının XRD piklerinin simulasyonu ve değerlendirilmesi yapıldı. Bu yapıya ait ω -2 θ taraması, simulasyon eğrisi ile birlikte Şekil 5.9'da verildi. Şekil 5.9'a göre en yüksek pik GaAs (004)'den gelmektedir. Burada GaAs piki 15,8°'de gözlenmektedir.



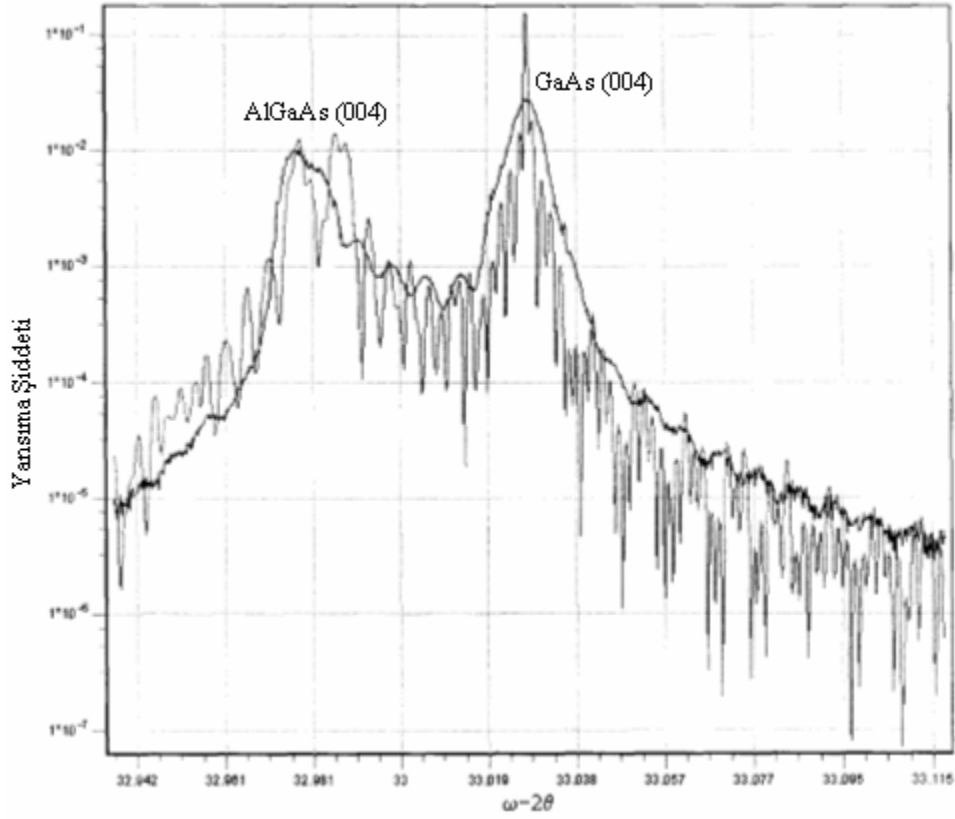
Şekil 5.9. $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW süperörgü yapısının ω -2 θ taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir

Yapılan analizlerin sayısal değerlerinin yer aldığı Çizelge 5.1’de, istenilen kalınlık ve konsantrasyon hedeflerine ulaşıldığı görülmektedir.

Çizelge 5.1. Süperörgü yapısının XRR ve HXRD’den elde edilen sonuçları

	ρ_{sim}	$\rho_{\text{theo.}}$	$t(\text{nm})$		$\sigma(\text{nm})$	X
	$\pm 0,03 \text{ g/cm}^2$	g/cm^2	$\pm 1\%$		$\pm 0,1$	
	XRR	-	XRR	HXRD	XRR	HXRD
#4	5,6338	5,3176	4,8578	4,856	1,2261	-
#3	5,4846	4,9889	15,622	15,621	1,9964	20,7
#2	5,2527	5,3176	544,83	544,829	4,1530	-
#1	-	-	-	-	-	-

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ MQW yapısının analiz sonuçları kullanılarak büyütülen $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x=0,2 \rightarrow 0,6$) tek kuantum kuyulu yapının XRD ω - 2θ taraması Şekil 5.10’da verildi.



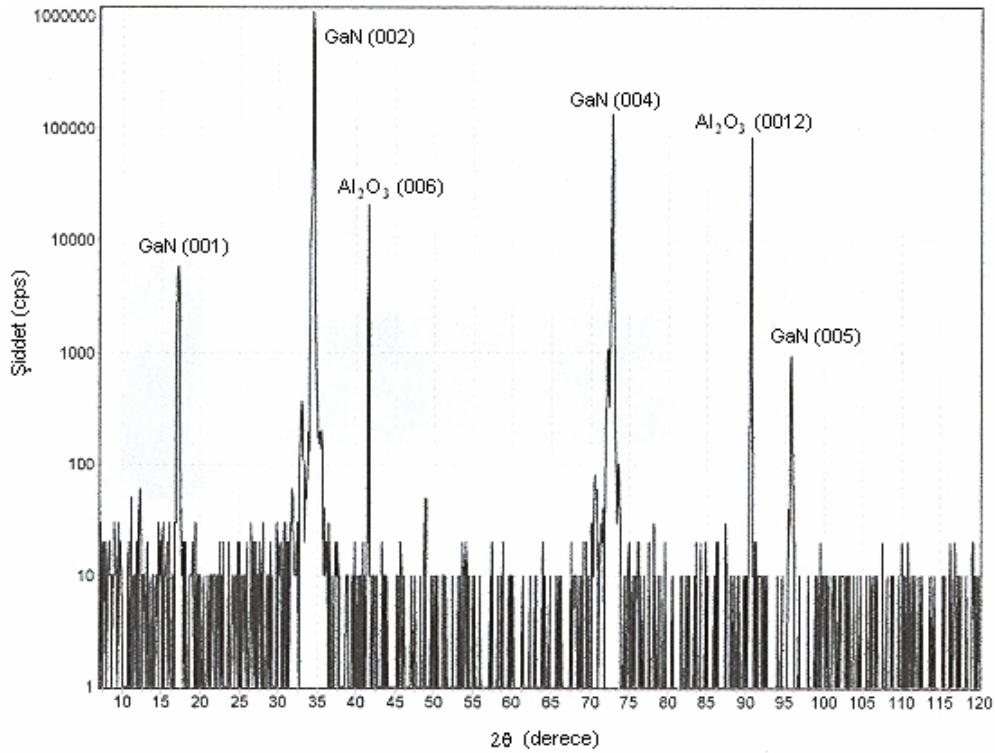
Şekil 5.10. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ QW LED yapısının ω - 2θ taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir [72]

Şekil 5.10’de AlGaAs ve GaAs pikleri sırasıyla $32,980^\circ$ ve $33,029^\circ$ ’de gözlenmektedir. Çizelge 5.2’de hedeflenen kalınlık ve konsantrasyon hedeflerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu kalibrasyon numunesi ile elde edilen verilerin tekrarlanabilir büyütmelemin sağlandığını göstermesi açısından önemlidir. Buna rağmen, büyütülen yapının ω - 2θ pik pozisyonları ve yarıgenişlikleri dikkate alındığında, kristal kalitesinin çok iyi olmadığı tespit edildi.

Çizelge 5.2. QW LED yapısının XRR ve HXRD’den elde edilen sonuçları [72]

Materyal	Kalınlık (nm)	Konsantrasyon X, %	Yoğunluk (g/cm ²)
GaAs	522,0148	0,00	5,31763
Al _x Ga _{1-x} As	1099,9540	39,06	4,36480
Al _x Ga _{1-x} As	111,9915	15,46	5,00002
GaAs	5,5965	0,00	5,31763
Al _x Ga _{1-x} As	148,2542	60,29	4,36480
Al _x Ga _{1-x} As	1006,2920	46,69	5,00002
GaAs	579,6157	0,00	5,31763
GaAs	0,0000	0,00	5,31763

Şekil 5.7’de şematik olarak yapısı sunulan In_xGa_{1-x}N/GaN MQW LED yapısının ω-2θ taraması Şekil 5.11’de verildi. Bu 002 düzlemindeki en yüksek pik GaN’ aittir.



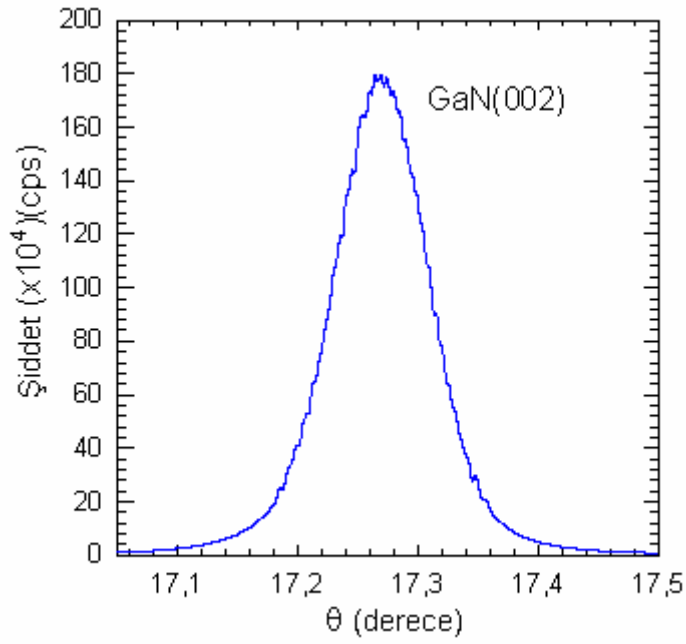
Şekil 5.11. In_xGa_{1-x}N/GaN LED yapısının ω-2θ grafiği

Buradaki piklerin açısı değerleri ve yarı genişlikleri (FWHM) ve diğer yapısal parametreler Çizelge 5.3 ve 5.4’de verilmektedir. Bu çizelgeler şematik yapıda gösterilen büyütme (kalınlık, konsantrasyon gibi) hedefleri ile uyumlu sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu yapının kristal kalitesinin daha düzgün olduğu tespit edildiğinden ve LED olarak kullanılabilirliği bulunduğundan analizleri diğer numunelerimizden daha ayrıntılı olarak incelendi.

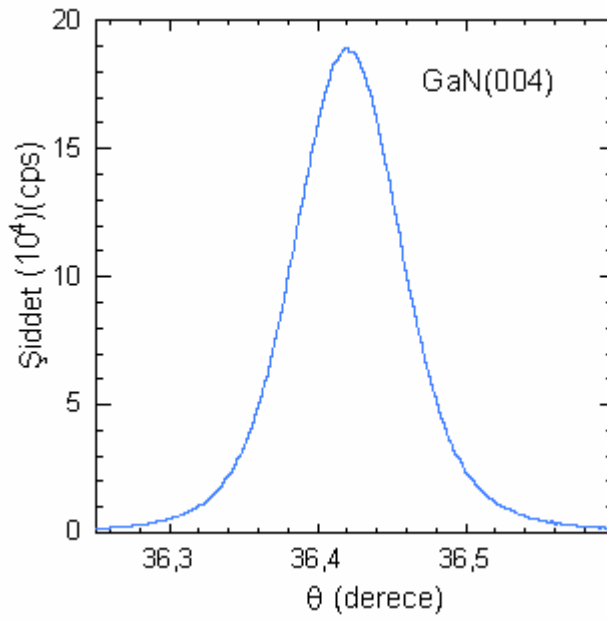
Çizelge 5.3. InGaN için XRR ve HXRD’den elde edilen sonuçlar [70, 71]

	ρ_{sim}	$\rho_{theo.}$	$T(nm)$		$\sigma(nm)$	X
	$\pm 0,03 g/cm^2$	g/cm^2	$\pm 1\%$		$\pm 0,1$	
	XRR	-	<u>XRR</u>	<u>HXRD</u>	XRR	HXRD
#7	5,02863	6,08840	193,5594	192,7642	0,14070	-
#6	5,14251	6,50361	2,2327	2,2330	1,47601	9,60
#5	5,05121	6,08840	15,6551	-	0,54799	-

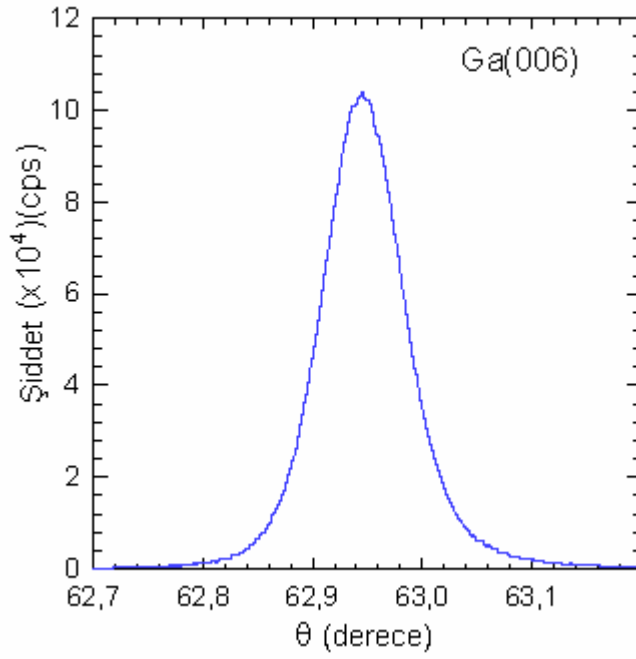
Tüm yapıların, yapısal parametrelerini (kalınlık, konsantrasyon, yoğunluk, strain,...) elde edebilmek için yüksek çözünürlüklü monokromatörlerin kullanılması gerekir. Biz laboratuvarımızda bu özelliklerde bir monokromatör kullandık.



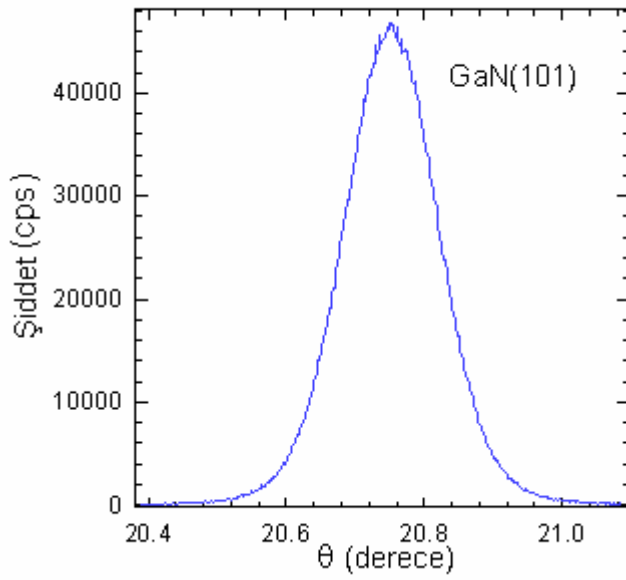
Şekil 5.12. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (002) filminin simetrik rocking eğrileri [70]



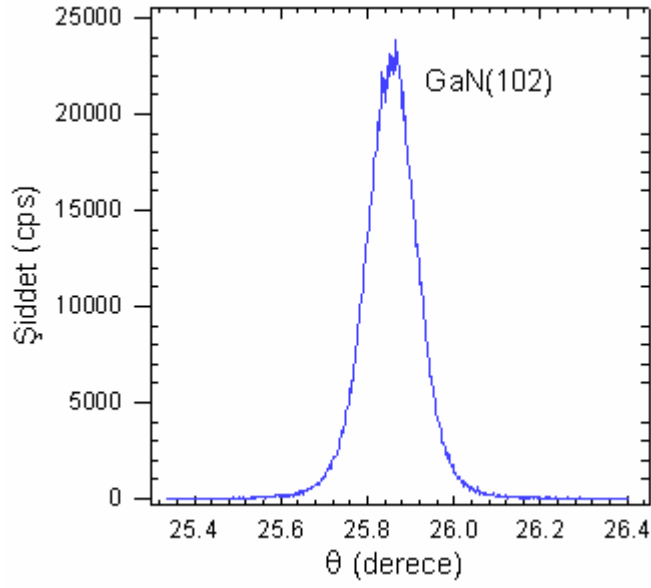
Şekil 5.13. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (004) filminin simetrik rocking eğrileri



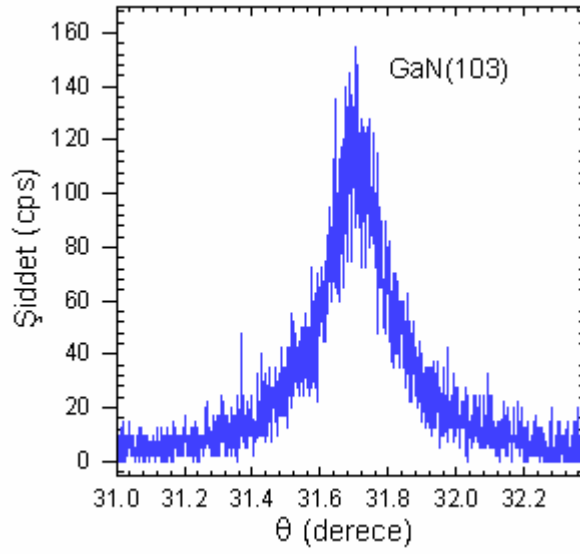
Şekil 5.14. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (006) filminin simetrik rocking eğrileri



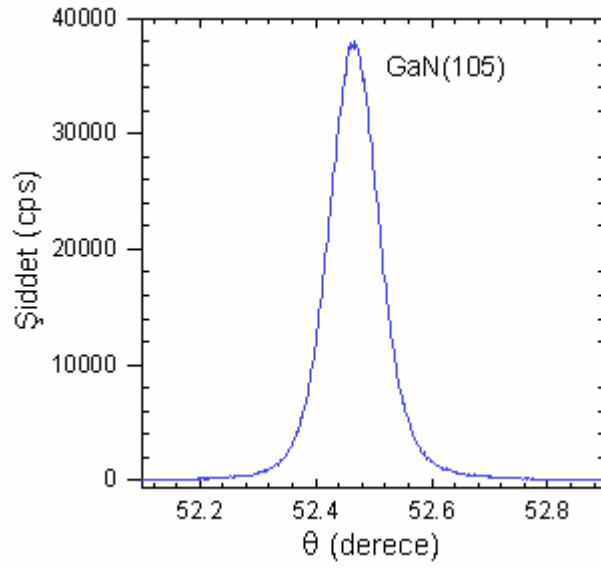
Şekil 5.15. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (101) filminin asimetrik rocking eğrileri



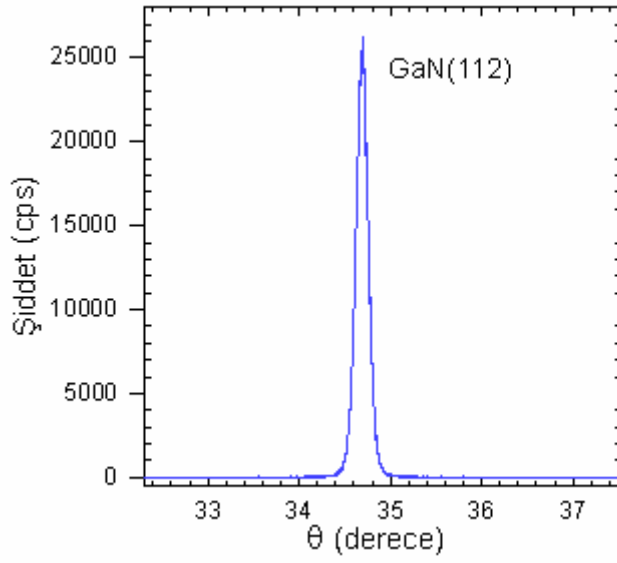
Şekil 5.16. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (102) filminin asimetrik rocking eğrileri [70]



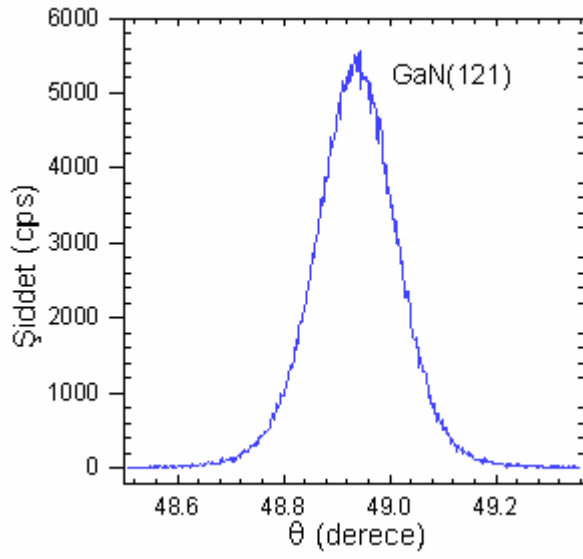
Şekil 5.17. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (103) filminin asimetrik rocking eğrileri



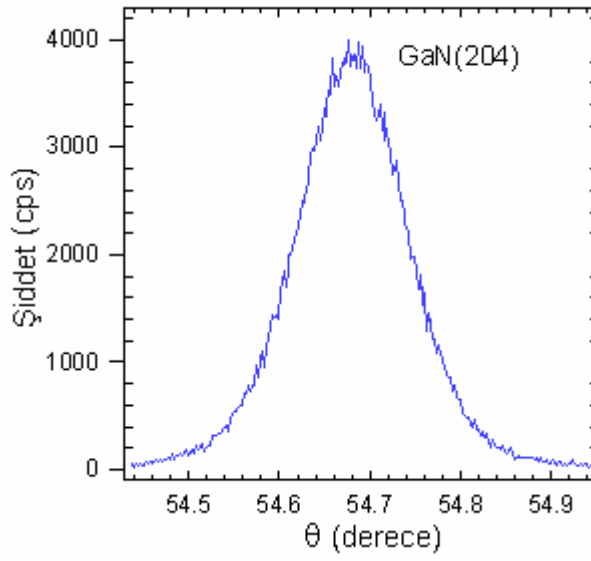
Şekil 5.18. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (105) filminin asimetrik rocking eğrileri



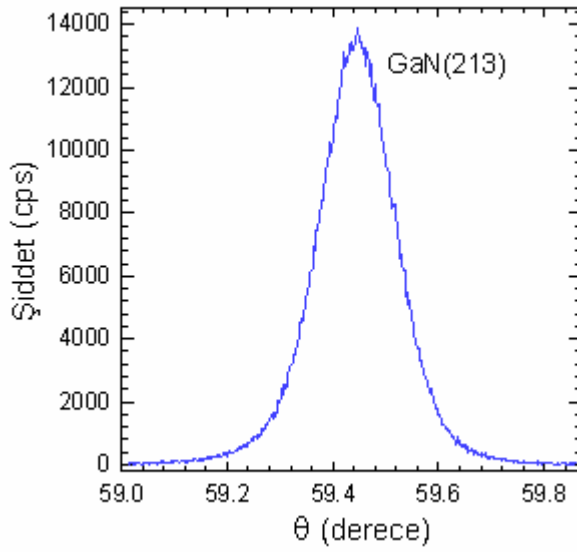
Şekil 5.19. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (112) filminin asimetrik rocking eğrileri



Şekil 5.20. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (121) filminin asimetrik rocking eğrileri



Şekil 5.21. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (204) filminin asimetrik rocking eğrileri



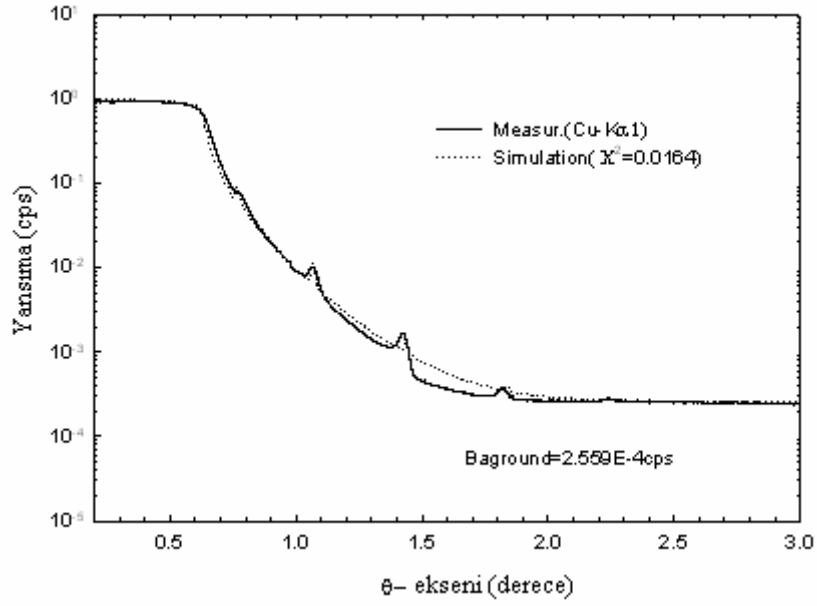
Şekil 5.22. Safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN (213) filminin asimetrik rocking eğrileri

Şekil 5.12-22’de safır (0001) yönelimli alttaş üzerine GaN tarama modunda XRD simetrik ve asimetrik rocing eğrileri görünmektedir. Şekil 5.16’deki asimetrik (102) ile Şekil 5.12’deki simetrik (002) rocing eğrileri birleştirilmiş gibi düşünülürse XRD taraması GaN filmlerinin kristal kalitesinin karakterizasyonu için güvenilir bir teknik olur. Yapı içindeki kusurlar hem simetrik (002) hem de asimetrik (102) rocing eğrileri piklerinde önemli derecede genişlemeye sebep olurlar. Burada GaN (002) ve GaN (102) yarı genişliği sırasıyla 309,6 ve 450 arcsec olarak bulunmuştur(diğer GaN piklerinin FWHM ve Theta değerleri Çizelge 5.4’de verilmektedir). Literatürde asimetrik rocing eğrisinin yarı genişliği simetrik rocing eğrisinin yarı genişliğinden daha geniştir. Bu bizim sonuçlarda da görülmektedir. Rosing eğrilerinin yarı genişliklerindeki genişlemeler hem saf kenar hem de saf dönme (screw) ya da karışık yanlış yerleşmelerden sorumludur. GaN (002) simetrik eğrisinde screw modunda genişleme gözlenirken asimetrik GaN (102)’de karışık yanlış yerleşme modu gözlenmektedir.

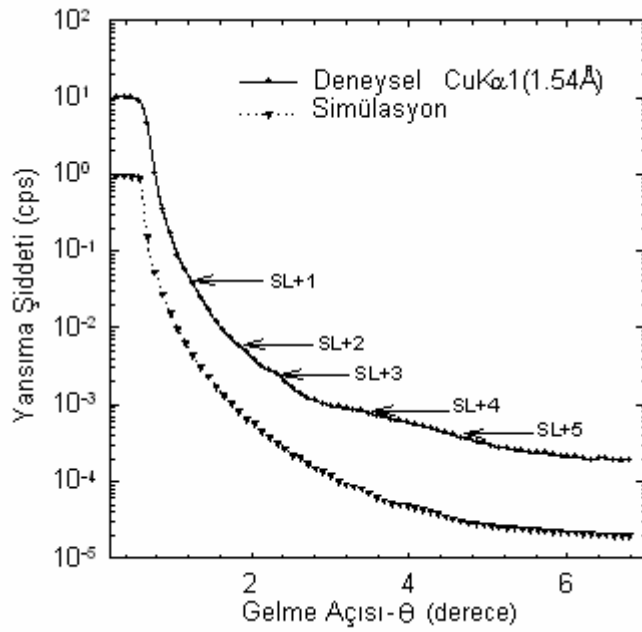
Çizelge 5.4. GaN simetrik ve asimetrik piklerinin FWHM ve Theta değerleri

	FWHM(degree)	FWHM(arcsec)	Theta(degree)
GaN(002)	0,086	309	17,268
GaN(004)	0,081	291	36,120
GaN(006)	0,083	298	62,946
GaN(101)	0,144	518	20,753
GaN(102)	0,125	450	25,853
GaN(103)	0,101	363	31,702
GaN(105)	0,097	349	52,463
GaN(121)	0,160	576	48,937
GaN(204)	0,128	460	54,679

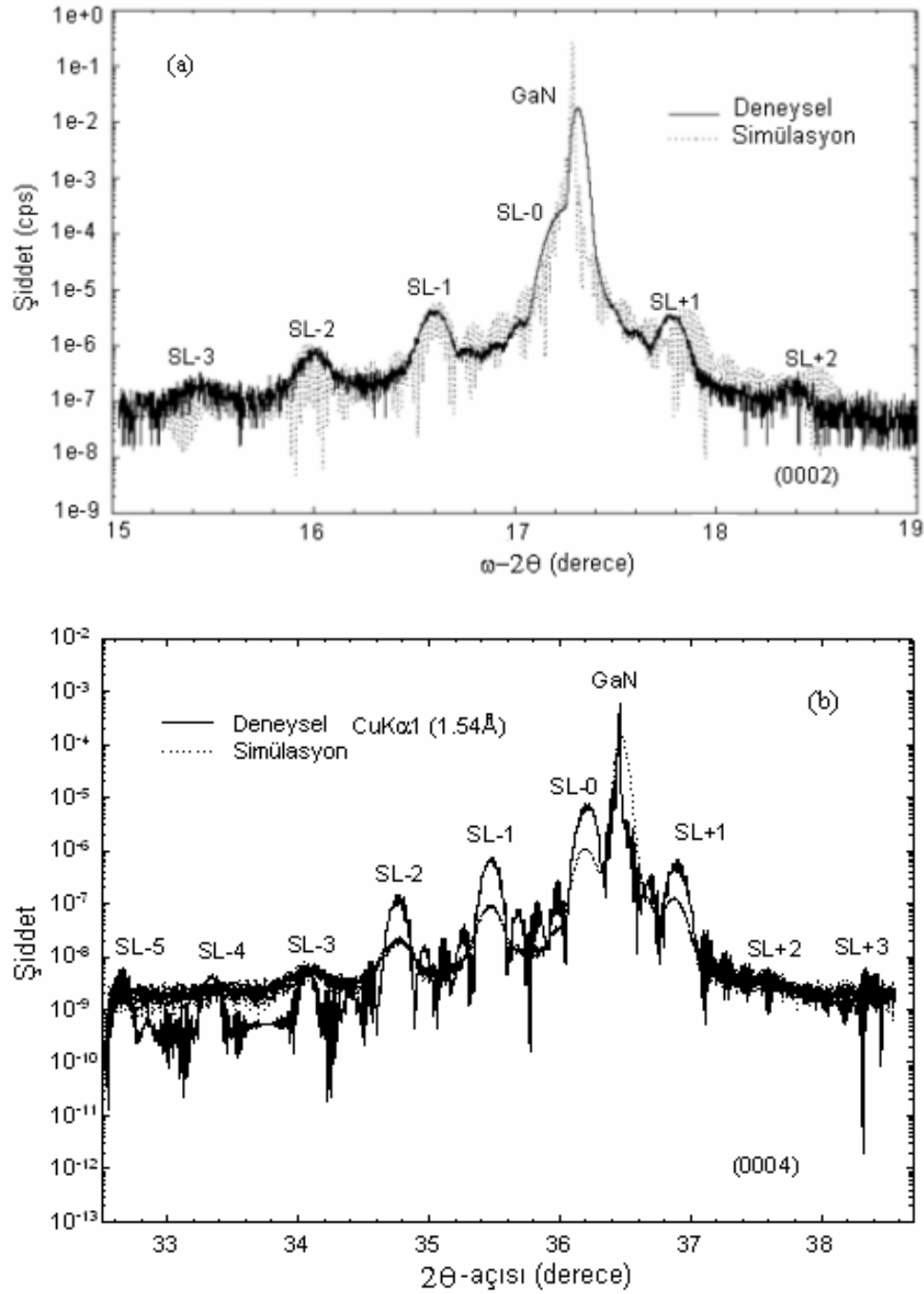
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapılarının Şekil 5.23 ve 5.24’de sırasıyla x-ışını yansıma grafikleri görülmektedir. Prensip tabakaların kalınlıkları, onların kimyasal bileşimi gibi ara yüzeylerin pürüzlülüğü ölçümlerden gözlenebilir. İki şekilde $0-07^\circ$ aralığında plato bölgesi kuvvetli bir şekilde pürüzsüzdür. Bu bize numune yüzeyinin üniform (aynı şekilde) olduğunu bildirir. Yansıma eğrileri üssel davranış gösterir ve Şekil 5.23’den SL+4 ve Şekil 5.24’den SL+5 sıralı uydu pikleri gözlenir. Yansıma eğrilerinde uydu pikleri çok net olarak gözlemlenmiştir. Uydu pik yüksekliği ara yüzey pürüzlülüğüne ve tabakalar arası yoğunluk farkına bağlıdır. Ayrıca periyotlar ise tabaka kalınlıklarına bağlıdır. Uydu piklerine alt etkenlerin katkıları kuvvetlidir. Aynı zamanda uydu piklerinin periyodik olarak oluşması numunenin yönelimi de bağlıdır.



Şekil 5.23. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW LED yapısının yansıma grafiği [71]



Şekil 5.24. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapısının yansıma grafiği [70]

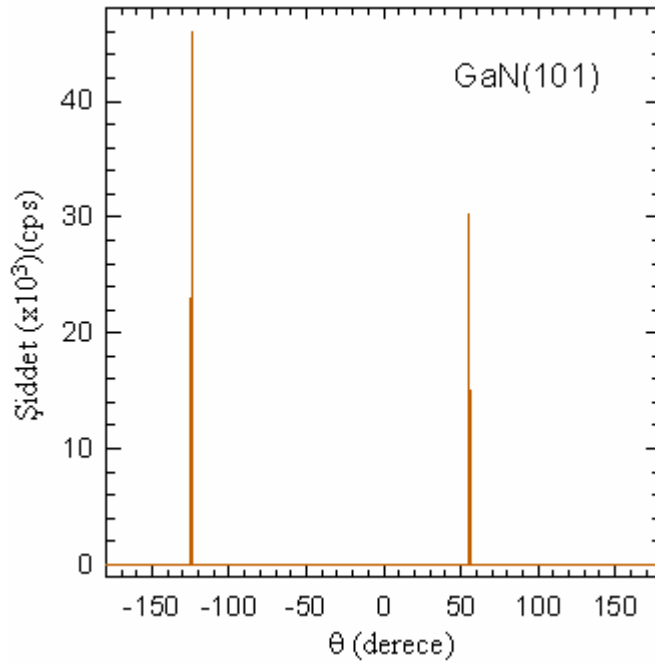


Şekil 5.25. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapısının a) (002) ve b) (004) $\omega-2\theta$ simetrik taraması. Noktalı eğriler deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir [70, 71]

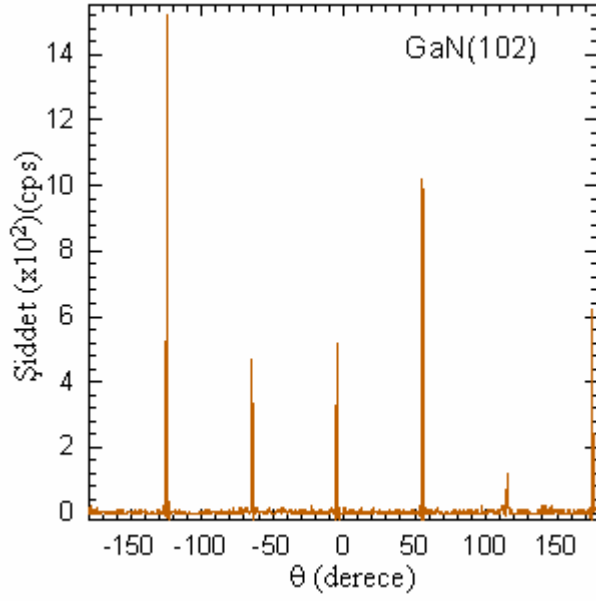
Şekil 5.25’de (002) ve (004) $\omega-2\theta$ simetrik taramaları görülmektedir. Şekildeki HRXRD taramasındaki simülasyon eğrisi LEPTOS programı ile elde edildi. Burada (002) için SL+2 ve SL-3 uydu pikleri, (004) için ise SL+3 ve SL-5 uydu pikleri

açıkça ayırt edilebilmektedir. Bu ise bize InGaN/GaN ara yüzeylerinin çok iyi olduğunu gösterir. $36,410^\circ$ deki GaN piki çok keskindir. Oysa bütün uydu pikleri band genişlikleri dardır. Bu sonuç yapının her yönüyle iyi kristalize olduğunu gösterir. Bununla birlikte saçaklarla uydu pikleri arası tam açık değil ise tabakaların pürüzlülüğü hakkındaki bilgiler yeterli olmaz. Normal örgü hatası oranı GaN ve InN parametreleri kullanılarak $2,367 \times 10^{-3}$ olarak bulundu.

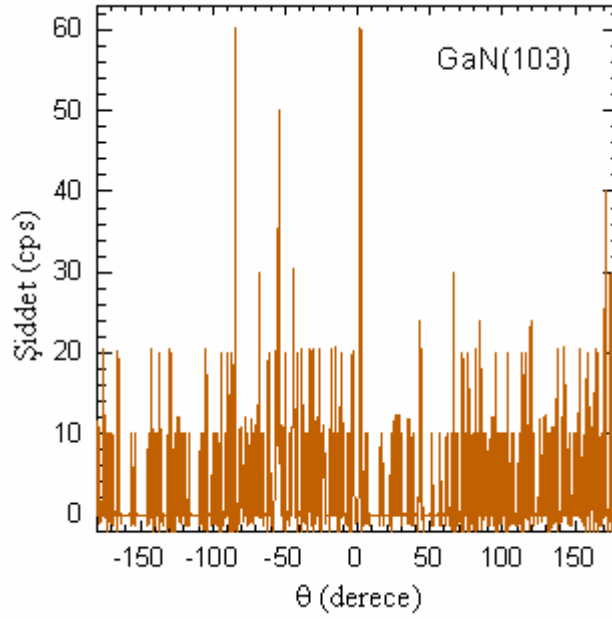
LEPTOS programından kuyu genişliği, bariyer genişliği ve In konsantrasyonu yaklaşık olarak sırasıyla 2,2 nm, 15,7 nm ve % 9,6 olarak hesap edildi.



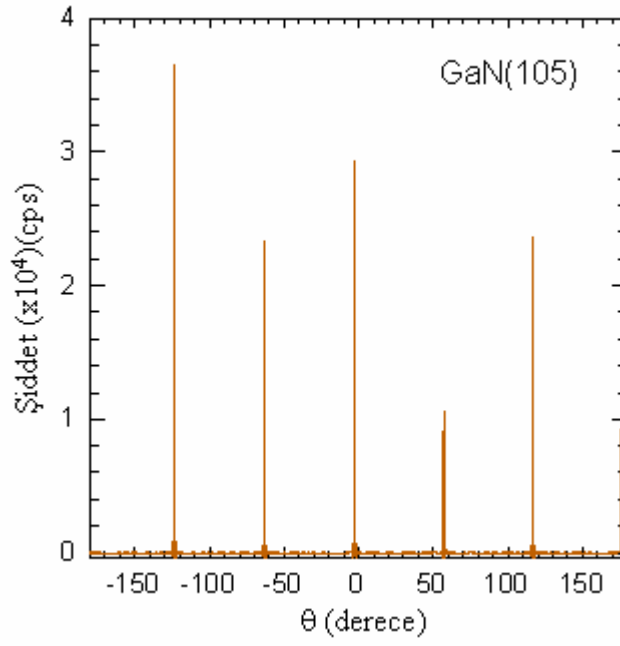
Şekil 5.26. Safır üzerine GaN(101) düzleminin asimetric θ açıları



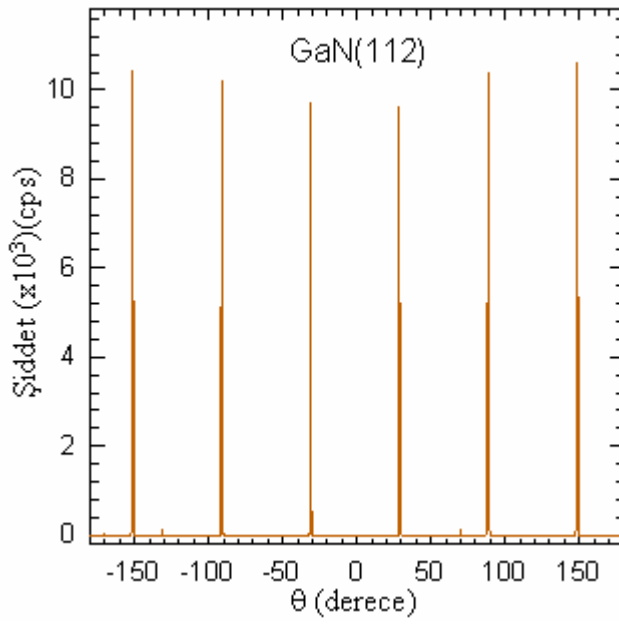
Şekil 5.27. Safır üzerine GaN(102) düzleminin asimetric θ açıları



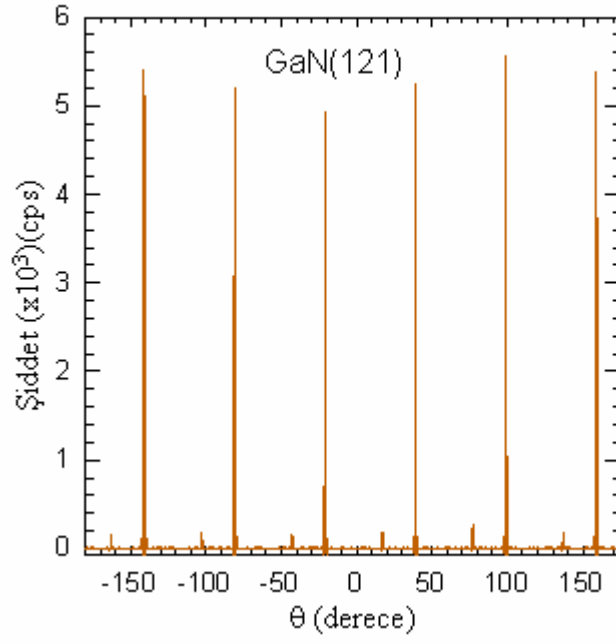
Şekil 5.28. Safır üzerine GaN(103) düzleminin asimetric θ açıları



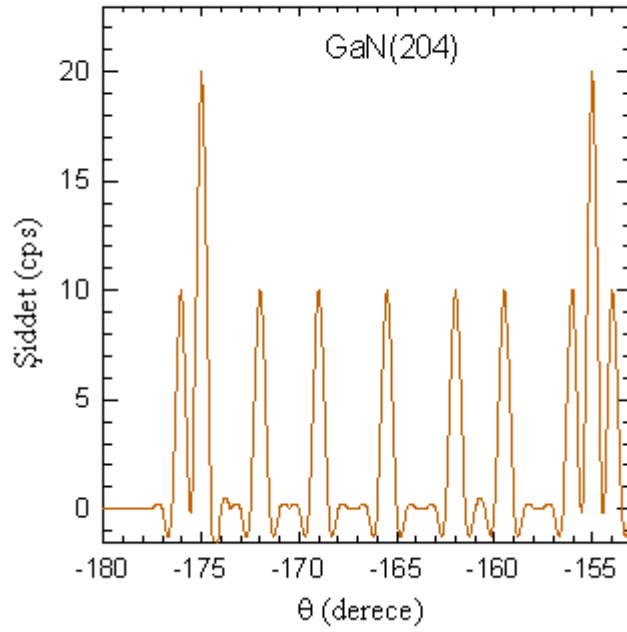
Şekil 5.29. Safır üzerine GaN(105) düzleminin asimetric θ açıları



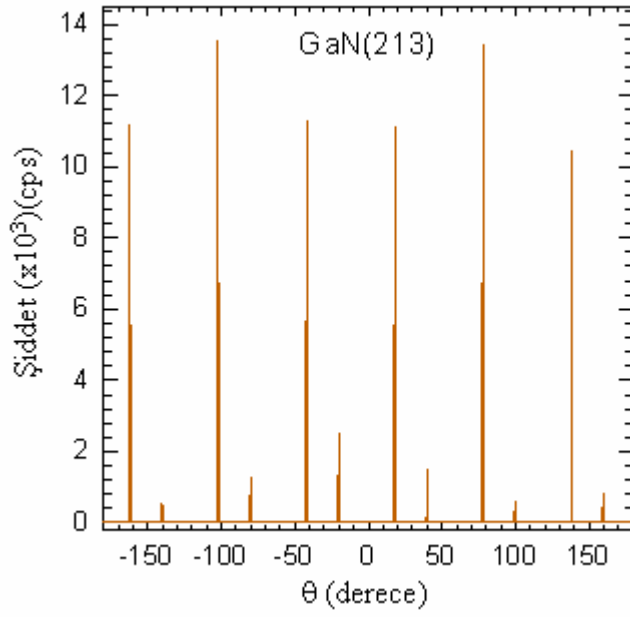
Şekil 5.30. Safır üzerine GaN(112) düzleminin asimetric θ açıları



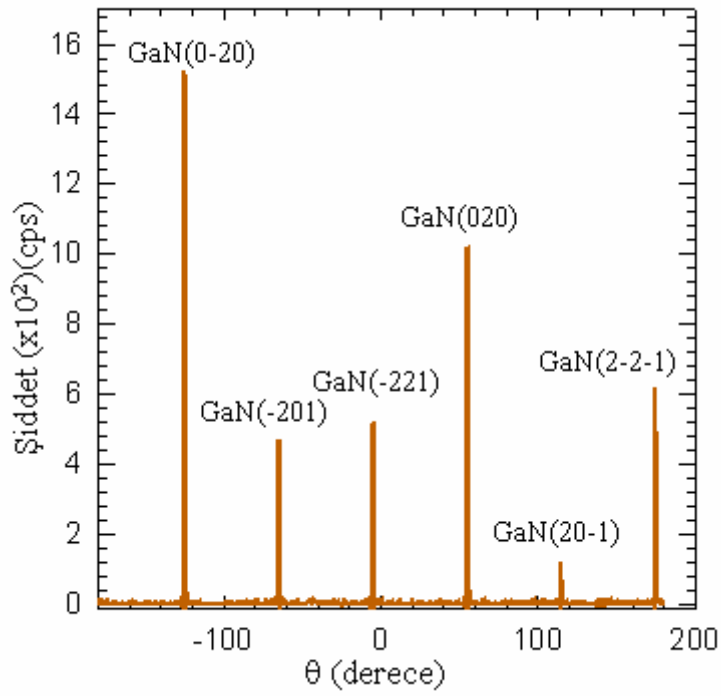
Şekil 5.31. Safır üzerine GaN(121) düzleminin asimetric θ açıları



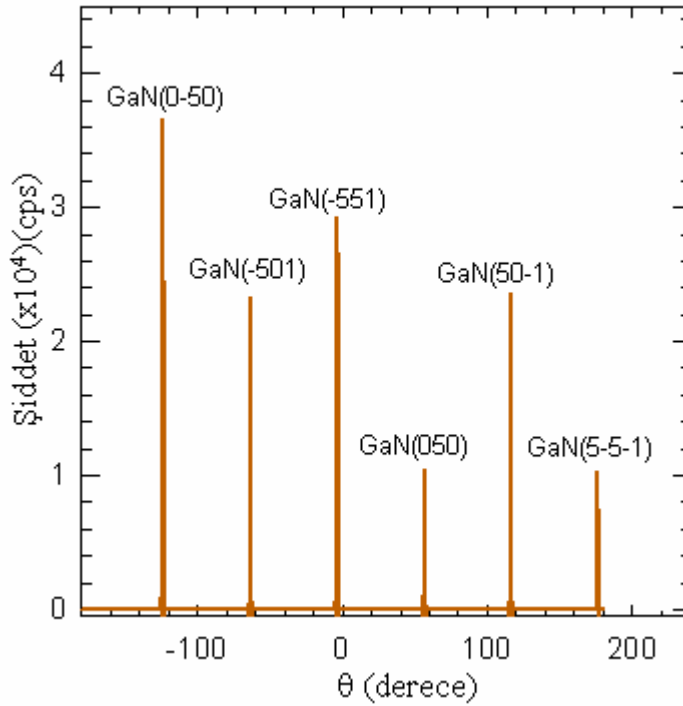
Şekil 5.32. Safır üzerine GaN(204) düzleminin asimetric θ açıları



Şekil 5.33. Safır üzerine GaN(213) düzleminin asimetric θ açıları



Şekil 5.34. Safır üzerine GaN (102) düzleminin asimetric θ açıları ve pik değerleri



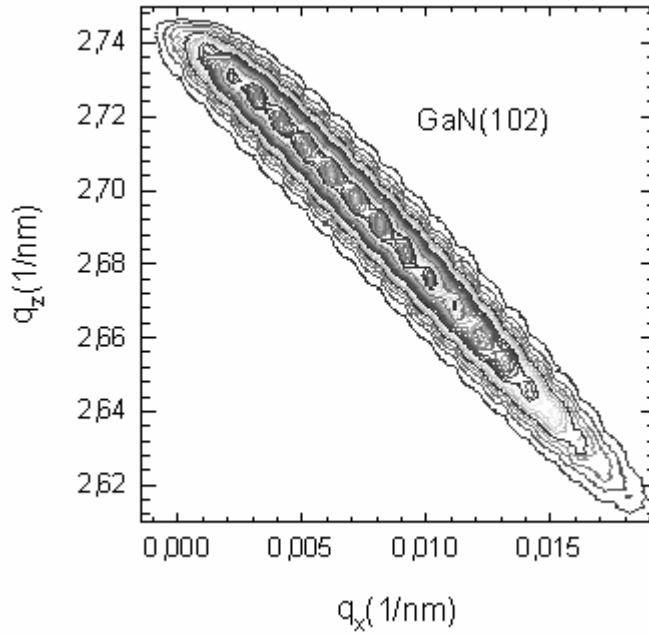
Şekil 5.35. Safır üzerine GaN (105) düzleminin asimetrik θ açıları ve pik değerleri

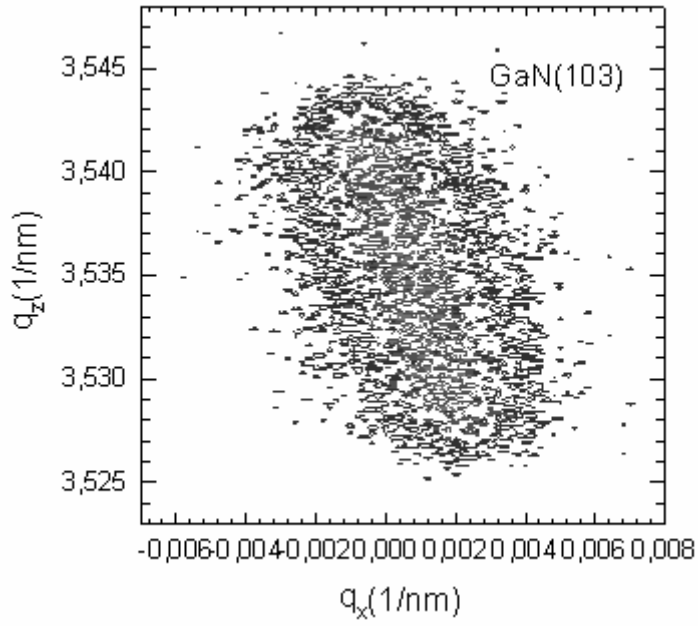
Şekil 5.34’de safır üzerine GaN(102) ve Şekil 5.35’de ise GaN(105) düzlemlerinin asimetrik θ açıları hesaplanarak gösterilmiştir. Şekil 5.35’de numune (105) eksenini etrafında dönüyor. X-açısı 62° ’de, numune $17,739^\circ$ ’de ve dedektör $36,963^\circ$ ’de sabitlenir. Görüldüğü gibi altı tane pik vardır. Burada (105) ve (102) düzleminin döndürülmesiyle oluşan hekzagonal yapıdaki düzlemleri dik (90°) kesmesi sonucu meydana gelen 6 simetri düzlem pikleri görülmektedir. Bu şekillerden ise hekzagonal düzlemlerin oluşması sonucuna dayanarak mükemmel bir yapı oluştuğu sonucuna varılır.

Çizelge 5.5’de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ a ve c örgü sabitleri Eş. (2,56) ve Eş. (2,57)’den hesaplanmıştır. Bant aralığı Eş. (2,58)’den hesaplanmıştır. Bu hesaplamada deneysel sonuçlarla uygunluk açısından $b=6\text{eV}$ alınmıştır.

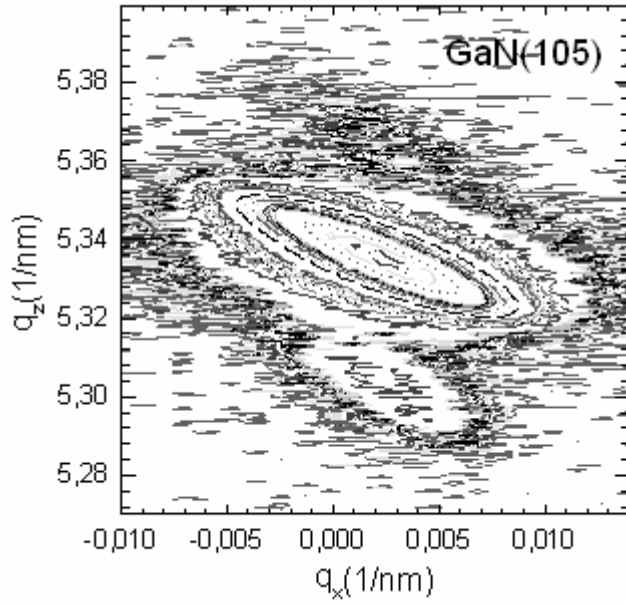
Çizelge 5.5. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımında x mol kesrine bağlı olarak bazı sabitlerin değerleri

Parametre	Simge	x=0,0 GaN	X=0,096 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	x=1,0 InN
Örgü sabiti	a (Å)	3,19	3,22	3,545
Örgü sabiti	c (Å)	5,189	5,23	5,703
Eğrilme parametresi	b (eV)	11,4	8,62	0
Enerji band aralığı	E_g (eV)	3,544	2,86	1,89
Yoğunluk	$(\text{cm}^{-2}) \times 10^6$	6,1	6,76	6,81
Etkin Kütle	$\frac{m^*}{m}$ (kg)	0,22	0,21	0,115
Ses hızı	$(\text{m/s}) \times 10^3$	6,59	6,55	6,24

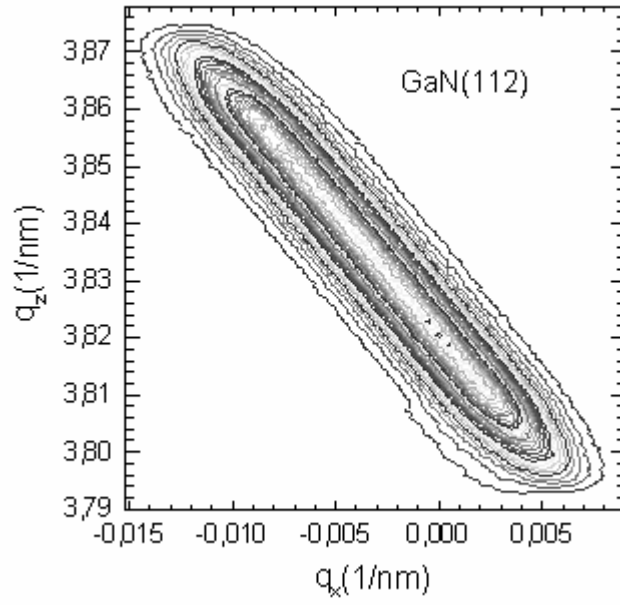
Şekil 5.36. Alttaşın (102) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



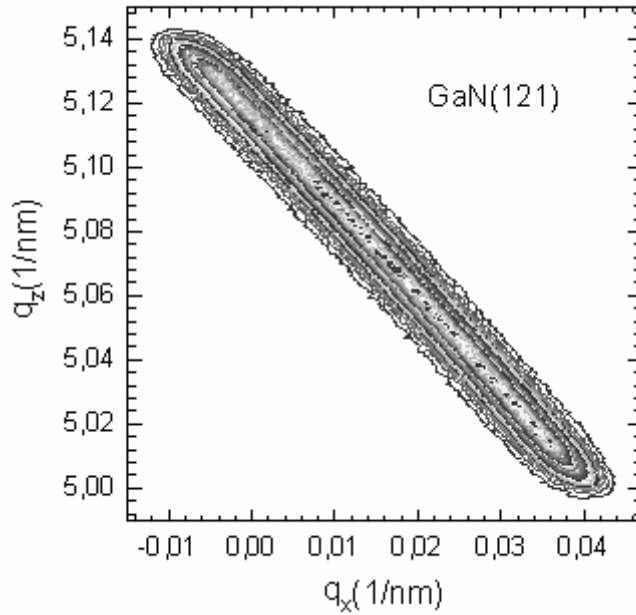
Şekil 5.37. Alttaşın (103) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



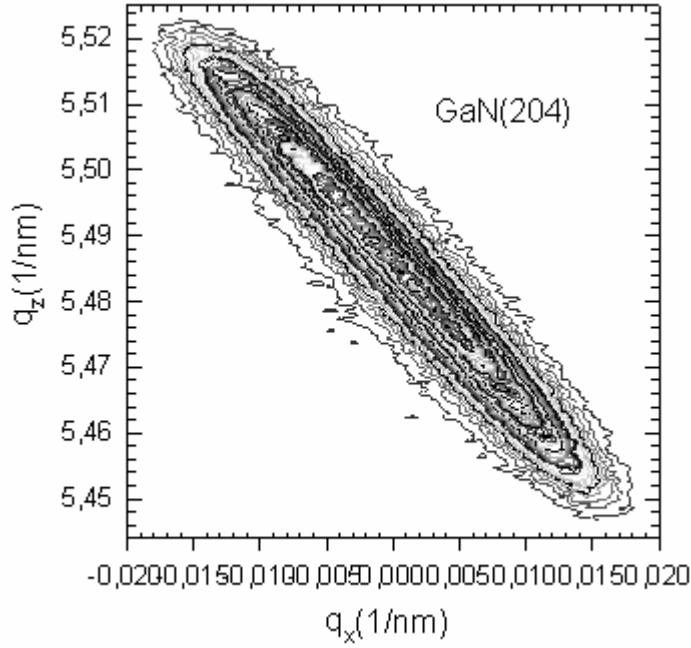
Şekil 5.38. Alttaşın (105) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



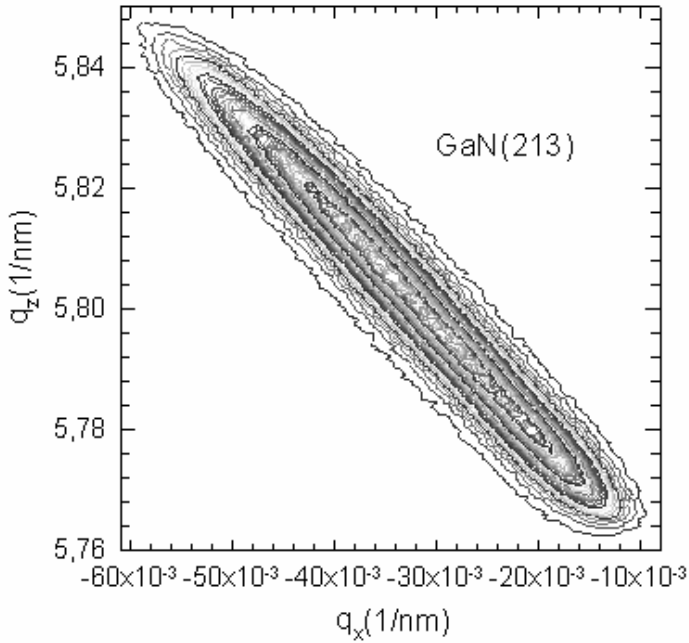
Şekil 5.39. Alttaşın (112) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



Şekil 5.40. Alttaşın (121) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



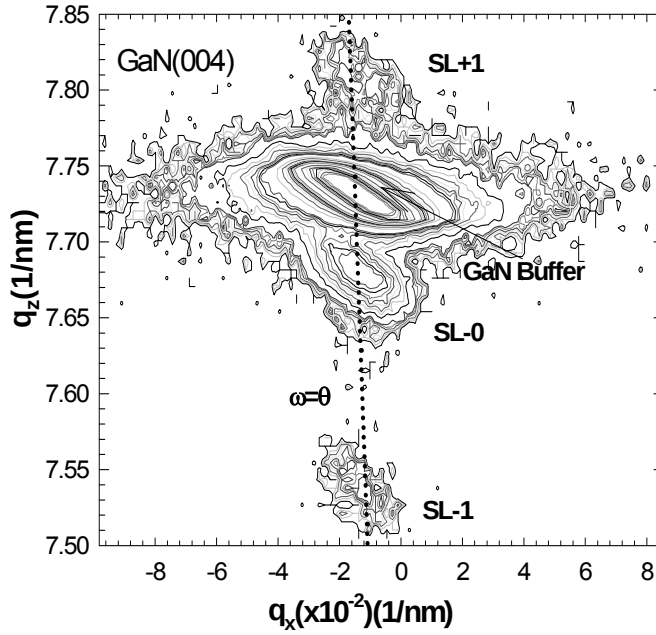
Şekil 5.41. Alttaşın (204) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası



Şekil 5.42. Alttaşın (213) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası

Şekil 5.36-Şekil 5.42 asimetrik piklerinin ters uzay haritasında aynı yönlü yönelim gözlenmektedir. Buda numunenin kristal kalitesinin iyi olduğuna işerettir. Çünkü

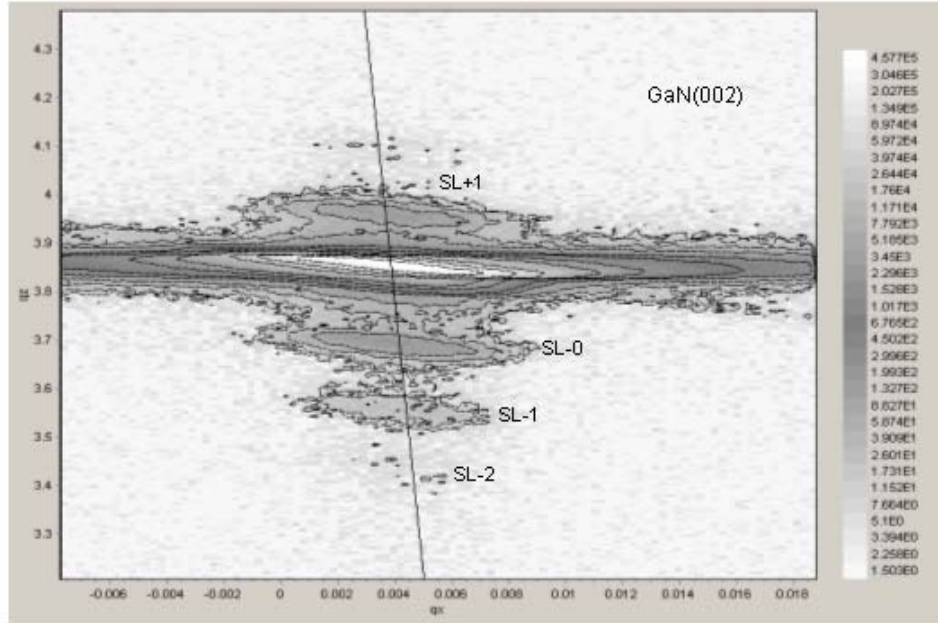
kalitesiz bir numunenin asimetrik pikine ait ters uzay haritası gözlemlenmesi zordur ve ayrıca büyüme tek yönlü olmayabilir.



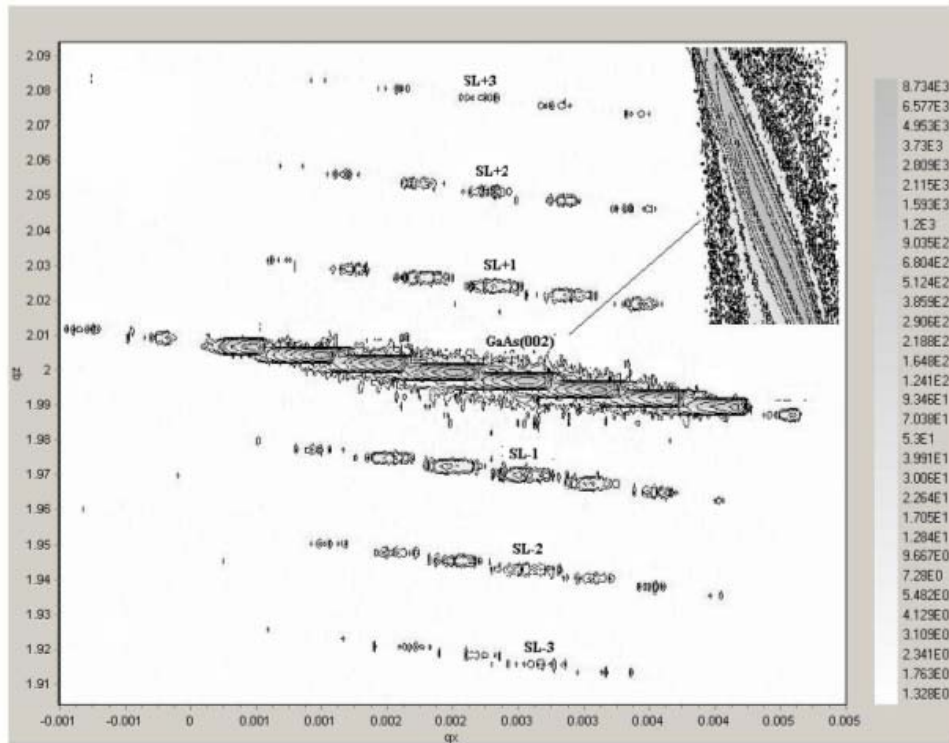
Şekil 5.43. Alttaşın (004) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası [70]

Şekil 5.43’de (In, Ga) N kuantum kuyulu yapının (004) yansımasının ters uzay haritası görünmektedir. Burada GaN (tampon) piki ve uydu pikleri net bir şekilde görülmektedir. GaN tampon tabaka ve MQW sisteminin maksimum şiddeti $\omega=\theta$ olarak ayarlanmıştır. MQW, GaN tampon tabakaya göre üniformdur. Bu sonuçlar XRR ve HXRD sonuçları ile karşılaştırıldığında uyum içerisinde.

Şekil 5.44’de alttaşın (002) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ve Şekil 5.45’de alttaşın (002) yöneliminde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW ölçülen ters uzay haritaları görülmektedir. Şekil 5.44’deki GaN (tampon) ve uydu pikleri Şekil 5.45’deki GaAs (tampon) piki ve uydu pikleri XRR ve HRXRD sonuçlarından elde edilen grafikleri doğrulamaktadır.



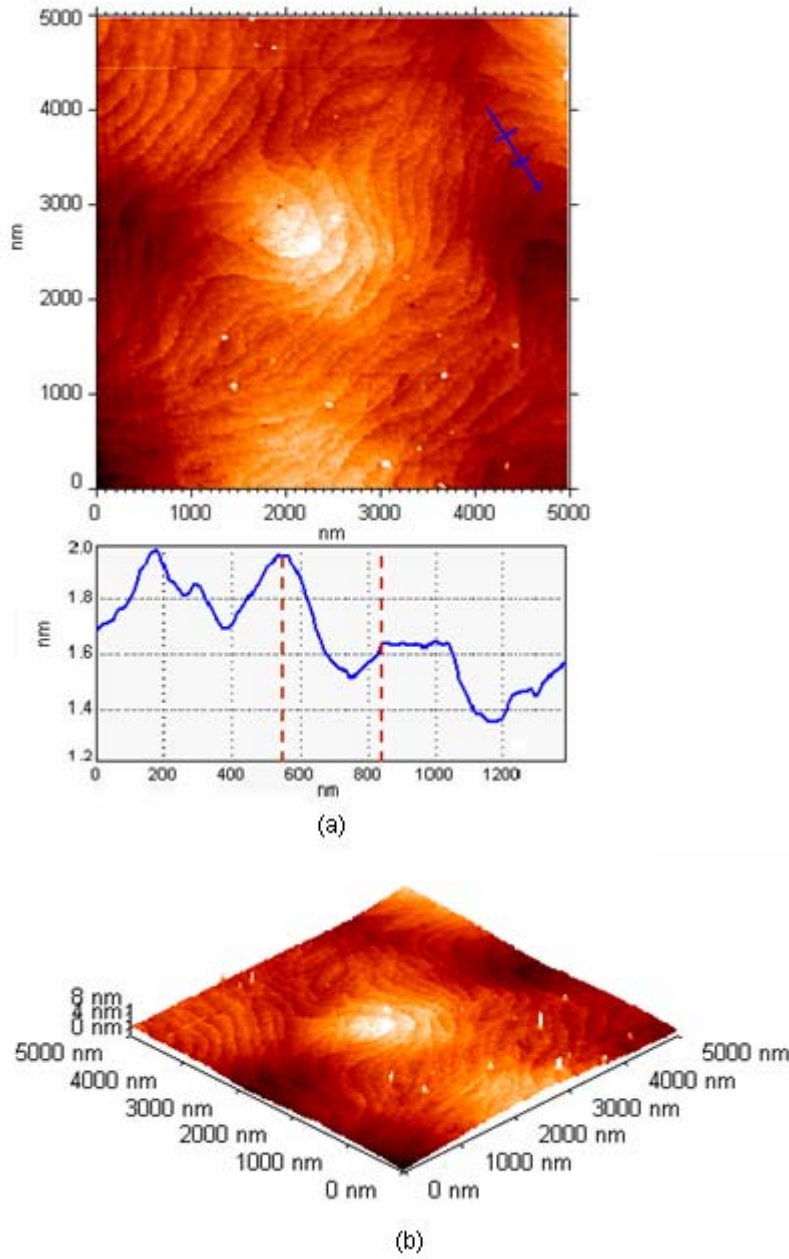
Şekil 5.44. Alttaşın (002) yöneliminde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW ölçülen ters uzay haritası [70, 71]



Şekil 5.45. Alttaşın (002) yöneliminde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW ölçülen ters uzay haritası

5.2.2. InGaN yapısının Atomik Kuvvet Mikroskobu analizi

AFM görüntüsü tipik ince filmlerin yüzey morfolojilerinin belirlenmesi ve incelenmesi amacıyla kullanışlı bir sistemdir. Şekil 5.46'da $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ MQW yapısının yüzeyinin $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 'lik bir alanında alınan AFM görüntüsü görülmektedir.



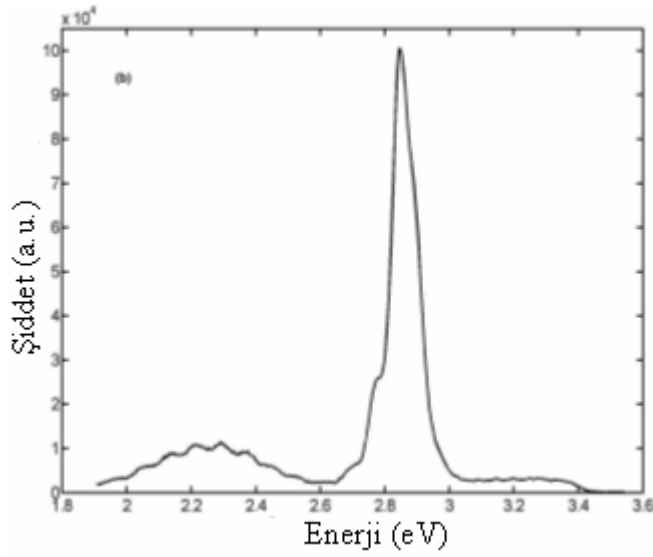
Şekil 5.46. a) İki boyutlu b) üç boyutlu GaN yüzeyinin AFM görüntüsü [70]

Numunenin GaN yüzeyinde rastgele olarak yönelmiş stepler, teraslar ve siyah noktalar olduğu gözlemlendi. Fakat nano borular ve GaN droplet'ler gözlemlenmedi. Atomik basamak-akış (step-flow) büyüme modu basamaklarda, paralel ve düz teraslarda hızlı atom difüzyonuna izin verir [72]. Şekilde görülen basamak ve teraslar tipik iki boyutlu basamak-akış büyüme modunun veya morfolojisinin olduğunu gösterir [73, 74]. Bu ise GaN tabakasının epitaksiyel büyütme şartlarıyla ilişkilidir. GaN üzerindeki basamak yükseklik farkı 0.25 nm olarak bulundu. Bu değer ise tek-tabakalı (002) GaN değerine yakındır [75]. GaN yüzeyinde siyah nokta olarak görülen birçok basamak ve teraslar şekildeki AFM görüntüsü üzerinde işaretlendi. Yüzey üzerindeki basamak-adım bitimlerinde siyah noktalar vida tipi kusurlardır. Kusur yoğunluğu kenar, adım ve teraslardaki siyah noktaların sayılarak, sayılan yüzey alanına bölünmesiyle elde edilir. GaN tabakasının kusur yoğunluğu $6 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ olarak bulundu. Bu değer ise literatürde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir [75, 76]. Yüzey pürüzlülüğü ise ortalama basamak-adım genişliği ve maksimum step genişliğine bağlıdır. Genellikle ortalama adım genişliği ~250 nm iken maksimum adım genişliği 400 nm'ye kadar çıkmaktadır. GaN tabakasının yüzey pürüzlülüğü (RMS) 0.57 nm olarak ölçüldü. Bu ise yüzeyin pürüzlülük açısından kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. GaN yüzeyi için hem AFM hemde x-ışını kırınımından elde edilen ölçüm sonuçları iyi bir şekilde birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

5.2.3. InGaN yapısının optik özelliklerinin incelenmesi

Bu kısımda LED yapısı olarak tasarlanan InGaN numunesinin optik özellikleri laboratuvarımızda bulunan fotoluminesans (PL) ve spektroskopik elipsometre(SE) sistemleri kullanılarak analiz edildi.

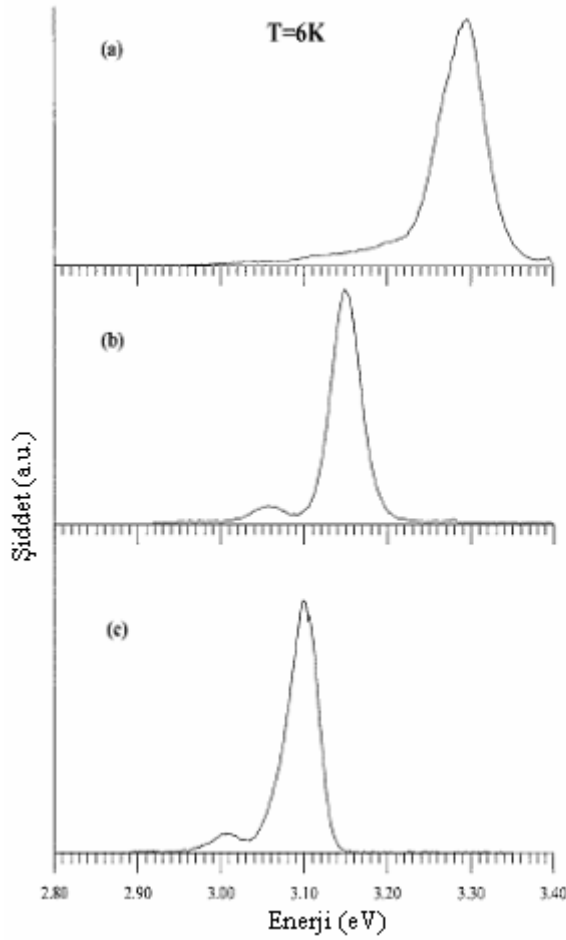
Numunenin oda sıcaklığında alınan PL spektrumu Şekil 5.47'de görülmektedir.



Şekil 5.47. LED yapısının fotolüminesans spektrumu [70]

Şekilden de görüleceği gibi, spektrumdaki ana pik 2.84 eV enerji değerine karşılık gelmektedir. Bu ise ana pikin mavi ışık bölgesinde olduğunu açıklar. İkinci pik ise daha zayıf ve geniş olarak 2.3 eV düzeyinde gözlemlendi. Bu pik sarı ışık bandında yer alır. Ana pikdeki omuz gürültüden kaynaklanmaktadır. Sarı bandın ortaya çıkması; bu çalışmanın dışında sistematik ve detaylı analizler gerektirir.

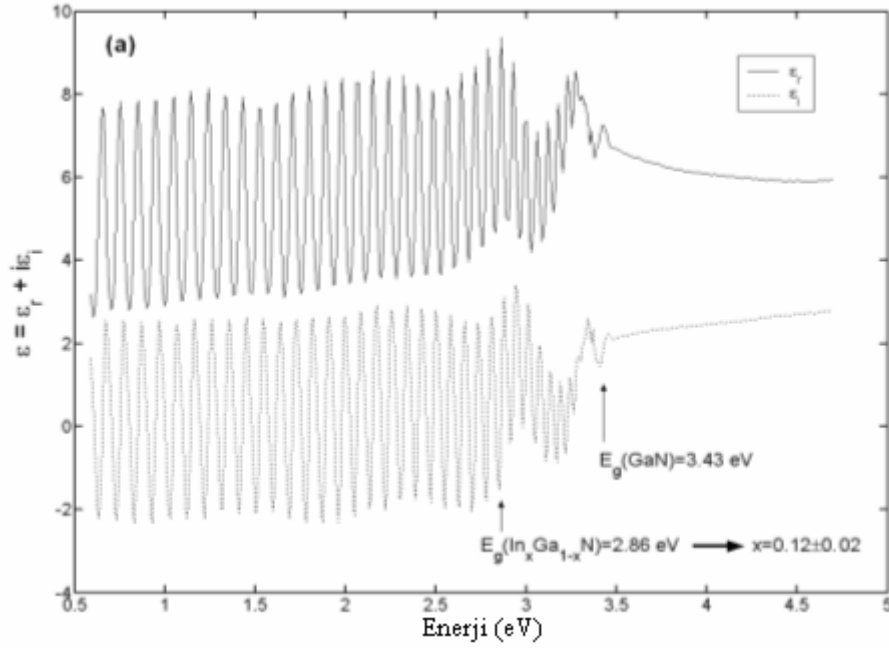
Literatürde yapılan benzer bir çalışmada fotolüminasans şiddeti-enerji değişimi kuyu yüksekliğine bağlı olarak Şekil 5.48’de verilmektedir [77]. Burada kuyu yükseklikleri sırasıyla 1,25 nm, 2,5 nm ve 5,0 nm’dir. Kuyu yüksekliği arttıkça enerji değeri azalmakta ve diğer zayıf pikler ise belirginleşmektedir. Aynı sıcaklıkta olmamasına rağmen Şekil 5.47 ve Şekil 5.48 karşılaştırıldığında her iki yapının uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.48. Aynı sıcaklıkta enerjinin kuyu yüksekliğine bağlı PL spektrumu

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ MQW yapısının Spektroskopik Elipsometri (SE) ölçümlerinden elde edilen Pseudo-dielektrik fonksiyonuyla ($\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$) GaN ve InGaN tabakalarının enerji aralıkları (E_g) belirlendi (Şekil 4.49). GaN tabakasında çoklu iletme ve yansımalar nedeniyle InGaN tabakasının optik aralığı (E_g) GaN'a göre daha düşük belirginliktedir. Diğer bir ifade, keskin absorpsiyon rezonans davranış Fabry-Perot girişim saçaklarıyla yok olur. Şekil 5.49'deki saçaklar bize büyütülen tabakaların oluşumunun iyi olduğunu göstermektedir. SE ile yapılan ölçümün analizi sonucunda (Şekil 5.49) InGaN enerji aralığı 2.86 eV ve In katkı oranı ise b eğrilme parametresinin 3.8 eV ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $x=0.1$) [78] olarak alınması sonucu % 12 dir olarak bulunmuştur. Hem x-ışını kırınımı (%9.6) ve hem de SE'den elde edilen x değerleri veya diğer bir ifadeyle In katkı oranı değeri, her iki sistemin hata sınırları içinde, birbirlerine yakın olarak bulunmuştur. PL ve SE deki enerji değerleri ise

birbirine çok yakındır. Bütün bu sonuçlar bize yapının optik özelliklerinin beklenen değerlerde olduğu ve böylece bu malzemenin ışık veren diyot olarak cihaz yapımına uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.49. LED yapısının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ve GaN tabakalarının optik aralıklarının gösterimi [70]

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, VG80H model MBE makinesinde kuantum kuyulu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (QW) yapısı ve $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$ süper örgüsü (super lattice) büyütüldü. Ayrıca Bilkent Üniversitesinde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW LED yapısı MOCVD ile büyütüldü. $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$ süper örgüsü, tek kuantum kuyulu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW LED yapılarının yapısal özellikleri Bruker-AXS (D8 Discover) XRD cihazı incelendi. Bu numunelerin PL, SE ve AFM sistemleri ile yasak enerji aralıkları, konsantrasyon ve yüzey pürüzlülüğü belirlendi.

MBE’de büyütülen $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ süperörgü için yapılan XRD verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, büyütülen yapının kristal kalitesinin iyi olduğu, kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu, tabaka kalınlıkları ve Al yüzdesinin analiziyle büyütme hedeflerinin tutarlı gerçekleştirildiği tespit edildi. Bununla birlikte tek kuantum kuyulu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=20\rightarrow60$) numunesinin tek kristal büyümesinde problem olmamasına karşın cihaz geliştirmede kullanılabilecek kristal kalitesinde olmadığı belirlenmiştir.

MOCVD büyütülen ve çalışmamızın büyük bir kısmını oluşturan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ numunesinin x-ışını analizinde simetrik, asimetrik eğrileri ve ters uzay haritasından In katkı oranları, tabakaların kalınlıkları, tabakaların pürüzlülükleri ve asimetrik piklerinden de oluşması gereken hekzagonal yapı hakkında bilgiler elde edildi. Çizelge 5.4’de GaN’in simetrik piklerinin yarı genişlikleri ve teta açısı verildi. Şekil 5.12-Şekil 5.22’den büyütme yönündeki simetrik pikleri kesin olarak gözlenebildi. Piklerdeki bu kesinlik numunedeki tabakaların kaliteli olduğunu gösterir. Numunedeki tabakanın kalitesi bu yarı genişlik açısının çok çok küçük olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Çizelge 5.4’den de görüldüğü gibi FWHM (yarı genişlikler) değerleri oldukça küçüktür. Buda numunemizdeki tabakaların kaliteli olduğunu gösterir.

Genel olarak simetrik ya da asimetrik yaklaşıma göre pik yarı genişlikleri değişir. Alttaşı ve tampon tabakayı diğer tabakalara göre daha simetrik ayarlamalara sahip

olduğundan dolayı keskin piklere sonuç verir. Üsteki tabakalarda ise daha zayıf ve daha geniş pikler verir. Çoklu yapıların incelemesinde tampon tabakanın pikleri çok keskin olarak görülmesi gerekir. Aksi takdirde yapının kalitesiz olduğu söylenebilir. Bu da incelemede yeterli değildir. Yine alttaşın sahip olduğu yapının (101), (105), (121), (205) gibi diğer düzlemlerde gözlenmesi gerekir.

MOCVD ile büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MQW yapısı için farklı inceleme metotları (HR-XRD, PL, SE ve AFM) kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelendi. X-ışını kırınımı ölçümlerinden periyot kalınlığı, pürüzlülük ve aktif tabakanın In konsantrasyonu elde edildi. Bu değerler yapı tabakalarının normal değerleri ile iyi uyum sağlamaktadır. HR-XRD ölçümlerinden altıgen yapının zayıf dik zorlaması bulunmuştur. Buradan InGaN/GaN yapısında dik zorlama $2,367 \times 10^{-3}$ ve In bileşeni %9,60 bulunmuştur. MQW yapının ters uzay haritası yapının çok düzgün olduğunu göstermektedir. Bu sonuç ise diğer sonuçlarla uyum içersindedir. AFM ile elde edilen sonuçlardan, GaN yüzeyinin morfolojisi adım-büyümeyi tarif ettiği ve altıgen yapının kusur (dislokasyon) yoğunluğu 10^8 cm^{-2} mertebesinde olduğu belirlendi. Belirlenen kusur yoğunluğunun literatürle uyumlu olduğu gözlemlendi. SE ve PL ölçümlerinden ise InGaN malzemesinin yasak enerji aralığı, 2.84 eV olarak ölçüldü; bu değer literatürle uyum içersindedir. Bu analizler doğrultusunda, büyütülen numunenin cihaz yapımına uygun özellikte olduğu söylenebilir. Ayrıca yapılan bu çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıklı (HT) tampon tabaka üzerine HT Si-katkılı GaN tabakayla, safir üzerine MQW'in büyütülmesi yüksek kalitede InGaN MQW yapının üretilmesi için iyi bir tasarım olduğu görülmektedir. Analizleri yapılan InGaN numunesinin LED cihaz üretiminde kullanılabileceği belirlendiğinden, bu tür yapıların benzer metodlarla üretimi ülkemizin ihtiyacına yönelik olarak geliştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Cho A., "Film Deposition by molecular beam technique", *J. Vac. Sci. Tech.*, 8:31 (1971).
2. Foxon C. T., Cheng T. S., Novikov S. V. et al., "The growth and properties of group III nitrides", *Journal of Crystal Growth*, 150:892 (1995).
3. Morkoç H., Strite S., Gao G. B., Lin M. E., Sverdlov B., Burns M., "Large band-gap SiC, III-V nitride and II-VI ZnSe based semiconductor device Technologies", *Journal of Applied Physics*, 76 (3):1363-1398 (1994).
4. Nakamura S., Mukai T., Senoh M., "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-hetero structure blue-light-emitting diodes", *Applied Physics Lett.*, 64:1687 (1994).
5. Akasaki I., Detchprohm T. And Hiramatsu K., "Observation of resonant Raman lines during the photoluminescence", *Applied Physics Lett.*, 68:1265 (1996).
6. Strite S. and Markoç H., "GaN, AlN, and InN: A review", *J.Vac. Sci. Technol. B*, 10 (4):1237-1266 (1992).
7. Bantien F. And Weber J., "Manganese luminescence in AlGaAs-alloys and AlGaAs/GaAs quantum wells", *Solid State Communications*, 61 (7):423-426 (1987).
8. Schuppen A., Gruhle A., Kibbel H., Erben U., Koing U., *Electron. Lett.*, 30:1187 (1994).
9. Fukatsu S., Yoshida H., Fujiwara A., Takahashi Y., Shiraki Y., Ito R., "Spectral blue shift of photoluminescence in strained layer $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ quantum well structures grown by gas source Si MBE", *Applied Physics Lett.*, 61:804 (1992).
10. Borroff R., Merlin R., Chin H. And Bhattacharya P. K., "Raman scattering by optical phonons in $\text{In}_{1-y}\text{Al}_y\text{Ga}_z\text{As}$ lattice matched to InP" *Applied Physics Lett.*, 53 (17):1652 (1988).
11. Siegle H., Eckey L., Hoffmann A., Thomsen C., Meyer B. K., Schikora D., Hankeln M. and Lischka K., "Quantitative determination of hexagonal minority phase in cubic GaN using Raman spectroscopy", *Solid State Comm.*, 96:943-949 (1995).

12. Rosa F. Reyna, Antonio M. And Juan C. Maroto; “Determination of the origin of the series resistance through electroluminescence measurements of GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ solar cells and leds”, *Solid-State Electronics*, 42 (4):567-571 (1998).
13. Arakawa Y., Sakaki H., “Structural and optical properties”, *Applied Physics Lett.*, 40:932 (1982).
14. Mirin P. P., Ibbetson J. P., Nishi K., Gossard A. C., Bowers J. E., *Applied Physics Lett.*, 67:3795 (1995).
15. Bloch J., Shah J., Hobson W. S., Lopata J., Chu S. N. G., “Optical properties of mutiple layers of self-organized InAs quantum dots emitting at 1,3 μm ” *Applied Physics Lett.*, 75:2199 (1999).
16. Huffaker D. L., Deppe D. G., “Nonlinear optical and electro-optic properties of InAs/GaAs self-organized quantum dots”, *Applied Physics Lett.*, 63:3202 (1993).
17. Leonard D., Krishanmurity M., Reavers C. M., Denbaars S. P. and Petroff P. M., “Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces”, *Applied Physics Lett.*, 63 (23):3203 (1993).
18. Lambert R. W., Ayling T., Hendry A. F. et al., “Facet-passivation processes for the improvement of Al-containing semiconductor laser diodes” *J. Lightwave Techn.*, 2:956-961 (2006).
19. Pommies M., Avella M., Canovas E. et al., “Cation intermixing at quantum well/barriers interfaces in aged AlGaAs-based high-power laser diodes bars”, *Appl. Physic. Lett.*, 86 (13):Art. No. 131103 (2005).
20. İnternet:Beşikçi C., “Yeni Yarıiletken Teknolojileri”, Orta Doğu Tek. Üniv., http://www.afcea.org.tr/afceatr/makaleler/Yeni_Yiletken_Teknolojileri1298.pdf, (2006).
21. İnternet:Materials Science/Electrical Engineering “III-V Semiconductor Alloys”, Stanford Univ., <http://www.lucianp.stanford.edu/~hyuen/papers/qualtalk.pdf>, (2006).
22. Dridi Z., Bouhafs B., Ruterana P., “First principle investigation of latice constans and bowing parameters in wurtzite $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ”, *Semiconductor Science and Technology*, 18:850-856 (2003).

23. Bechstedt F., Furthmüller J., Ferhat M., Teles L. K., Scolfaro M. R., Leite J. R., Davydov V. Y., Ambacher O., Goldhahn R., “Energy gap and optical properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ”, *Phys. Sol. (a)*, 195 (3):628-633 (2003).
24. Morkoç H., “Nitride Semiconductors and Devices”, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg New York, 8-44, (1999).
25. Yeo Y. C., Chong T. C., Li M. F., “Electronic band structures and effective mass parameters of wurtzite GaN and InN”, *Journal of Applied Physics*, 83 (3):1429-1436 (1998).
26. Ridley B. K., “Quantum processes in semiconductors”, *Clarendon Pres. Oxford*, New York, 94 (1982).
27. Morkoç H., “Nitride Semiconductors and Devices”, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg New York, 45-82 (1999).
28. Rode D. L., “Electron mobility in direct-gap polar semiconductors”, *Physical Review B*, 2(4):1012-1024 (1970).
29. Tansley T. L., Egan R. J., “Defects, optical absorption and electron mobility in indium and gallium nitrides”, *Physica B*, 190-198 (1993).
30. Chin V. W. L., Tansley T. L., Osotchan T., “Electron mobilities in gallium, indium and aluminum nitrides”, *Journal of Applied Physics*, 75 (11):7365-7372 (1994).
31. Ambacher O., Smart J., Shealy J. R., Welmann N. G., Murphy M., Scharff W. J., Eastman L. F., Dimitrov R., Wittmer L., Stutzmann M., Rieger W., Hilsenbeck J., “Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga- face AlGaIn/GaN heterostructures”, *Journal of Applied Physics*, 85 (6):3222-3233 (1999).
32. Bloom S., “Band structures of GaN and AlN”, *J. Chem. Solids*, 32:2027-2032 (1971).
33. Albrecht J. D., Wang R. P., Ruden P. P., Farahmand M., Brennan K. F., “Electron transport characteristics of GaN for high-temperature device modeling”, *Journal of Applied Physics*, 83 (9):4777-4781 (1998).
34. O’Leary S. K., Foutz B. E., Shur M. S., Bhapkar U. V., Eastman L. F., “Electron transport in wurtzite indium nitride”, *Journal of Applied Physics*, 83 (2):826-829 (1998).

35. Nanishi Y., Saito Y., Yamaguchi T., “Molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related Alloys”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 42(5A):2549-2559 (2003).
36. Mohammad S. N., Salvador A., Morkoç H., “Emerging gallium nitride based devices”, *Proc. IEEE*, 83:1306-1355 (1995).
37. Tansley T. L., Foley C. P., “Optical band gap of indium nitride”, *Journal of Applied Physics*, 59(9):3241-3244 (1986).
38. Davydov V. Y., Klochikhin A. A., Emtsev V. V., Bechstedt F., Mudryi A. V., Haller E. E., Reply to “comment on band gap of InN and In-Rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Alloys ($0.36 < x < 1$)”, *Physica Status Solidi (b)*, 233 (3):R10-R11 (2002).
39. Wu J., Walukewicz W., “Band gaps of InN and group III-nitride alloys”, *Superlattices and Microstructures*, 34:63-75 (2003).
40. Mkhoyan K. A., Silcox J., Alldredge E. S., Ashcroft N. W., Lu H., Schaff W. J., Eastman L. F., “Measuring electronic structure of wurtzite InN using electron loss spectroscopy”, *Applied Physics Letters*, 82 (9):1407-1409 (2003).
41. Nakamura S., “The Roles Of Structural Imperfections In InGaN-Based Blue Light-Emitting Diodes And Laser Diodes Control And Use Of Defects In”, *Materials Science*, 281(5379):956-962 (1998).
42. Nakamura S., InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes, *Journal of Crystal Growth*, 201/202:290-295 (1999).
43. Nakamura S., “Current status and future prospects of InGaN-based laser diodes”, *JSAP International*, 1:5 (2000).
44. Bayliss S. C., Demeester P., Fletcher I., Maretin R. W., Middleton P. G., Moerman I., O'Donnell K. P., Sapelkin A., Trager-Cowan C., Van Der stricht W., Young C., “The optical and structure properties of InGaN epilayers with very high indium content”, *Materials Science and Engineering*, B59:292-297 (1999).
45. Hanser A. D., Banks A. D., Davis R. F., Jahnen B., Albrecht M., Dorsch W., Christiansen S., Strunk H. P., “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 (2000).
46. Hirayama H., Kinoshita A., Aoyagi Y., “Growth and optical properties of III-nitride semiconductors for deep UV (230-350 nm) light-emitting diodes (LEDs)

- and laser diodes (LDs)", *RIKEN Review:Focused on Coherent Science*, 33:28-31 (2001).
47. Keller S., Keller B. P., Kapolnek D., Abare A. C., Mosui H., Coldren L. A., Mishra U. K., Den Baars S. P., "Growth and characterization of bulk InGaN films and quantum wells", *Applied Physics Letters*, 68 (22):3147-3149 (1996).
 48. Yamaguchi E., Junnarkar M. R., "Effects of nitrogen vacancy on optical properties of nitride semiconductors", *Journal of Crystal Growth*, 189/190:570-574 (1998).
 49. Van de Walle C. G., McCluskey M. D., Master C. P., Romano L. T., Johnson N. M., "Large and composition-dependent band bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys", *Materials Science and Engineering*, B59:274-278 (1999).
 50. Goano M., Bellotti E., Ghillino E., Garetto C., Ghione G., Brennan K. F., "Band structure nonlocal pseudopotential calculation of the III-Nitride wurtzite phase materials system. Part II. Ternary alloys $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ ", *Journal of Applied Physics*, 88 (11):6476-6482 (2000).
 51. O'Donnell K. P., Mosselmans J. F. W., Martin R. W., Pereira S., White M. E., "Structural analysis of InGaN epilayers", *Journal of Physics:Condens. Matter.*, 13:6977-6991 (2001).
 52. Chiu S-Y, Anwar A. F. M., Wu S., "Base transit time in abrupt GaN/InGaN/GaN HBT's", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 47 (4):662-666 (2000).
 53. Weyers M., Bhattacharya A., Bugge F., Knauer A., "Epitaxy of High power diode laser Structures, High-Power diode lasers", *Topics in Applied Physics*, 78:83 (2000).
 54. Wikipedia F., "Extensive site on the physical properties of aluminium gallium arsenide", *Journal of Crystal Growth*, 10:1016 (2004).
 55. M.A. Herman, H. Sitter; "Molecular Beam Epitaxy", *Springer Series in Materials Science*, 7:223 (1996).
 56. Hepburn C. J., Ph.D. Thesis, "Temperature Dependent Operation of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs)", *University of Essex*, (2001).
 57. Cho A., Arthur J., "Molecular Beam Epitaxy," *Prog. Solid-State Chem.*, 10:157-192 (1975).

58. Internet: Cho A., Arthur J. “Molecular Beam Epitaxy”
http://minerva.union.edu/malekis/ESC24/KoskywebModules/sa_mole.htm.
59. Internet: Amir Karim “1 General Introduction”
[www.ifm.liu.se/semiphys/people/Amir_Karim/Thesis\(amir\).pdf](http://www.ifm.liu.se/semiphys/people/Amir_Karim/Thesis(amir).pdf).
60. Internet: “An Introduction to MBE Growth”
http://www.ece.utexas.edu/projects/ece/mrc/groups/street_mbe/mbechapter.html.
61. Fornari R., Sorba L., “Molecular Beam Epitaxy: Principles And Applications”
Crystal growth of materials for energy production and energy-saving applications, 66-73 (2001).
62. Sadao A., “GaAs, AlAs, and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Material parameters for use in research and device applications”, *Journal of Applied Physics*, 58 (3):R1-R29 (1985).
63. A. van der Ziel, “Solid State Physical Electronics”, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, (1976).
64. Köksal F., Altunbaş M., Dinçer M. ve Başaran E. Çeviri:”Katıhal Fiziği”, *Literatür Yayıncılık*, (1999).
65. Hook J. R., Hall H. E., “Katıhal Fiziği”, Çeviri: *Literatür Yayıncılık*, İzmir, 122-124 (1999).
66. Internet: Richard J. Wagner, “Molecular Beam Epitaxy A Simple Introduction”
<http://www-personal.umich.edu/~wagnerr/IntroMBE.pdf>, (1999).
67. Zhang P., “High resolution x-ray diffraction”, *MSE-242 Lab-1*, 1-6, (2003).
68. Huang F., “X-ray Reflectivity Studies of Thin Film”, Ph.D., *Center for Materials for Information Technology The University of Alabama*, 1-2 (2005).
69. Korcak S., Öztürk M. K., Çörekçi S., Akaoğlu B., Yu H., Çakmak M., Sağlam S., Özçelik S., Özbay E., “Structural and Optical Properties of an $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Nanostructure”, *EcoSS 24*, (2006).
70. Korcak S., Öztürk M. K., Özçelik S., “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ yapısının yüksek çözünürlükte yapısal analizi”, *12. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2005).
71. Korcak S., H Gümüş., Öztürk M.K., Altuntaş H., Kılıç A.İ., Bengi A., Mamadov T.S., Özçelik S., “ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Kuantum Kuyu Yapısının Büyütülmesi ve X-ışınları Difraksiyonu Ölçümleri”, *XI. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2004).

72. Stephenson G. B., Eastman J. A., Thompson C., Auciello O., Thompson L. J., Munkholm A., Fini P., DenBaars S. P. And Speck J. S., *Applied Physics Letters*, 74:3326 (1999).
73. Jimenez A., Bougrioua Z., Tirado J. M., Brana A., Calleja F., Munoz E. E. And Moerman I., *Applied Physics Letters*, 82:4827 (2003).
74. Torabi A., Ericson P., Yarranton E. J. And Hooke W. E., *J. Vac. Sci. Tech B.*, 20 (3):1234 (2002).
75. Bai J., Wang T., Comming P., Parbrook P. J., David R. And Cullis A. G., *Journal of Applied Physics*, 99:023513 (2006).
76. Aggerstam T., Lourdudoss S., Radamson H. H., Sjödin M., Lorenzini P., Look D. C., “Investigation of the interface properties of MOVPE grown AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor (HEMT) structures on sapphire” *Thin Solid Films*, 515 (2):705 (2006).
77. Davidson J. A., Dawson P., Wang T., Sugahara T., Orton J. W. and Sakai S., “Photoluminescence studies of InGa_N/Ga_N multi-quantum wells”, *Semicond. Sci. Technol.*, 15:497-505 (2000).
78. Van de Walle C. G., McCluskey M. D., Master C. P., Romano L. T., Johnson N. M., “Effect of composition on the band gap of strained In_xGa_{1-x}N alloys”, *Mater. Sci. Eng.*, B59:274 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı :Sabit KORCAK
Uyruğu :T.C
Doğum Tarihi ve Yeri :10.02.1968-Bahçe
Medeni Hali :Evli
Telefon :05368121644
e-mail :skorcak@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	DPÜ Fen Bilimler Ens.	1996
Lisans	Anadolu Üniversitesi	1991
Lise	Mersin Teknik Lisesi	1986

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1993-2001	Dumlupınar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. S. Korcak, H. Gümüş, M.K. Öztürk, H. Altuntaş, A.İ. Kılıç, A. Bengi, T.S. Mamadov, S. Özçelik., $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ Kuantum Kuyu Yapısının Büyütülmesi ve X-ışınları Difraksiyonu Ölçümleri, *XI. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı*, 3 Aralık 2004, Gazi Üniversitesi, Ankara.

2. Sabit KORCAK, M. Kemal ÖZTÜRK, Süleyman ÖZÇELİK, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ yapısının yüksek çözünürlükte yapısal analizi, **12. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı**, 18 Kasım 2005, Ankara Üniversitesi, Ankara.
3. Sabit KORCAK, M. Kemal ÖZTÜRK, Süleyman ÇÖREKÇİ, Barış AKAOĞLU, Hongbo YU, Mehmet ÇAKMAK, Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK, Ekmel ÖZBAY, Structural and Optical Properties of an $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Nanostructure, **EcoSS 24**, 4-8 September 2006 Paris.
4. Sabit KORCAK, M. Kemal ÖZTÜRK, Süleyman ÇÖREKÇİ, Barış AKAOĞLU, Hongbo YU, Mehmet ÇAKMAK, Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK, Ekmel ÖZBAY, Structural and Optical Properties of an $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Nanostructure, **Surface Science** (yayına kabul edildi).