

**$\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ SÜPERÖRGÜLERİNİN YAPISAL VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hüseyin TECİMER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2007
ANKARA**

Hüseyin TECİMER tarafından hazırlanan $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ SÜPERÖRGÜLERİNİN YAPISAL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Tez Yöneticisi

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

Başkan: : Prof. Dr. Ali GENCER

Üye : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Üye : Prof. Dr. Mehmet KASAP

Üye : Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV

Üye : Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAK

Tarih : 19/01/2007

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.

Hüseyin TECİMER

**$\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ SÜPERÖRGÜLERİNİN YAPISAL VE OPTİK
ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hüseyin TECİMER

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2007**

ÖZET

Bu tez çalışmasında Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) tekniği ile büyütülen iki farklı süperörgü $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ yarıiletken ince filmin yapısal ve optiksel özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını difraksiyon (HR-XRD) cihazı, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) kullanılarak incelendi. Alınan ölçümlerden numunelerin kalitesi ve yüzey morfolojisi belirlendi ve literatürle karşılaştırıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : AlGa_N, HEMT, MOCVD, XRD, AFM, PL
Sayfa Adedi : 60
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**EXAMINATION OF STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF
 $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ SUPERLATTICES**

(M.Sc. Thesis)

Hüseyin TECİMER

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2007

ABSTRACT

In this study, structural and optical properties of two different superlattice $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ semiconductor thin film growth by metal organic chemical vapour deposition (MOCVD) has been examined by using high resolution X-ray diffraction (HR-XRD), atomic force microscopy (AFM) and photoluminescence (PL). It has been determined that quality and surface morphology of the samples from obtained measurements and compared with literature.

Science Code : 202.1.147
Key Words : AlGa_N, HEMT, MOCVD, XRD, AFM, PL
Page Number : 60
Adviser : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her safhasında engin bilgileriyle beni yönlendiren, Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi'ne bağlı STARLAB laboratuvar imkanlarından sınırsız faydalanmamızı sağlayan ve bu bağlamda bizlere pek çok şey kazandıran danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvarında yaptığım deneyler boyunca bana yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Tofig MAMMADOV, Sayın Doç. Dr. Selim ACAR, Sayın Öğr. Gör. Dr. Barış AKAOĞLU ve Sayın Arş. Gör. Dr. Mustafa ÖZTÜRK ve Sayın Süleyman ÇÖREKÇİ'ye teşekkür ederim.

Habibe USLU, Havva BOĞAZ ve Hatice KANBUR'a yardımlarından ötürü şükranlarımı sunarım.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan canım anneme, babama ve biricik kardeşlerime sonsuz minnettarım. Bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

Bu çalışma 2001K120590 nolu proje kapsamında Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. İki Boyutlu Sistemler.....	5
2.1.1. Çoklu yapılar.....	5
2.1.2. Kuantum kuyuları	6
2.1.3. Kuantum kuyuları ve süperörgüler	7
2.1.4. Çoklu kuantum kuyular (MQW) ve süperörgüler.....	9
2.2. Yapısal Özellikler ve Materyal Parametreleri	10
2.2.1. Kristal yapı.....	10
2.2.2. AlGa _N alaşımının özellikleri	13
2.2.3. GaN yapının özellikleri.....	19
2.2.4. AlN Materyal Sistemi	20
2.3. AlGa _N Alaşımının Bazı Uygulama Alanları.....	21

Sayfa

2.3.1. Yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT) yapı.....	21
2.3.2. Fotodiyot yapı.....	21
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	23
3.1. Giriş.....	23
3.2. Epitaksiyel Büyütme Teknikleri.....	23
3.2.1. Moleküler demet epitaksi (MBE-Molecular Beam Epitaxy).....	23
3.2.2. Metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD-Metal Organic Chemical Vapour Deposition).....	25
3.3. Karakterizasyon Teknikleri	26
3.3.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD).....	26
3.3.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM).....	30
3.3.3. Fotoluminesans (PL).....	32
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR	35
4.1. Giriş.....	35
4.2. Materyal Büyütme Süreçleri	35
4.2.1. Çoklu yapı–1 numunesinin büyütme süreci.....	35
4.2.2. Çoklu yapı–2 numunesinin büyütme süreci.....	36
4.3. Karakterizasyon Deneyleri	37
4.3.1. Çoklu yapı–1 numunesinin karakterizasyonu.....	37
4.3.2. Çoklu yapı–2 numunesinin karakterizasyonu.....	45
5. SONUÇ	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	60

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Çoklu yapı-1 numunesinin w-2θ eğrisinin fit edilmesi ile elde edilen yapısal parametreler.....	40
Çizelge 4.2. Çoklu yapı-1 numunesinin (0002) yönelimli $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$ yüzeyinden yüksek çözünürlüklü XRD taramasında elde edilen döndürme eğrilerinin kalite özellikleri	41
Çizelge 4.3. Çoklu yapı-2 numunesinin w-2θ eğrisinin fit edilmesi ile elde edilen yapısal parametreler.....	49
Çizelge 4.4. Çoklu yapı-2 numunesinin (0002) yönelimli GaN yüzeylerinden yüksek çözünürlüklü XRD taramasında elde edilen döndürme eğrilerinin kalite özellikleri	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Keskin ve (b) geniş heteroeklemlerin iletim bant kenarının potansiyel profili	6
Şekil 2.2. Çoklu bir yapıda oluşan kuyu sistemi.....	6
Şekil 2.3. Örnek bir heteroeklem yapının bant diyagramı	7
Şekil 2.4. Periyodik bir kuantum kuyusu sisteminin (süperörgü) bant diyagramı.....	8
Şekil 2.5. MQW (üstte) ve süperörgü (altta) yapılarının şematik iletim bantı profili ve minibantlar.....	10
Şekil 2.6. Wurtzite yapıda birim hücre	11
Şekil 2.7. GaN wurtzite HCP kristal yapısı	12
Şekil 2.8. HCP yapının istif düzeni.....	12
Şekil 2.9. Zincblend yapıda birim hücre	13
Şekil 2.10. Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları [14]	14
Şekil 2.11. Wurtzite GaN'ün enerji bant diyagramı	15
Şekil 2.12. Fotodiyotun şematik gösterimi	22
Şekil 3.1. Tipik bir MBE sistem şematiği.....	24
Şekil 3.2. Tipik bir MOCVD sisteminin reaktör ve gaz akış şematiği	25
Şekil 3.3. Örnek bir kristalin yöneliminde süperörgü piklerinin XRD grafiği	27
Şekil 3.4. XRD saçılma geometrisi.....	27
Şekil 3.5. AFM'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi [36].....	31
Şekil 3.6. Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek.....	33
Şekil 3.7. Fotoluminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematiği	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ çoklu yapı-1 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri	36
Şekil 4.2. $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N} / \text{Al}_2\text{O}_3$ çoklu yapı-2 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri	37
Şekil 4.3. Çoklu yapı-1 numunesinin 2θ grafiği	38
Şekil 4.4. Çoklu yapı-1 numunesinin AlGaN (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması	38
Şekil 4.5. Çoklu yapı-1 numunesinin ω - 2θ taraması. Noktalar deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir.....	39
Şekil 4.6. Çoklu yapı-1 numunesinin a) $4 \mu\text{m}^2$ b) $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri.....	42
Şekil 4.7. Çoklu yapı-1 numunesinin $4 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri. a) Yanal step büyüklüğü ~ 105 nm, b) Step yükseklik farkı $\sim 0,22$ nm'dir	42
Şekil 4.8. Çoklu yapı-1 numunesinin fotoluminesans (300K) spektrumu	44
Şekil 4.9. Çoklu yapı-2 numunesinin 2θ grafiği	46
Şekil 4.10. Çoklu yapı-2 numunesinin GaN (0002) yöneliminin döndürme (rocking) taraması	46
Şekil 4.11. Çoklu yapı-2 numunesinin AlGaN ve AlN ($10 \bar{1} 2$) yöneliminin döndürme (rocking) taraması.....	47
Şekil 4.12. Çoklu yapı-2 numunesinin ω - 2θ taraması. Noktalar deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir	48
Şekil 4.13. Çoklu yapı-2 numunesinin GaN tabakasının a) $4 \mu\text{m}^2$ b) $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri.....	51
Şekil 4.14. Çoklu yapı-2 numunesinin $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri a) Yanal step büyüklüğü ~ 67 nm, b) Çukur derinliği $\sim 29,2$ nm'dir	51
Şekil 4.15. Çoklu yapı-2 numunesinin fotoluminesans (300K) spektrumu	52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. HR-XRD ölçümlerinde kullandığımız Bruker-AXS D8 Discover XRD cihazının görünüşü.....	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
E_g	Yasak enerji aralığı
θ_B	Bragg açısı
a	Kuantum kuyusu genişliği
a, b, c	Örgü sabitleri
h, k, l	Miller indisleri
n	Kırılma indisi
h	Planck sabiti
$\hbar$	$h/2\pi$
k	Boltzmann sabiti
E_A	Akseptör enerjisi
E_D	Donor enerjisi
E_c	İletim bandı enerjisi
E_v	Valans bandı enerjisi
T	Sıcaklık
κ	Termal iletkenlik
ϵ	Dielektrik katsayısı
N	Etkin durum yoğunluğu
e	Elektronun yükü
Ψ	Dalga fonksiyonu
m^*	Elektronun etkin kütlesi
m_p	Deşik etkin kütlesi
ω	Açısal frekans, spektral radyan salınma
b	Bowing parametresi, bariyer tabakası genişliği
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar**Açıklama****HR-XRD**

Yüksek Çözünürlüklü X Işınları Difraksiyonu

AFM

Atomik Kuvvet Mikroskobu

PL

Fotoluminesans

MBE

Moleküler Demet Epitaksi

MOCVD

Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi

MOVPE

Metalorganik Buhar Faz Epitaksi

UV

Ultraviolet

LEEBI

Düşük Elektron Enerjili Demet Işınlaması

LED

Işık Yayan Diyot

MQW

Çoklu Kuantum Kuyusu (Multi Quantum Well)

HCP

Hekzagonal Sıkı Paket

TMG

Trimethylgallium

TMA

Trimethylaluminum

HEMT

Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (High Electron Mobility Transistor)

1. GİRİŞ

III-Nitrür sistemler (InN, GaN ve AlN) geniş bant aralıklı yarıiletkenler olarak bilinir. Bu gruptaki yarıiletkenler 1,9–6,2 eV aralığında direkt bant aralığına sahip olduğundan önemli materyal sistemlerdir [1].

Nitrürlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine kayda değer çalışmalar (yüzey akustik dalga aygıtları, mavi lazerler ve ışık yayan diyotlar (LED) üretmek için) AT&T Bell laboratuvarları, IBM Thomas J. Watson araştırma merkezi ve RCA gibi merkezlerde uygun araştırma teknikleri kullanılarak 30 yıl öncesinde yapıldı. Ancak bu çalışmaların çoğu çeşitli temel teknolojik problemlerin çözümlerinin yetersiz olması nedeniyle başarılı olamadı. Çünkü GaN alttaş üretmek için yeterli bulk-kristal teknolojisi mevcut değildi. Büyütme Si, GaAs, Al₂O₃ gibi çok iyi kristal örgülü ve yüksek termal genleşmeye sahip alttaşlar üzerine yapıliyordu. Sonuçta üretilen çoklu epitaksiyel filmler oldukça yüksek bir ($\sim 10^{10}$ dislokasyon/cm²) kusur oranına sahipti. Bu kusur ve kirliliklerin bir sonucu olarak da aygıtların iletkenliği kontrol edilemiyordu. Uygun büyütme şartlarının olmaması nedeniyle filmler kötü bir yüzey morfolojisine sahipti. Bununla birlikte çiftleşmiş p-tipi kirliliklerin oluşturduğu derin iyonizasyon seviyeleri nedeniyle p tipi materyal büyütülmesi ve bipolar, injection tipi cihazların gelişimi yetersiz kaldı. Tüm bu problemlere rağmen metal/yalıtkan/yarıiletken LED'lerin üretimi başarıldı ve bu materyal sistemlerinin potansiyelleri ortaya çıkarıldı [2].

1980 ortalarına kadar üstesinden gelinemeyen bu problemlerin büyük bir kısmı Nagoya ve Meijo Üniversitelerindeki Isamu Akasaki ve Nichia Chemical Company'daki Shuji Nakamura tarafından yönetilen grubun çalışmalarıyla başarıldı. Düşük sıcaklıklı AlN ve sonraları yüksek kaliteli GaN filmlerin safir alttaş üzerine büyütülmesi ve bu ince yapıların kullanılması metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) sistemi ile gerçekleşti [3,4]. Bununla eş zamanlı olarak elektrik ve optik özelliklere ait kayda değer gelişmeler ortaya kondu. Diğer bir muazzam buluş düşük elektron enerjili demet ışınlaması (LEEPI) kullanılarak ilk defa bir p tipi GaN üretilmesidir [5]. Sonuç olarak ilk p-n eklem temelli GaN aygıt geliştirildi. Ardından

yaklaşık 600°C’de N₂ ile tavlanoarak magnezyum katkılı GaN’ün iletken hale geldiğı gösterildi [6].

Geniş bant aralığına sahip III-Nitrür yarıiletkenler (AlN, GaN, InN ve diğ er üçlü kompozisyonlar), optoelektronik cihaz uygulamaları (yayıcı, dedektör) ve yüksek güç/sıcaklık şartları altında çalışan elektronik cihazlar için ümit vericidir [7].

Geniş bant aralıklı yarıiletkenlerin kullanımı cihaz uygulamalarının yıpranma etkilerini azaltması açısından önemlidir. Ayrıca bu yarıiletkenler kimyasal ve termal olarak daha kararlılırlar ve zor uygulama şartları (yüksek güç ve yüksek sıcaklık) için bir avantajdır. Geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler; elmas, SiC, III-Nitrürler ve II-IV grup materyalleridir. III-Nitrürler diğ er geniş bant aralıklı yarıiletkenlere göre bazı önemli avantajlara sahiptir:

- Direkt bant aralığına sahip olmalarından dolayı yüksek soğurma sabitleri ve daha keskin kesilim dalga boyu,
- Üçlü alaşımların mol kesrinin değ iş tirilmesi ile dalga boyu kesilmesinin ayarlanabilmesi,
- Geniş bant aralığı mühendisliği ile çoklu eklem cihazların kapasitesi,
- Al_xGa_{1-x}N üçlü alaşımlarda $x \geq 0,38$ için doğ al güneş körlüğü.

Bütün bu avantajları ile III-Nitrür yapılar mavi ve ultraviole t (UV) spektrum bölgelerinde optoelektronik cihazların fabrikasyonu için en uygun materyallerdir [8,9].

Günümüzde moleküler demet epitaksi (MBE), metal organik buhar fazı epitaksi (MOVPE) ve MOCVD gibi modern kristal büyütme teknikleri ile yüksek kalitede III-Nitrür epitaksiyel tabakalar büyüte bilmek mümkündür [8].

Yüksek kalitedeki III-Nitrür sistemlerin epitaksiyel büyütmesinde safirin (Al₂O₃) alttaş olarak seçiminde düşük maliyeti, geniş kullanılabilirliği, görünür ve UV spektrum bölgelerinde optiksel saydamlığı ve sıcaklıklardaki kararlılığı etkili

olmaktadır. Fakat safir alttaş, zayıf termal iletkenliğe sahiptir ve bu durum cihazların performansını sınırlar. Ayrıca safir alttaş üzerine onunla büyük örgü uyumsuzluğuna sahip GaN epitaksiyel filmlerin büyütölmesi yüksek dislokasyon yoğunluklarıyla ($10^{10}/\text{cm}^2$) sonuçlanır [10]. Bununla birlikte Nitrürlerin büyütölmesinde kullanılan SiC, MgO, ZnO, GaP, InP veya TiO_2 gibi alttaşlar da son zamanlarda ticari olarak ulaşılabilir olmuşlardır. Bu gibi örgü uyumlu ve kaliteli alternatif alttaşlar olmasına rağmen daha farklı alternatifler araştırmalıdır [8].

III-Nitrür yarıiletkenler arasındaki mevcut olan her enerji bant aralığı (1,9–6,2 eV) üçlü alaşımların geniş bir serisini oluşturur [8,11]. Böylece LED, lazer diyot ve UV fotodedektörler gibi optoelektronik cihazların üretilmesine imkan sağlamaktadır.

III-V Nitrür yapılar günümüzde birçok uygulama alanlarına sahiptir. Nitrür tabanlı yeşil ve mavi LED'ler etkili, parlak ve uzun ömürleriyle günümüzde hali hazırda ticari olarak mevcuttur. Ek olarak mavi LED'ler birleştirilmiş organik ve inorganik aygıtlar için kırmızı renge, beyaz ışık ve diğerlerine ulaşmak için pompalayıcı olarak görev yapar. Geleneksel ekranlara ek olarak bu LED'ler trafik lambalarında, hareketli sinyallerde, gösterge ışıklarında, far ışıklarında, hızlandırılmış fotosentez ve tıpta tedavi-teşhis konularında uygulama alanlarına sahiptir. Potansiyel olarak LED'lerin gelecekteki gelişimleri daha geniş enerji tutabilen lamba uygulamalarına doğru genişleyecektir ve bu LED'ler parlak ampullerden daha etkilidir [1].

Kısa dalga boylarındaki injeeksiyon lazer uygulamaları yıllardır dijital veri okuma ve depolama uygulamaları için teşvik edilmiştir. Yarıiletken Nitrürler bu kısa dalga boylarına ulaşmak için gerekli bant genişliğine sahiptirler. Dijital Versatile Disk (DVD) olarak adlandırılan iki katmanlı yapı için mavi lazerler kullanıldığında depolama yoğunluğu bugün için 1 Gb'tan 40 Gb'a kadar ulaşılabilir bir kompakt diskin üretilbileceği tahmin ediliyor [1].

Yarıiletken nitrürler füze algılama, güneş astronomisi ve yangın sensör sistemleri gibi alanlarda birçok mevcut uygulamaya sahip UV fotodedektörler için en önemli adaylardır. Soğurma tabakasının bant genişliği 280 nm'nin altındaki dalga boyları

için hassas bir detektör gibi seçilirse çok düşük seviyedeki UV ışınlarını algılayabilir. Çünkü güneş beslemeli radyasyon gürültüleri düşüktür [1]. Son zamanlarda, önceden haber veren sistemlerde çok amaçlı sonuçlar için, AlGaIn/GaN ve GaN/GaN p-n eklem fotovoltaiik dedektörler çalışılmıştır. AlGaIn/GaN fotodiyotlar 364 nm’ de 0,12 A/watt cevap hızına sahip maksimum bir sıfır besleme sahiptir. 400 nm’deki rms gürültü akımı 1 pA’den daha azdır ve aynı zamanda cevap zamanı 9 ns kadar küçüktür [1].

AlGaIn, InGaIn ve InAlN üçlü bileşiklerinin gelecekte Nitrür tabanlı optik araçların temelini oluşturması umulmaktadır. Fakat bileşiklerin optoelektronik cihazlar için gerekli fiziksel özellikleri yeterince araştırılmamıştır. UV fotodedektörler ve LED’ler gibi optoelektronik uygulamalar için, AlGaIn’ün bant aralığının bileşim yüzdelereine bağıli değışim bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. İstenilen kalınlıkta çoklu epitaksiyel katmanları büyütebilmek için AlGaIn/InAlN çoklu yapı sistemlerinin örgü yapılarından faydalanmamız gerekebilir. AlGaIn bileşik sistemlerinin tüm serisi, düşük In mol kesirli InGaIn ve InAlN kadar iyi olmasına karşın temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi de bir o kadar önemlidir [8].

Bu tez çalışmasında Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde MOCVD tekniğı ile büyütilen iki farklı süperörgü $Al_{0,43}Ga_{0,57}N/Al_2O_3$ yarıiletken ince filmlerin yapısal ve optiksel özellikleri, Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümüne bağıli STARLAB Laboratuar’ında bulunan yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyon cihazı (HR-XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) sistemleri kullanılarak incelendi.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde çoklu yapılar, kuantum kuyu ve süperörgüler hakkında genel bir bilgi verildi. Ayrıca AlGaIn, GaN ve AlN yapılarının temel özellikleri açıklandı ve yapısal parametreleri ile bazı cihaz uygulamaları sunuldu. Üçüncü bölümünde popüler yarıiletken epitaksiyel ince film büyütmte teknikleri ve deneysel düzenekler açıklandı. Dördüncü bölümde deneylerin ölçüm ve analiz sonuçları literatürle karşılaştırmalı olarak sunuldu. Beşinci bölümde ise yapılan bu çalışmalarla ilgili bir değıerlendirme yapıldı.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde çoklu yapılar, kuantum kuyuları ve süperörgü yapıların temel özellikleri sunuldu. Ayrıca III-Nitrür yapıların kristal yapısı ve AlGaN, AlN ve GaN yarıiletkenlerinin özellikleri ve temel parametreleri ile bazı cihaz uygulamaları verildi.

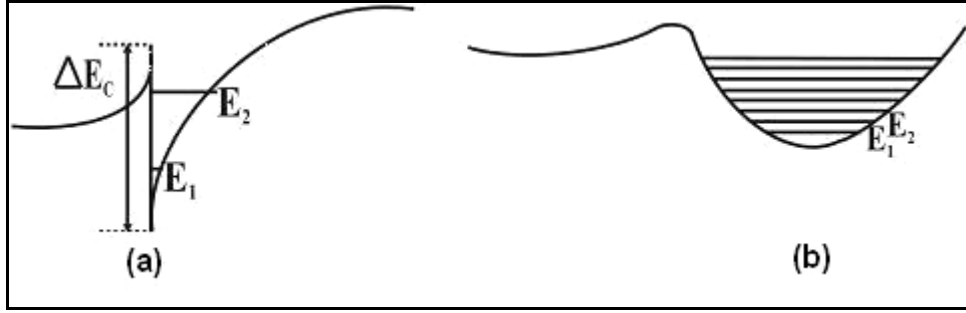
2.1. İki Boyutlu Sistemler

2.1.1. Çoklu yapılar

Çoklu bir yapı benzer yapıdaki materyallerin birbirine ideal bir şekilde birleşimi ile oluşur. Bunun için bileşimde kullanılan materyallerin benzer kristal ve örgü yapıda olması gerekir. Bu özelliklerin ihlali durumunda ara yüzeylerde kaliteyi düşüren ve kuantum boyut etkilerinin gözlenmesini azaltan yüksek yoğunlukta kusurlar oluşur.

Günümüzde kaliteli epitaksiyel çoklu yapıların üretimi için kullanılan en popüler teknik MBE büyüme tekniğidir. MBE’de ultra yüksek vakum şartları altındaki ($\sim 10^{-11}$ mbar) bir numune üzerine, ayrı kaynaklardan, istenen elementlerin (Ga, Al, N gibi) moleküler ışın demetleri gönderilir. Kristalin özellikleri, bu sistemde büyüme sırasında kontrol edilebilir.

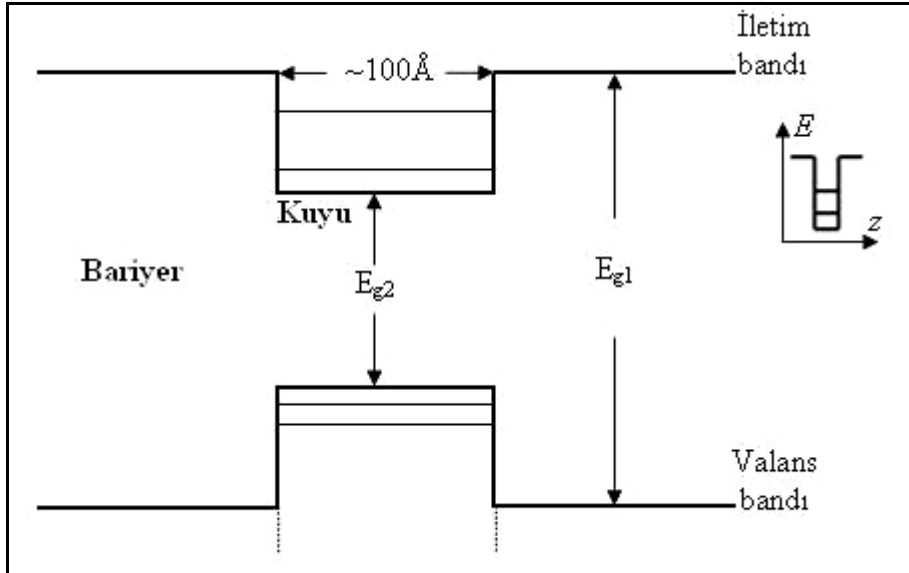
Birkaç monolayer kalınlıkta tabakalara sahip yarıiletkenler ile keskin heteroeklemler büyütülebilir. Geniş eklemler vasıtasıyla oluşturulan potansiyel kuyuları daha yayvan yapıdadır. Bu yapılarda, enerji seviyeleri arasındaki mesafeler dardır ve kuantum boyut etkilerinin gözlenmesi daha zordur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. (a) Keskin ve (b) geniş heteroeklemlerin iletim bant kenarının potansiyel profili

2.1.2. Kuantum kuyuları

Bariyer ve kuyu materyallerin bileşen bağımlılığının tam bir bilgisi genellikle kuantum kuyuları ya da süperörgü çoklu yapıları analiz etmeyi gerektirir. Nitrür sistemlerde opsiyonların fazlalığı böyle sistemleri yapılandırmak için kullanışlıdır. Bu yapılarda bariyerler AlGa_N ya da GaN ile biçimlendirilebilir. Bariyer bu materyallere bağlı iken kuyular GaN ya da InGa_N tabakaları ile yapılandırılır [1].



Şekil 2.2. Çoklu bir yapıda oluşan kuyu sistemi

Bir kuantum kuyu yapısı, dar bant aralıklı ultra ince tabakanın, geniş bant aralıklı tabakalar arasına sandviçlenerek yapılandırıldığı çoklu yapılardır. Geniş bant aralıklı

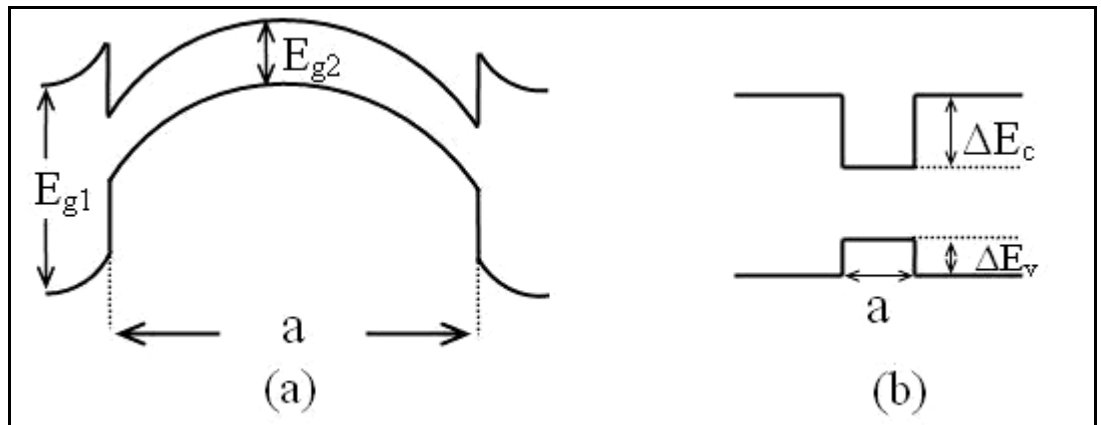
yapılar genellikle aynı yapıda yarıiletkenlerle biçimlenir. Böyle bir yapının iletim ve valans bandı içerisinde bir boyutta kuantum kuyusu oluşur.

2.1.3. Kuantum kuyuları ve süperörgüler

Bir kuantum kuyu yapılandırması için basit bir heteroeklem yapı düşünelim. Merkezi dar tabakanın a genişliği azaltılırken bu yapının enerji bant diyagramının nasıl değiştiğini inceleyelim (Şekil 2.3). Kritik bir kuyu genişliği değeri için (a), tabakada merkezi nötr bölüm kaybolur ve tüm tabaka yoğunluğu eN_D olan iyonize olmuş vericiler (donörler) tarafından dolar. Bu durumda kuyu içindeki potansiyelin parabolik şekilde olacağı Poisson denkleminde kolayca görülebilir.

$$\Delta\phi = \frac{\pi e N_D a^2}{2\epsilon} \quad (2.1)$$

Eş. 2.1’de görüldüğü gibi kuyu içindeki potansiyel ile kuyunun genişliği arasında parabolik bir ilişki vardır. a daha da küçültülürse $e\Delta\phi$ değeri küçülür. Bu durumda bant bükülmesi ihmal edilebilir ve iletim bandında genişliği a , derinliği ΔE_c olan bir kare kuyunun olduğu varsayılabilir (Şekil 2.3.b).



Şekil 2.3. Örnek bir heteroeklem yapının bant diyagramı

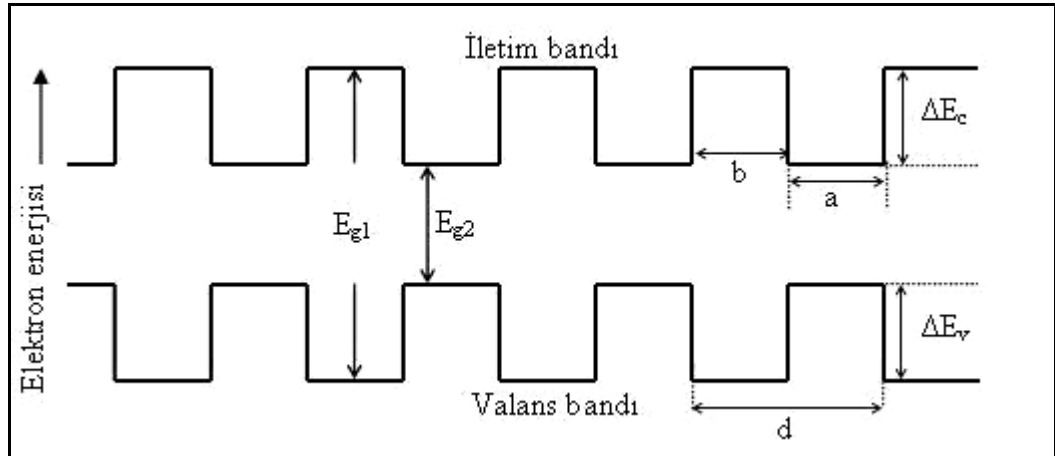
Böylece oluşan kuantum kuyusu, tek bir ince filmi andırır. Bu kuyunun ince filmde tek farkı elektron ve boşluklar için küçük bir potansiyel kuyusuna sahip olmasıdır. Bu nedenle N.nci kuantum seviyesi için enerji ifadesi E_N ,

$$E_N = \frac{\pi^2 \hbar^2 N^2}{2m^* a^2} \quad (2.2)$$

ile verilemez. Sonsuz derinlikte bir kuyu için daha karmaşık bir formül kullanılmalıdır [12].

Süperörgülerde sürekli bir enerji spektrumu ile yüksek enerji seviyeleri oluşur. Yüksek enerjili taşıyıcılar, bir tabakadan diğerine hareket edebilir ve enerjileri kesikli değildir.

Tek bir kuantum kuyusu yerine çok tabakalı, periyodik olarak çok sayıda tekrar eden benzer kuyulu çoklu yapılar büyütülür (Şekil 2.4). Enerji bariyerlerinin kalınlığına bağlı olarak bu yapılar iki şekilde incelenebilir.



Şekil 2.4. Periyodik bir kuantum kuyusu sisteminin (süperörgü) bant diyagramı

$b > 100 \text{ \AA}$ için komşu kuyular birbirini etkilemez ve her bir kuyunun etkisi basit şekilde toplanır. Böyle yapılar çoklu kuantum kuyusu (MQW) yapılar olarak bilinir. Optiksel soğurma deneylerinde tek bir kuyuda oluşan, gelen ışığı soğurma olayının

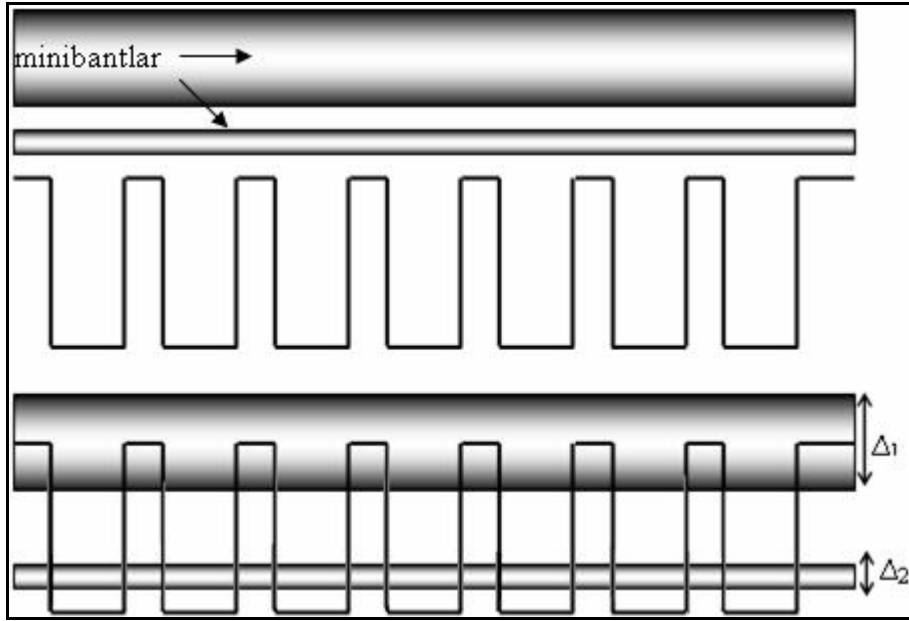
bu gibi yapılarda yeterli olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle MQW yapılar daha avantajlıdır.

Bariyer kalınlığı küçüldüğünde, sistemin enerji spektrumu değişir. Kuyular arası geçiş olasılığı, bantlar içindeki kuantum boyut seviyelerinin değişmesine sebep olur. Bu nedenle süperörgü olarak bilinen tamamen yeni ve özellikleri tekli kuantum kuyularından tamamen farklı yeni yapılar oluşur.

2.1.4. Çoklu kuantum kuyular (MQW) ve süperörgüler

Kuantum kuyularında elektron ve boşluklar sırasıyla iletim ve değerlik (valans) bantları arasında bir yönde hareket ederler ve elde edilen izinli enerji seviyeleri büyütme doğrultusu boyunca kuantumludur. İzole edilmiş birkaç kuantum kuyusu ile oluşturulan MQW yapılar ile sonsuz sayıda kuantum kuyusunun periyodik şekilde dizilmesi ile oluşan süperörgüler arasında bazı farklılıklar vardır. Kuantum kuyusu sayısı fazla olan süperörgülerde enerji spektrumu her zaman süreklilik gösteren, birbirine çok yakın bir dizi bağlı durumdan (altbant) oluşur. Çok sayıda özdeş kuantum kuyusu içeren bir sistem, periyodik sınır şartları ile tanımlanır. Bu durumda enerji bantları $E_n(k_z)$ elde edilir. Burada k_z dalga vektörünün büyütme doğrultusuna paralel yöndeki bileşenidir. Eğer bariyer kalınlığı çok ince ise bu sistem süperörgü olarak bilinir. Enerji bantlarına da minibant denir [12].

Şekil 2.5’de süperörgü yapı için Δ_1 ve Δ_2 sırasıyla birinci ve ikinci minibant genişliğine karşılık gelmektedir. Δ_1 ve Δ_2 arasında görülen boşluğa ise mini boşluk (minigap) denir. Bariyerlerin alt ve üstünde kalan minibantlar arasında temel bir fark yoktur. Bariyerler kalınsa MQW’ler oluşur. Bu sistemlerde bariyerlerin tepe noktası altındaki minibantlar aşırı derecede dardır ve her biri kuantum kuyusu içine yerleşmişlerdir. Bariyerlerin üst kısmında da minibantlar görülür. Fakat oldukça yoğundurlar.



Şekil 2.5. MQW (üstte) ve süperörgü (altta) yapılarının şematik iletim bandı profili ve minibantlar

Süperörgülerin bariyerleri çok ince olduğundan kuyular arasında tünelleme olayı gözlenebilir. Taşıyıcıların geçişi, süperörgü düzlemine dik yönde gerçekleşir. MQW yapılarında ise kuyular arası geçiş gözlenmez. Ayrıca süperörgü ve MQW'ler için yüksek ışımalı verimlilik ve kuyulardaki taşıyıcıların hapsedilmiş olması gibi özellikler ise ortaktır.

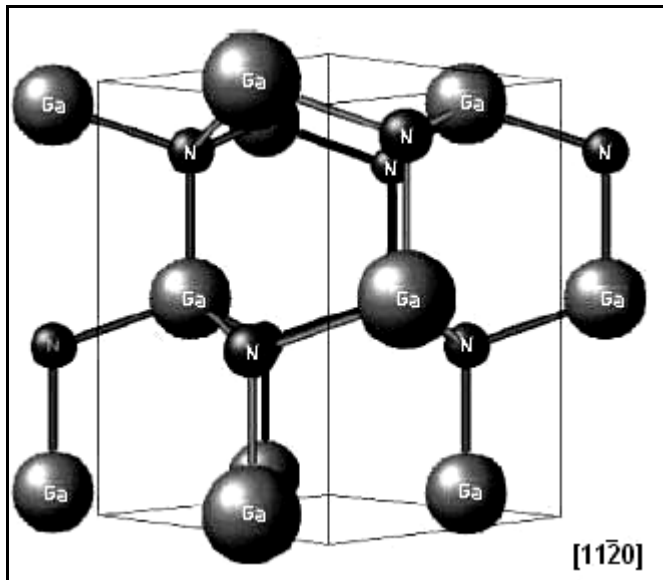
2.2. Yapısal Özellikler ve Materyal Parametreleri

2.2.1. Kristal yapı

III-Nitrür yapılar tarafından paylaşılan üç farklı kristal yapısı vardır. Bunlar; wurtzite, Zincblende (ZnS) ve kaya tuzu yapılarıdır. Normal şartlar altında, bulk AlN, GaN ve InN için termodinamik olarak kararlı yapı wurtzite yapısıdır. Si, MgO ve GaAs gibi (011) kristal düzlemlili kübik alttaşların üzerine büyütülen GaN ve InN ince filmleri için zincblende yapı kararlı olmaktadır. Zincblende ve wurtzite yapılar benzerdirler. Her iki yapı da, 4 tane grup-III atomu ile 4 tane nitrojen atomlarından

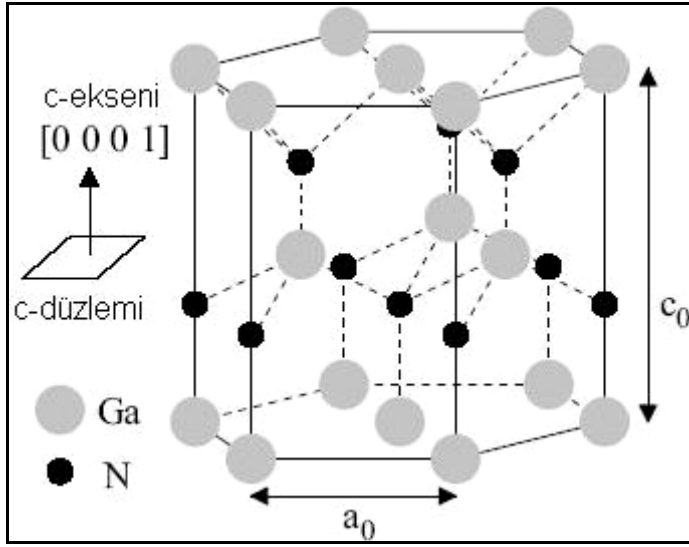
oluşur. Kaya tuzu ya da NaCl yapısı ise AlN, GaN ve InN için çok yüksek basınç altında gerçekleşebilir [1].

Şekil 2.6'da wurtzite kristal yapının birim hücresi verilmiştir. Wurtzite yapısı hekzagonal birim hücreye sahiptir, c ve a olmak üzere iki örgü sabiti vardır ve her biri 6 atom içerir. Bu yapının uzay grubu $P6_3mc$ (C_{6v}^4)'dir. Atomların biri ile diğer tipi, hücre yüksekliği ($5c/8$) olacak şekilde c eksenine boyunca dengelenir. Wurtzite yapısı için (0001) düzleminin istif düzeni $\langle 0001 \rangle$ yönünde ABABAB'dir [1].



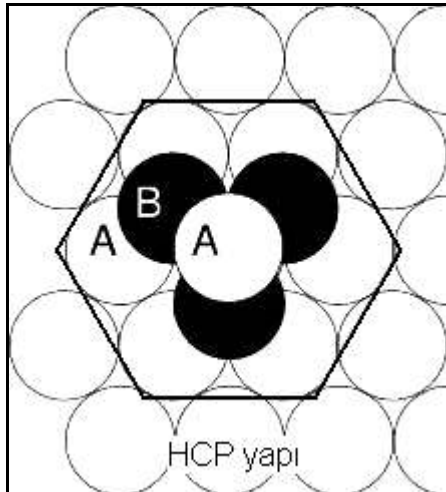
Şekil 2.6. Wurtzite yapıda birim hücre

Wurtzite yapısı, iç içe geçmiş iki hekzagonal sıkı paket yapıdan (HCP) oluşmaktadır [1]. Böyle bir yapı wurtzite GaN için şekil 2.7'de verilmiştir.

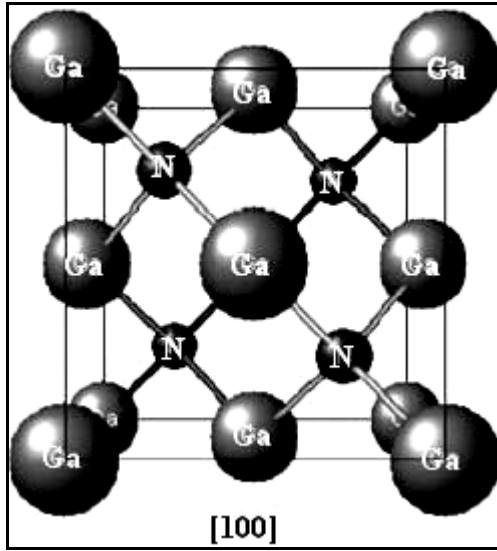


Şekil 2.7. GaN wurtzite HCP kristal yapı

HCP yapı basit hekzagonal yapıya benzemekle birlikte kristal geometrisinde oluşan kürelerin uzayda mümkün olan en büyük yoğunlukla paket edilmesi ve aynı zamanda periyodik bir düzen oluşturarak yapılanmasıyla farklılık gösterir [13]. Şekil 2.8’de HCP wurtzite yapının istif düzeni gösterilmiştir.



Şekil 2.8. HCP yapının istif düzeni



Şekil 2.9. Zincblende yapıda birim hücre

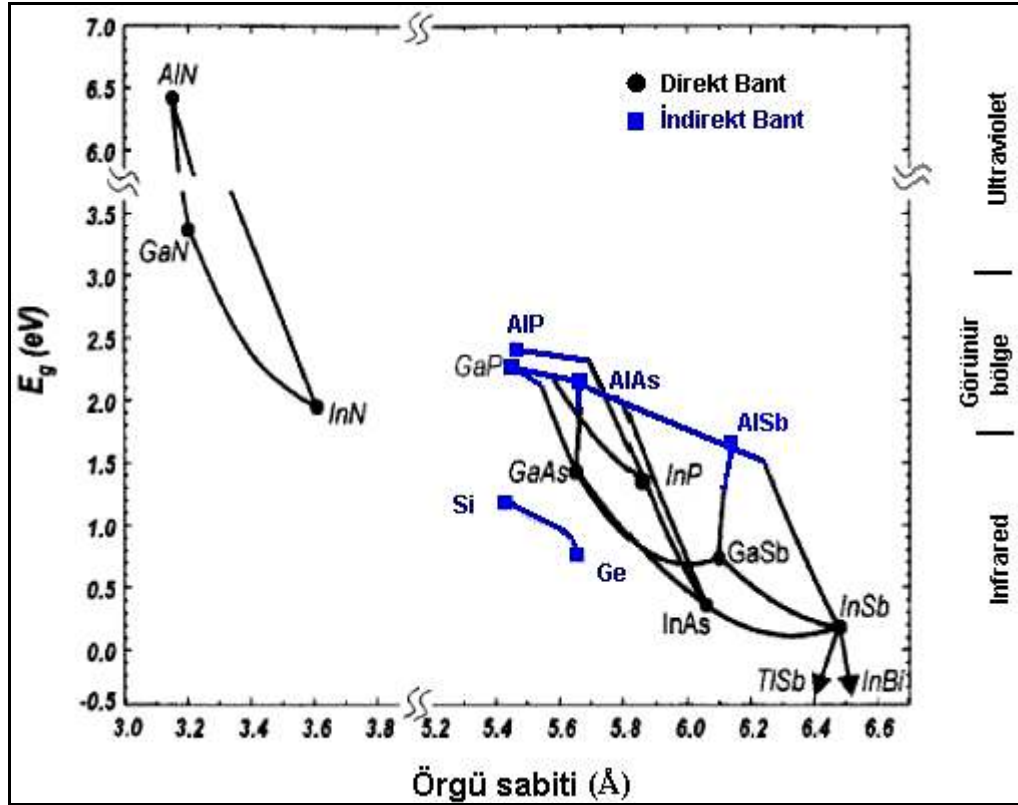
Zincblende yapı kübik birim hücreye sahiptir ve dört tane grup-III, dört tane de nitrojen atomları içerir (Şekil 2.9). Birim hücre içindeki atomların durumu elmas kristal yapıya benzerdir [1]. Yalnız çinko atomları küpün köşe ve yüz merkezlerinde, sülfür atomları ise cisim köşegeninde yer almaktadır [13]. Zincblende yapı için (111) düzleminin istif düzeni $\langle 111 \rangle$ yönünde ABCABC'dir [1].

Zincblende ve wurtzite yapılar benzerdirler. Her iki yapıda da, her bir grup-III atomu, dört nitrojen atomuyla koordine edilir. Aynı şekilde, her bir nitrojen atomu, dört tane grup-III atomları tarafından oluşabilir. Bu iki yapı arasındaki fark, sıkı paketlenmiş iki atomlu düzlemlerinin ardı ardına istiflenmesidir [1].

2.2.2. AlGaN alaşımının özellikleri

Geniş bant aralıklı AlGaN materyali spektrumun UV kısmında optoelektronik uygulamalar için önemlidir. AlGaN bant aralığı enerjisi 3,4 eV'dan ($x=0$, GaN) 6,2 eV'a ($x=1$, AlN) değişir. Bu enerji değişimi 200–365 nm dalga uzunlukları arasında UV bölgesi ile uyumludur.

Şekil 2.10 yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitlerini ve enerji bant aralıklarını gösterir.



Şekil 2.10. Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları [14]

Bant yapısı

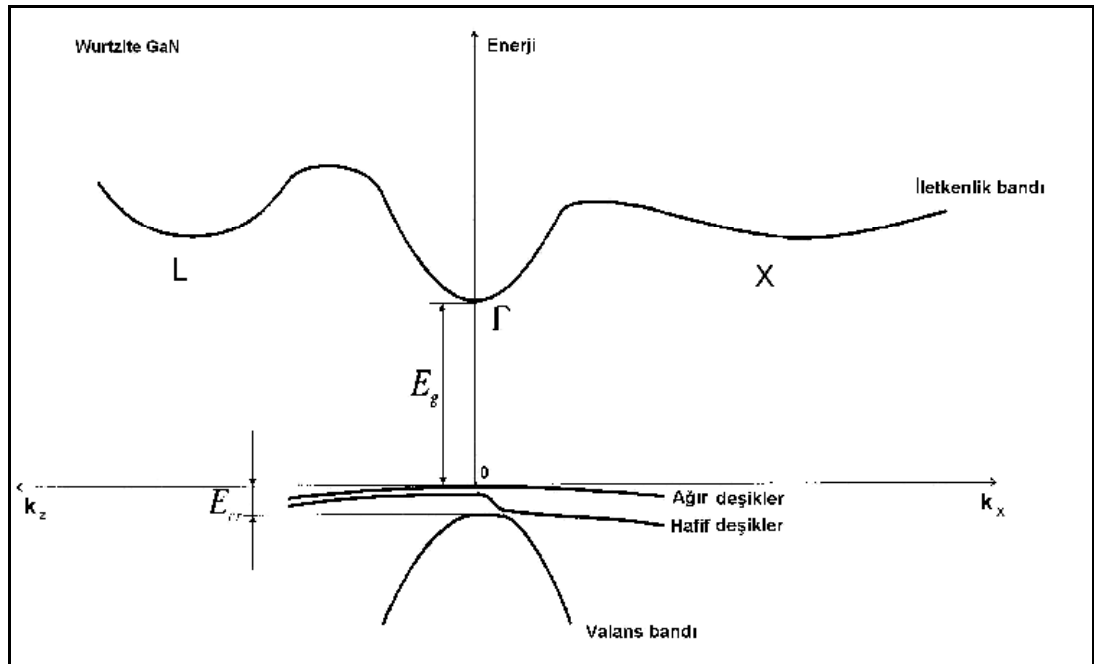
III-Nitrür materyallerin bant yapısının bilinmesi önemlidir. Opsiyonların fazlalığı böyle sistemleri yapılandırmak için birçok fırsat sunar. Bu çoklu yapılarda kuyular GaN ya da InGaN, bariyerler ise AlGaIn ya da GaN ile yapılandırılabilir.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ materyali $\text{AlN}(x)$ ve $\text{GaN}(1-x)$ 'ün kompozisyonu gibi düşünülebilir. Bu iki materyalin oluşturduğu bileşiğin yapısı ise kullanılan materyallerin yüzdeleri ile belirlenir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ enerji bant aralığı Eş. 2.3'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_g(x)(\text{AlGaIn}) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - bx(1-x) \quad (2.3)$$

Burada $E_g(\text{GaN}) = 3,4\text{eV}$, $E_g(\text{AlN}) = 6,2\text{eV}$ ve x , AlN'nün molar kesridir. b ise tartışılabilir değerlere sahip eğilme (bowing) parametresidir.

Bant yapısı kristal simetrisinin temel bir fonksiyonudur. Örnek olarak Şekil 2.11'de wurtzite GaN'nün enerji bant grafiği verildi. Burada Γ , X ve L Brillouin bölgelerindeki önemli simetri noktalarıdır. Bant yapılarının en belirleyici özelliği valans ve iletkenlik bantlarının konumudur. Brillouin bölgesinde, valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu aynı noktada ise (Γ) yarıiletken direkt bant aralıklı, aksi durumda ise indirekt bant aralıklı yarıiletken olarak adlandırılır. Bu nedenle Brillouin bölgesinin merkezindeki Γ noktası, direkt bant aralıklı yarıiletkenler için en önemli noktadır. Düşük alan iletimi hesaplamalarında genellikle valans bandı maksimumu ile iletkenlik bandı minimumunun göz önüne alınması yeterli olmaktadır. Bu noktalar, yarıiletkenin gözlenebilir özelliklerinin belirlenmesinde etkin bir rol üstlenmektedir. Bunun yanı sıra X ve L noktaları düşük alan iletim hesaplamalarında önemsiz bir rol üstlenmelerine rağmen yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa bağımlı yüksek alan elektron iletim hesaplarında önemli rol oynamaktadırlar.



Şekil 2.11. Wurtzite GaN'nün enerji bant diyagramı

Büyütme ve materyal kalitesi

AlGaN materyal sisteminin önemli yetersizliklerden birisi uygun alttaş materyale duyulan ihtiyaçtır. Bu konu üzerinde yapılan birçok araştırma yüksek kaliteli bulk GaN ya da AlN alttaşların üretilmesinin başarılmasına rağmen asıl III-Nitrür alttaşlar henüz başarısızdır. Hakiki bulk GaN/AlN kristallerin büyütülmesi sırasında oldukça yüksek nitrojen basıncından dolayı üretilmesi çok zordur [15,16]. AlGaN kristaller ideal alttaş olan ihtiyaçtan dolayı, yapısal yetersizliği ve termal olarak uyuşmamasına rağmen (0001) safir alttaşları üzerine büyütülmektedir. Safirin seçiminde düşük maliyeti, yüksek kalitedeki geniş kullanışlılığı, görünür ve UV spektrum bölgelerinde optiksel saydamlığı ve sıcaklıklardaki kararlılığı etkilidir. AlGaN filmler MOCVD tekniği ile yaygın olarak büyütülür. Düzgün filmler başarmak, Nitrür yarıiletken filmler ile safir alttaşlar arasındaki büyük örgü uyumsuzluğunu azaltmak için büyütme süreci ince, düşük sıcaklıkta GaN ya da AlN amorf tampon tabaka ile başlatılır [17]. İnce tampon tabaka başlangıç çekirdeklenmesini (nucleation) geliştirir ve iki boyutlu büyümeyi artırır. Ayrıca büyütme sıcaklıkları çok yüksektir (900–1100 °C).

AlGaN ve safir arasındaki örgü uyumsuzluğunun bir sonucu olarak AlGaN filmler çok büyük kusur yoğunluğu sergiler (tipik olarak 10^8 – 10^9 cm⁻²). Optoelektronik cihazların performansının önemli ölçüde azalması bu gibi yüksek kusurlu tabakalara dayanır. Birçok teknik, safir alttaş üzerine büyütülen GaN'ün kusur yoğunluğunu azaltmak için geliştirilmiştir. Son zamanlarda, yanıl epitaksiyel üst üste büyütme (Lateral Epitaxial Overgrowth) tekniği GaN'de kusur yoğunluğunun önemli ölçüde azaldığını başarıyla gösterdi [18–19].

Pseudo-bulk-GaN ve SiC içeren alternatif alttaşlar, III-Nitrür film büyütmesi için kullanılır ve safir alttaş (n-tipi iletkenlik, daha iyi termal iletkenlik) üzerine birçok önemli faydalar sağlar [20,21]. Ancak alternatif alttaşın yüksek maliyetinden dolayı safir alttaş olarak hala yaygın olarak kullanılır.

Birçok araştırma grubu AlGaIn materyal büyütme teknolojisine katkı sağlamaktadır. Örneğin GaN filminin ilk başarılı MOCVD büyütmesi 1986'da Amora ve arkadaşları tarafından gösterildi [22]. Nitrür temelli cihazlar için büyük bir buluş III-Nitrür mavi LED'ler ve lazer diyotların çalışmasını ilk olarak gösteren Nakamura ve arkadaşları tarafından başarıldı [23,24]. Son on yılda birçok katkı, düşük dislokasyon yoğunluklu AlGaIn tabakaları büyütme için yapıldı [25].

Optiksel ve elektriksel özellikler

Güçlü iç kimyasal bağlarından dolayı AlGaIn kristaller, fiziksel ve kimyasal olarak diğer yarıiletkenlerden daha sağlamdır. Bu, özellikle zorlu şartlarda cihazların yıpranmasını azaltan önemli bir özelliktir. İlâveten, termal üretilmiş daha düşük konsantrasyonlu taşıyıcılardan dolayı daha geniş bant aralığında da düşük sızıntılı cihazlarla sonuçlanır. Aslında GaN'ün taşıyıcı yoğunluğu oda sıcaklığında neredeyse sıfırdır ($n_i \approx 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$).

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.4)$$

Bu sonuç AlGaIn epitaksiyel tabaka ile yeterince azalmış kusur yoğunluklu ve oldukça düşük sızıntı akımlı fotodetektörlerle sonuçlandığını gösterir. Ek olarak AlGaIn direkt enerji bant aralığına sahip olduğundan, soğurma foto jenerasyon süreci alternatif geniş bant aralıklı SiC içeren indirekt yarıiletkenlerden çok daha etkilidir [26].

Mükemmel olarak uyuşmamasına rağmen AlN ve GaN'ün örgü sabiti % 2,4'lük bir farklılıkla birbirine çok yakındır [27]. Bu durum bant aralığı mühendisliği yolu ile çoklu eklem cihazlarla sonuçlanan farklı Al konsantrasyonları ile AlGaIn çoklu yapılarının büyütülmesine olanak tanır. Al konsantrasyonunun değiştirilmesi ile AlGaIn'ün uzun dalga boyu kesilimini ayarlamak mümkündür. $x=0$ 'dan $x=1$ 'e Al konsantrasyonunu artırarak bant aralığı ~365 nm' den ~200 nm' ye kaydığı görülür.

AlGaIn çoklu yapıları için yüksek Al içeren yapılar büyütülürse örgü uyumsuzluğu artar. Bu gibi çoklu yapılar kusur ve çatlaklara (cracks) yol açan ve artan gerilmelerin önemli bir miktarını sergilemesi olasıdır. Bu yüzden yüksek kaliteli AlGaIn yapıların büyütülmesi, yüksek Al konsantrasyonları için çok zordur.

AlGaIn tabakaları için kompleks kırılma oranı birçok araştırma grubu tarafından çalışıldı [26]. Kırılma oranı ve yüksek soğurma katsayıları normal ölçülerde elde edildi. Al konsantrasyonu arttıkça AlGaIn'ün kırılma oranı azalır. $\lambda = 400 \text{ nm}$ ' de GaN ve AlN sırasıyla yaklaşık 2,6 ve 2,2 kırılma oranına sahiptir. Bu değerler diğer düşük bant aralıklı III-V bileşik yarıiletkenlerinkinden daha düşüktür. Tüm Al konsantrasyonları için AlGaIn soğurma katsayısı yakın kesilim dalga uzunluklarında 10^5 cm^{-1} 'i aşar. Bu değer diğer III-V materyallerinkinden daha yüksek öneme sahiptir. Bu yüzden AlGaIn (200 nm tabaka derinliği ile çok güçlü UV soğurucudur. Dedektör performansı bakımından bu ince soğurma tabakaları ile yüksek ve etkili performans almamızı sağlar.

Geniş bant aralığının bir sonucu olarak AlGaIn UV fotodiyot cihazlar, yüksek güç ve sıcaklık şartlarında çalışır. Bu özellik, yüksek güç seviyelerinde çalışan AlGaIn tabanlı elektronik cihazlar (BJTs, FETs) için özellikle önemlidir. Kırılma alanı yüksektir ve bu yüzden bu cihazlar yüksek voltajlar altında çalışabilir.

AlGaIn kristallerin n-tipi için Si ve p-tipi için Mg katkısı en yaygın dopant katkılardır. N-tipi katkılı AlGaIn tabakalar çok fazla problem olmaksızın başarılabılır. Ancak, yüksek kalite p-tipi AlGaIn tabakalar hala zordur. Bu problemin ilk nedeni Mg alıcı atomlarının çok yüksek aktivasyon enerjisidir. Mg alıcıların sadece küçük bir kısmı oda sıcaklığında iyonizedir [28]. Bir sınıra kadar Mg konsantrasyonunu artırmak Hall mobilitesini önemli ölçüde düşürür. p-tipi katkı problemi hala AlGaIn tabanlı bipolar cihazlar için önemli engellerden biridir.

2.2.3. GaN yapının özellikleri

Geniş bant enerji aralığına sahip GaN ve GaN tabanlı III-V Nitrür sistemler, morötesi-yeşil spektrum aralığında emisyon cihazları ve yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik cihazlardaki uygulamaları nedeniyle büyük ilgi çekmektedirler. GaN direkt geçişli geniş bant enerji aralığına sahiptir ve kimyasal olarak kararlıdır. Bu özellikler onun mavi ve morötesi ışık yayan diyotlar ve detektörlerin fabrikasyonu için yıpratıcı ortamlara uygun materyal olmasını sağlamaktadır [29].

Genellikle daha çok çalışılan Si ve GaAs yarıiletkenleri ile karşılaştırıldığında GaN hakkındaki bilgilerimiz daha azdır. Büyük n-tipi taşıyıcı konsantrasyonu, uygun alttaş materyal eksikliği, GaN için p-tipi katkı yapmadaki zorluklar ve işlem zorlukları geçmişte birçok araştırmacıyı GaN üzerinde araştırma yapmaktan uzak tutmuştur. Yine de geniş bant enerji aralığına sahip değişik kalitede üretilen yarıiletkenler için olduğu gibi GaN'ün kabul edilebilir birçok fiziksel özelliği literatürlerde mevcuttur [8].

Çizelge 2.1. Wurtzite ve Zincblende GaN'e ait temel parametreler [1]

GaN (Wurtzite)		
Simetri uzay grubu	$P6_3mc (C_{6v}^4)$	
Bant aralığı enerjisi	$E_g(300K) = 3,42 \text{ eV}$	$E_g(4K) = 3,505 \text{ eV}$
Sıcaklık katsayısı	$dE_g/dT = -6,0 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$	-
Basınç katsayısı	$dE_g/dP = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ eV/kbar}$	-
Örgü sabiti	$a = 3,189 \text{ Å}$	$c = 5,185 \text{ Å}$
Termal genleşme	$\Delta a/a = 5,59 \cdot 10^{-6}/K$	$\Delta c/c = 3,17 \cdot 10^{-6}/K$
Termal iletkenlik	$\kappa = 1,3 \text{ W/cm.K}$	-
Kırılma indisi	$n(1\text{eV}) = 2,35$	$n(3,42\text{eV}) = 2,85$
Dielektrik sabiti	$\epsilon_r = 10,4$	$\epsilon_\infty = 5,47$
Elektron etkin kütlesi, m_e	$0,22m_0$	
Hole etkin kütlesi, m_p	$>0,8m_0$	
GaN (Zincblende)		
Simetri uzay grubu	$F43m (T_d^2)$	
Bant aralığı enerjisi	$E_g(300K) = 3,2 - 3,3 \text{ eV}$	
Örgü sabiti	$a = 4,52 \text{ Å}$	
Kırılma indisi	$n(3\text{eV}) = 2,9$	

2.2.4. AlN materyal sistemi

AlN yararlı birçok mekanik ve elektronik özellikler sergiler. Örneğin; sertlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek sıcaklığa karşı direnç, kristal olmayan formda Si ve GaAs ile termal uygunluk vb. Bütün bu özellikler elektronik uygulamalar için AlN yapısını çekici kılar. Yarıiletken cihaz uygulamalarında yalıtkan bir materyal olarak AlN'ün ilgi çekmesinin bir nedeni de geniş bant aralığına sahip olmasıdır. Piezoelektrik özellikler yüzey-akustik-dalga cihaz uygulamaları için AlN'ü uygun kılar [1].

Büyütme sırasında alüminyum ile oksijenin yüksek reaksiyonundan dolayı, AlN'ü incelemek zordur. Yapılan ilk ölçümler örgü sabitlerinde, kirliliğin derecesine bağlı olarak enerji bant aralıklarında hatalara yol açabilen, materyali kirleten oksijenin varlığını gösterdi. Gelişmiş prosedürlere dayanarak elde edilen serbest-kirlilik birikim ortamları sayesinde yüksek kalitede AlN büyötmek mümkündür. AlN'ün wurtzite ve zincblende kristal yapılarının bazı yapısal ve optiksel özellikleri çizelge 2.2'de verildi.

Çizelge 2.2. Wurtzite AlN'ün yapısal ve optiksel özellikleri [1]

AlN (Wurtzite)		
Bant aralığı enerjisi	$E_g(300K) = 6,2 \text{ eV}$	$E_g(5K) = 6,28 \text{ eV}$
Örgü sabiti	$a = 3,112 \text{ Å}$	$c = 4,982 \text{ Å}$
Termal genleşme	$\Delta a/a = 4,2 \cdot 10^{-6}/K$	$\Delta c/c = 5,3 \cdot 10^{-6}/K$
Termal iletkenlik	$\kappa = 3,2 \text{ W/cm.K}$	-
Kırılma indisi	$n(3\text{eV}) = 2,15 \pm 0,05$	$n(3,42\text{eV}) = 2,85$
Dielektrik sabiti	$\epsilon_r = 8,5 \pm 0,2$	$\epsilon_\infty = 4,68 \div 4,84$
AlN (Zincblende)		
Simetri uzay grubu	$F43m (T_d^2)$	
Bant aralığı enerjisi	$E_g(300K) = 5,11 \text{ eV}, (\text{Teorik})$	
Örgü sabiti	$a = 4,38 \text{ Å}$	

2.3. AlGaN Alaşımının Bazı Uygulama Alanları

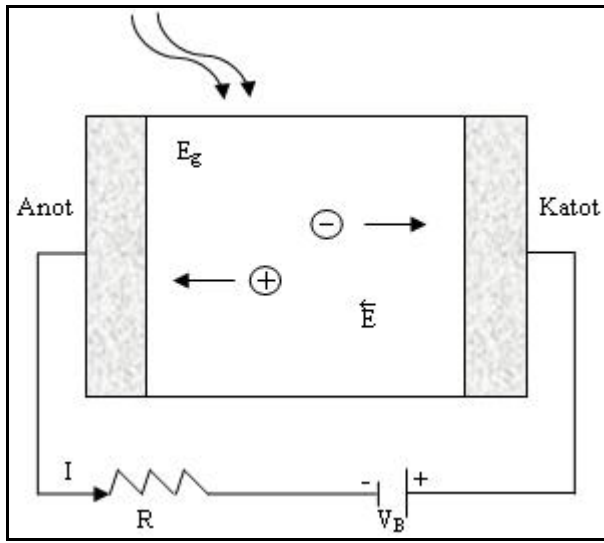
2.3.1. Yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT) yapı

Nitrür temelli yarıiletken materyaller fiziksel özellikleri nedeni ile elektronik cihaz uygulamaları açısından yoğun ilgi görmüştür [30]. Örneğin AlGaN/GaN çoklu yapılar geniş bant aralıkları, yüksek pik ve doyum elektron hızları ve yüksek iki boyutlu elektron gazı yoğunlukları gibi üstün materyal özelliklerinden dolayı yüksek güç ve yüksek frekans elektronik cihazların gerçekleştirilmesi için bir materyal olarak çok dikkat çekmiştir [31]. Bu uygulamalardan AlGaN/GaN-HEMT, yüksek güç ve yüksek sıcaklık şartları altında çalışan elektronik cihazların gerçekleştirilmesi için beklenen avantajlarından dolayı ümit verici bir araştırmadır [32]. Bu durumda standart büyütme prosedürü herhangi bir cihaz yapmadan önce GaN tampon tabaka büyütülmesidir. GaN ve safir arasındaki aşırı büyük örgü uyumsuzluğunu engellemek için yüksek sıcaklıklı GaN tampon tabaka büyütülmeden önce başlangıçta ince ve düşük sıcaklıklı GaN veya AlN çekirdek (nucleation) tabaka büyütülmelidir. Ancak, AlN çekirdek tabaka kullanıldığında bu alttaşlar üzerinde (Al_2O_3 ve SiC) GaN epi-tabakaların kristal kalitesi çok daha gelişmiştir. Çünkü AlN tabaka çekirdek merkezleri sağlar ve GaN filmlerin yanal büyümesini geliştirir. AlN çekirdek tabakalar yaygın olarak kullanılmasına rağmen AlN tabaka ve GaN veya AlGaN/GaN tabakalar arasındaki ilişki açısından hala pek çok sorun vardır [30]. Örneğin, HEMT temelli cihazların karakterizasyonu için önemli bir parametre olan elektron mobilitesi, yüzey / ara yüzey kusurları ve pürüzlülük ile ilişkilidir [31].

2.3.2. Fotodiyot yapı

Fotodiyot, aydınlatıldığında akım geçiren bir yarıiletken diyot türüdür. İki elektriksel temasa (anot ve katot) sahip yarıiletkenlerden oluşur. Temel fotodiyot şematiği Şekil 2.12'de gösterildi. Fotonun enerjisi yarıiletkenin bant aralığı enerjisinden yüksek ($h\nu > E_g$) ise foton soğurulur. Başarılı soğurma süreci serbest elektron-hole çiftinin üretimi ile sonuçlanır. Eğer anottan daha düşük potansiyele sahip olmasını sağlayan

ters besleme voltajı uygulanırsa, yarıiletken boyunca elektriksel alan meydana gelir. Elektriksel alan altında anot ve katot çevresinde foto taşıyıcılar toplanır. Pozitif yük anotta ve negatif yükler katotta toplanır. Bu iletim süreci dış devre içinde elektrik akımına neden olur. Bu akıma da fotoakımı denir. Burada fotoakım; yarıiletken içerisinde fotonun soğurulması ve taşıyıcı üretimi ile bölgesel elektrik alan altında taşıyıcıların anot ve katoda toplanmasını sağlar.



Şekil 2.12. Fotodiyotun şematik gösterimi

Fotodiyotların en önemli avantajları yüksek hızlarıdır. Çoğunun tepki süresi 200 ns'nin altındadır. Bu yüksek hız, fotodiyotların yüksek hızlı devrelerle birlikte kullanılabilmelerini sağlar. Yüksek hızlı teyp okuyucularında ve opto-izolatörlerde sıkça kullanılırlar. Fotodiyotlar, kontak tipine ve diyet yapısına bağlı olarak Schottky (bariyer) fotodiyot, metal-yarıiletken-metal fotodiyot, p-i-n fotodiyot, çığ fotodiyotu vb. sınıflandırılırlar [33].

3. DENEYSEL TEKNİKLER

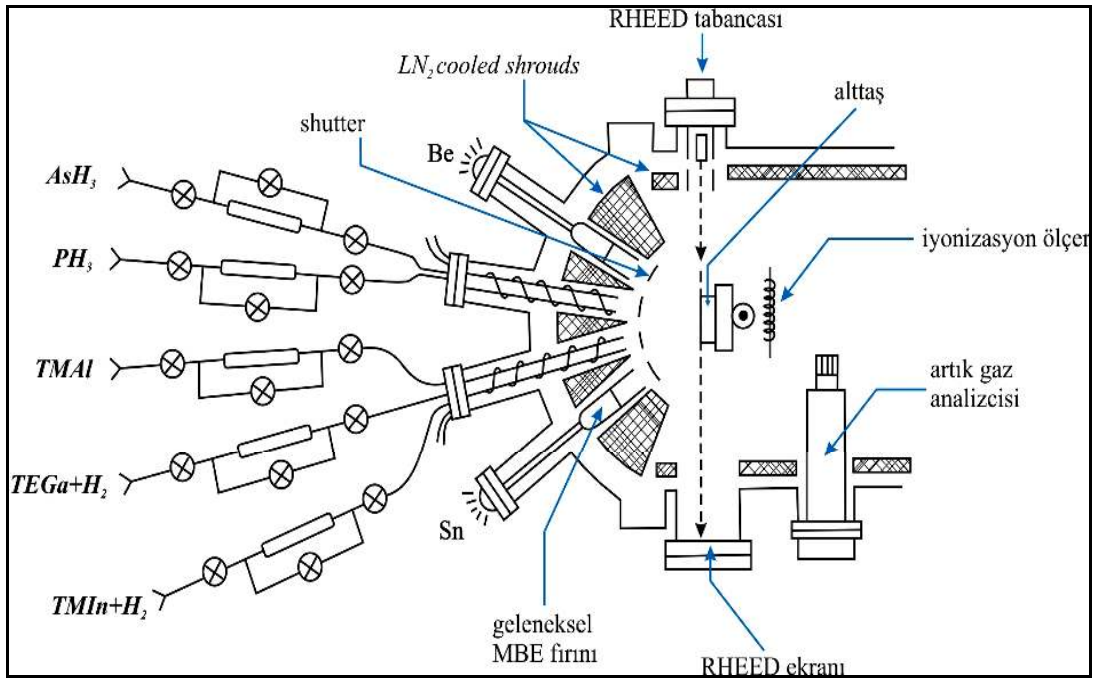
3.1. Giriş

Bu bölümde yarıiletken ince filmlerin epitaksiyel büyütmesinde kullanılan MBE ve MOCVD teknikleri açıklandı. Ayrıca AlGaIn süperörgü yapılarının karakterizasyonunda kullanılan yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) deney setleri hakkında bilgiler verildi.

3.2. Epitaksiyel Büyütme Teknikleri

3.2.1. Moleküler demet epitaksi (Molecular Beam Epitaxy)

Yarıiletken üretme tekniklerinin en önemlilerinden biri olan MBE tekniği, ultra yüksek vakum (UHV) şartları altında (10^{-9} Torr) bir kristal yüzey ile atom veya termal enerjili moleküler demetlerinin reaksiyon prosesini içeren bir epitaksiyel büyütme sürecidir. Moleküler demet, kaynak elementin buharlaşacak düzeye kadar ısıtılması ile elde edilir. Yüksek-kalitede saf ince film üretebilmek için kaynak element mümkün olduğunca saf olmalı ve büyütme işlemi çok yüksek vakum ortamında gerçekleştirilmelidir. UHV şartlarından dolayı MBE büyütmesi termodinamik dengeden bağımsız sayılabilir. Şekil 3.1’de tipik bir MBE sistem şematiği verildi.



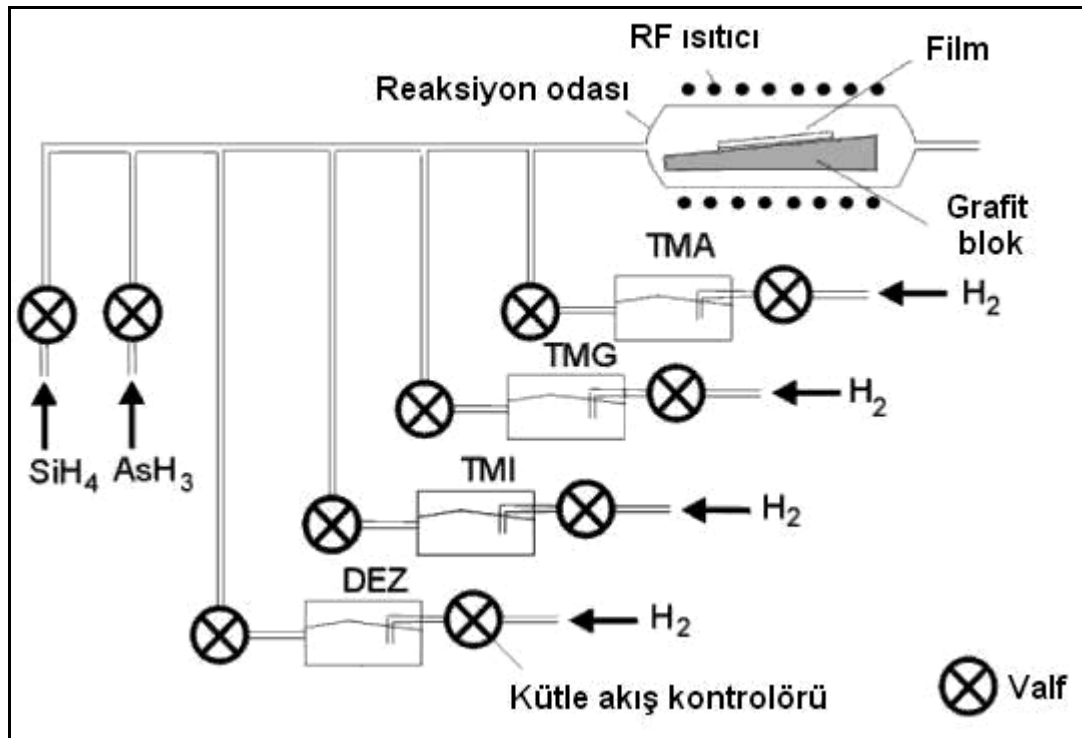
Şekil 3.1. Tipik bir MBE sistem şematiği

MBE ile kimyasal kompozisyon ve katkı profillerinin her ikisi de çok hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Tek kristal çok tabakalı (atomik tabaka) yapılar MBE kullanılarak büyütülür. Böylece MBE metodu ile yarıiletken çoklu yapı ince filmler, (mikron mertebesinde) çok hassas bir şekilde elde edebilmektedir. Genelde MBE büyütme oranı son derece küçüktür. Örneğin GaAs için $1\mu\text{m}/\text{h}$ (1 monolayer)'dir. Böylece büyütülen filmin yüzeyi çok düzgün olur. Yüzeyde düzgün tabakalar oluşturmak için büyütmeden önce yapılan bir başka işlem; yüksek vakum ortamında taban numunenin ısıtılması ($450\text{--}600^\circ\text{C}$) ve böylece kirliliklerden arındırılmasıdır.

MBE sistemi diğer tekniklerden farklı olarak birçok avantaja sahiptir. Yüksek vakum şartlarında kristalin büyümesi RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction), AES (Auger Electron Spectroscopy), Ellipsometry v.b ekipmanlarla kontrol edilebilir.

3.2.2. Metal organik kimyasal buhar birikimi (Metal Organic Chemical Vapour Deposition)

MOCVD bir buhar faz epitaksi sistemidir. Nitrür yapıların çoklu epitaksiyel büyütmesinde başarılıdır. Tipik bir MOCVD sisteminin en önemli kısmı büyüme işleminin meydana geldiği reaktör kısmıdır. Diğer bütün kabinlerden gelen gazlar RF jeneratör tarafından ısıtılan ($\sim 1000^\circ\text{C}$) tutucu üzerindeki alttaşıla reaksiyona girer. Büyütölmek istenen alaşım burada meydana gelir. Reaktör içerisinde 1200°C sıcaklığa dayanıklı kuvars parçalar bulunur. Tipik bir MOCVD sisteminin reaktör ve gaz akış şematığı Şekil 3.2’de verildi.



Şekil 3.2. Tipik bir MOCVD sisteminin reaktör ve gaz akış şematığı

3.3. Karakterizasyon Teknikleri

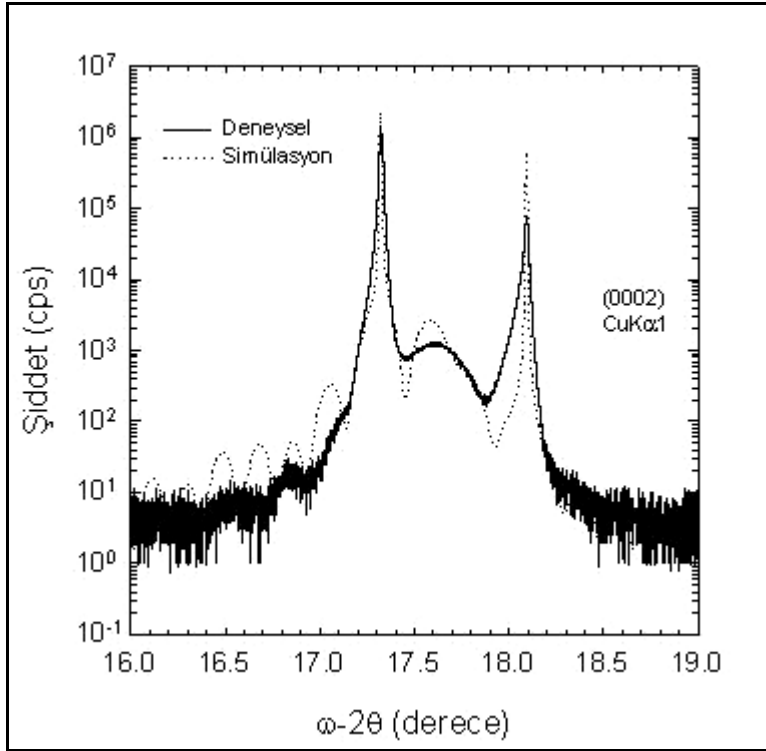
3.3.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD)

Yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD) alttaş üzerine büyütülen ince filmlerin karakterizasyonu için kullanılan bir tekniktir. X-ışınları, epitaksiyel tabakaları delip geçer ve böylece hem filmin hem de alttaşın özelliklerini belirlemek için bilgi verebilir. İnce film numunelerini karakterize etmek için kullanılan XRD için birçok özel durum vardır [34]. Bu özel durumlardan bahsedilecek olursa, ilk olarak iletim için alttaş çok kalın olduğunda bu ölçümler için yansıma geometrisi kullanılır. İkinci olarak, yüksek açısal ayırışma gerekir, çünkü yarıiletken maddeden gelen pikler maddedeki çok düşük kusur yoğunlukları nedeniyle keskindir. Çoklu epitaksiyel tabakalarda süperörgü ölçümlerinde filmde gelen ana difraksiyon piki çevresindeki uydu pikleri bellidir. Film kalınlığı ve kalitesi alınan ölçümlerden belirlenebilir.

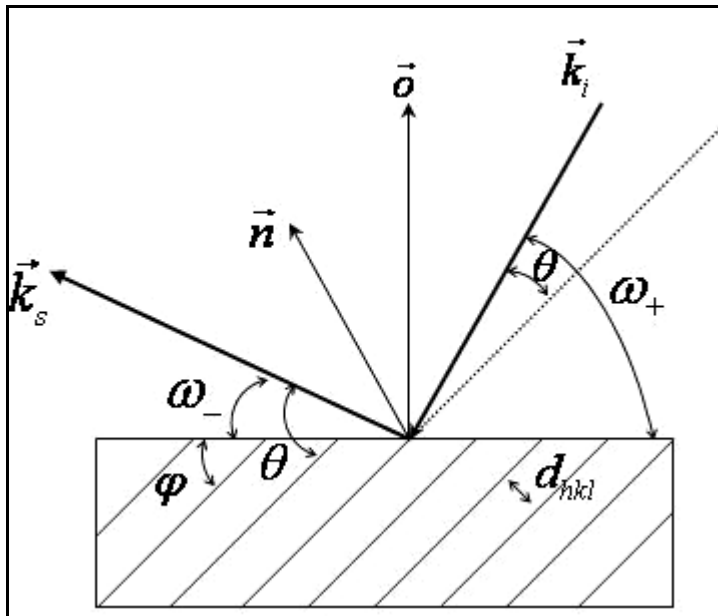
X-ışınları difraksiyonunda, en önemli kavramlardan biri de Bragg Kanunudur. Bragg Kanunu, difraksiyonun oluşabilmesi için gerekli olan şartı ifade eder.

$$2d_{hkl} \sin \theta_B = n\lambda \quad (3.1)$$

Eş.3.1’de d_{hkl} Miller indisli (hkl) örgü düzlemleri arasındaki mesafedir, θ_B Bragg açısı, n saçılma mertebesi ve λ dalga boyudur. Böylece, verilen örgü düzlemi mesafesi ve dalga boyu için, Bragg açısı vardır ve Eş.3.1 denklemini sağlar. Bir süperörgünün XRD spektrumu Şekil 3.3’de örnek olarak gösterildi. Keskin pik aktif bölgeye, diğer pikler ise süperörgüyü oluşturan piklerin şiddetlerine karşılık gelir.



Şekil 3.3. Örnek bir kristalin yöneliminde süperörgü piklerinin XRD grafiği



Şekil 3.4. XRD saçılma geometrisi

X-ışınları saçılma geometrisi şematigi Şekil 3.4'de gösterildi. Burada $\vec{k}_i$ gelen dalga vektörü, $\vec{k}_s$ saçılan dalga vektörü, $\vec{o}$ yüzey normali, yansıyan örgü düzlemleri

üzerindeki normaldir, θ Bragg açısı ve φ yüzey ve yansıma düzlemi arasındaki açıdır.

Eğer φ açısı, sıfır ise (örneğin, yansıma örgü düzlemleri yüzeye paralel), Bragg saçılması simetriktir ve Bragg Kanunu uygulanır. $\varphi \neq 0$ ise, difraksiyon asimetriktir ve

$$b = \frac{\gamma_i}{\gamma_s} = \frac{\sin(w_+)}{\sin(w_-)} = -\frac{\sin(\theta + \varphi)}{\sin(\theta - \varphi)} \quad (3.2)$$

asimetri faktörünün kullanılmasını gerektirir. X-ışını kaynağı olarak genellikle $CuK\alpha$ kullanılmaktadır.

XRD, çoklu yapılar ve özellikle bunların ara yüzeylerinin kritik kimyasal ve yapısal bilgileri hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Deneysel yüksek çözünürlükteki X-ışınları difraksiyon desenlerinden açısal pozisyonun simülasyonu, şiddet ilişkisi ve bütün uydu piklerinin çizgi şekli, kuyu ve bariyer genişliği ayrıca belirlenir. Bunların yanında ara yüzey bileşimi de belirlenebilir.

Tipik çoklu kuantum kuyusu için X-ışınları rocking eğrileri baskın alttaş piki ve birçok eşit yönelimli uydu pikleri ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$) çoklu yapıda yer alır [34]. Genellikle sıfır-sıra piki bütün uydu pikleri arasında en yüksek şiddete sahiptir. X-ışınları kaynak şiddetleri ile gözlenen uydu pikleri sayısı bağlantılı olduğundan, aralarındaki açısal ayırım çoklu yapının periyodu P (kuyunun toplamı ve bariyer kalınlığı), büyütülen periyotların sayısı ve yapının görüntüsü ile doğrudan bağlantılıdır. Uydu piklerinin şiddeti ara yüzey bileşimi ve pürüzlülük hakkında bilgiler verir.

XRD analizine bakacak olursak, süperörgü yapısının periyodu P , $\Delta\theta_0$ açısal süperörgü pikinden aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir,

$$P = \frac{\lambda}{2\Delta\theta_0 \cos(\theta + \Delta\theta_0)} \quad (3.3)$$

Eş.3.3’de λ , seçilmiş X-ışınları dalga boyudur. θ Bragg açısıdır ve $\Delta\theta_0$ alttaş ve sıfıncı sıra piki arasındaki açısal farktır. $\Delta\theta_0$ büyüme eksenini $\Delta a_{\perp}(\bar{x}) - a_s$, burada a_s alttaşın örgü parametresi olup, $\Delta a_{\perp}(\bar{x}) - a_s$ ’dir. z-yönelimi boyunca çoklu yapılarda kimyasal gradyentin tanımlanması amaçlanmıştır, tek örgü parametresi $a_{\perp}$ var olmayan bütün w genişliği boyunca geçerlidir. Ortalama $a_{\perp}$ kullanılarak 3 farklı $a_{\perp}$ değeri kullanılır. Bunlar ara yüzey 1’in değeri, kuyu tabakası ve ara yüzey 2’nin değeridir.

Eğer kuyu $A_xB_{1-x}C$ şeklinde üçlü yapıda ise, epitaksiyel büyütülmüş süperörgünün büyüme eksenini boyunca örgü parametresinde ortalama fark süperörgü yapısının bütün P periyodu üstünde ortalama $\bar{x}$ oranına bağlıdır. Alttaş piki ve sıfıncı sıra süperörgü pikinin $\Delta\theta_0(\bar{x})$ nicel açısal ayırımı şu şekilde verilir:

$$-\Delta\theta_0(\bar{x}) = \tan(\theta) \frac{\Delta a_{\perp}(\bar{x})}{a_s} \quad (3.4)$$

$A_xB_{1-x}C$ şeklinde üçlü alaşımlardan oluşan kuyularda ise bütün süperörgü yapısı göz önüne alınmalıdır. Yapıda tekrarlayan tabaka sayısı N_{SL} , örgü parametresi sabiti düzenli A içeriği ile x_i , ince kristal lamel kalınlığı w_i olarak verilir. x_i bileşeni ile tanımlanan her bir tabaka için gerilmesiz örgü parametresi a_i ve Poisson’ un oranı γ_i yerel A konsantrasyonu x_i ’ nin fonksiyonu olarak lineer interpolasyon ile hesaplanır. w_i kalınlığı ve yerel A içeriği x_i , P periyodu ile bağlantılıdır ve ortalama $\bar{x}$ değeri:

$$\bar{x} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad \text{ile} \quad \sum_{i=1}^n w_i = P \quad (3.5)$$

olarak verilir.

Resim 3.1’de gösterilen X-ışınları difraktometresinin dizaynı; difraktometre; goniometre, tüp, tüp duruşu, ölçümler için gerekli slit sistem, numune taşıyıcı ve dedektörden oluşur. Bu birim dikey ve yatay olarak radyasyon koruması yerleşmesinde veya ayırma masasında yüklenir.

HR-XRD deneyinde yüksek çözünürlükte ölçüm için Ge (022) yönelimli dört kristal monochromator, X-ışını kaynağı olarak KFLCu₂K kullanıldı.

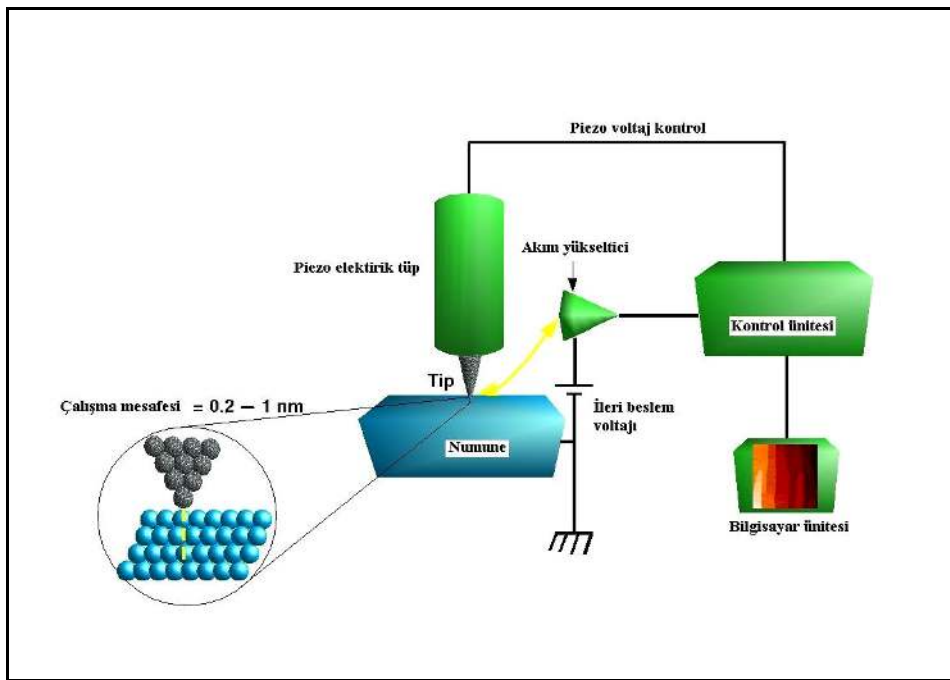


Resim 3.1. HR-XRD ölçümlerinde kullandığımız Bruker-AXS D8 Discover XRD cihazının görünüşü

3.3.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Taramalı Tünelleme Mikroskobu (Scanning Tunelling Microscopy-STM)’nun başarıları yeni taramalı araştırma mikroskop metotlarının geliştirilmesine esin kaynağı oldu. Bunlardan biri olan atomik kuvvet mikroskobu (Atomic Force Microscopy-AFM) ile malzeme yüzeyi analizleri yapılmaktadır. AFM cihazı iğne ile

incelenen numune arasındaki kuvvetleri (basınçları) algılar. Özellikle yüzey pürüzlülüğünü belirlemekte hızlı bir tekniktir. Yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek birçok ana problem (örneğin: sürtünme, kontak deformasyonu, ısı ve elektrik akım iletkenliği kontak köşelerin sızdırmazlığı ve yer doğruluğu) için önemlidir. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü onlarca yıldır deneysel ve teorik araştırmaların konusu olmuştur [35]. AFM cihazının çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 3.5’de sunuldu.



Şekil 3.5. AFM'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi [36]

AFM’de çok hassas bir iğnenin (tip) yüzeyi taramasıyla atomlar arası kuvvetler nanonewton hassasiyetiyle ölçülür. Ölçülen yüzeyin özelliklerini büyük bir doğrulukla tespit edebilmek için, ucun uzaysal pozisyonunu ayarlamaya yarayan piezoelektrik güç vericileri kullanılır. Piezoelektrik malzemeler kendilerine bir elektrik alan uygulandığında genleşen ya da sıkışan seramiklerdir. Bu hareketten faydalanılarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler, yazılım aracılığıyla derlenerek ya numunenin görüntüsü elde edilir ya da iğne ve numune arası etkileşimler ölçülür.

AFM'nin en önemli özelliği, alışılmış elektron mikroskopisi tekniklerinde kaçınılmaz olan, özel örnek hazırlanması, vakum v.b. şartlara ihtiyaç duyulmadan, incelenen örnek yüzeyinin moleküler veya atomik seviyede üç boyutlu görüntüsünü verebilmesidir. Sıvı ya da katı yüzey topografisini nanometre (nm) seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arası kuvvetleri angstrom mertebesinde 100 mikrona kadar ölçebilen bir sistemdir.

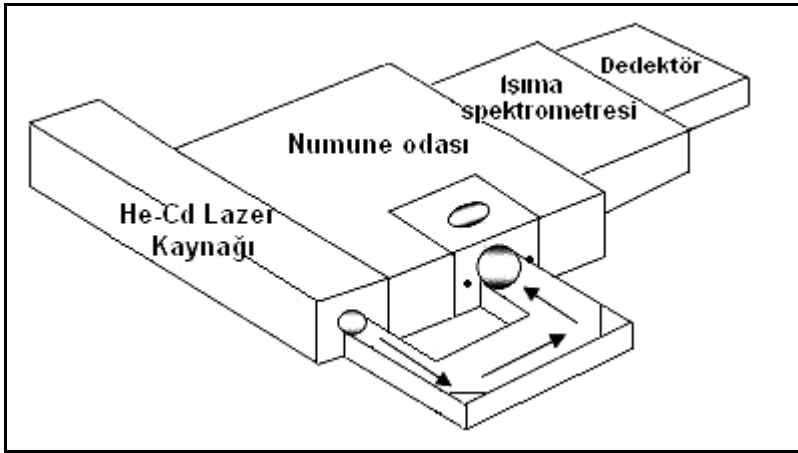
AFM taranan alanın büyüklüğüne bağlı olan rms pürüzlülüğünü belirler ve ağırlıklı ortalamasını verir. Ölçülen yapının minimum büyüklüğü ve dolayısıyla rms (root mean square) yüzey pürüzlülüğü AFM iğnesinin büyüklüğüne ve geometrisine de bağlıdır [37].

Bu tez çalışmasında çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 numunelerinin yüzey özellikleri AFM (Omicron-Variable Temperature STM/AFM) cihazı ile araştırıldı. Ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapıldı. Numuneler ölçüm öncesi etil alkol ve saf azot kullanılarak temizlendi.

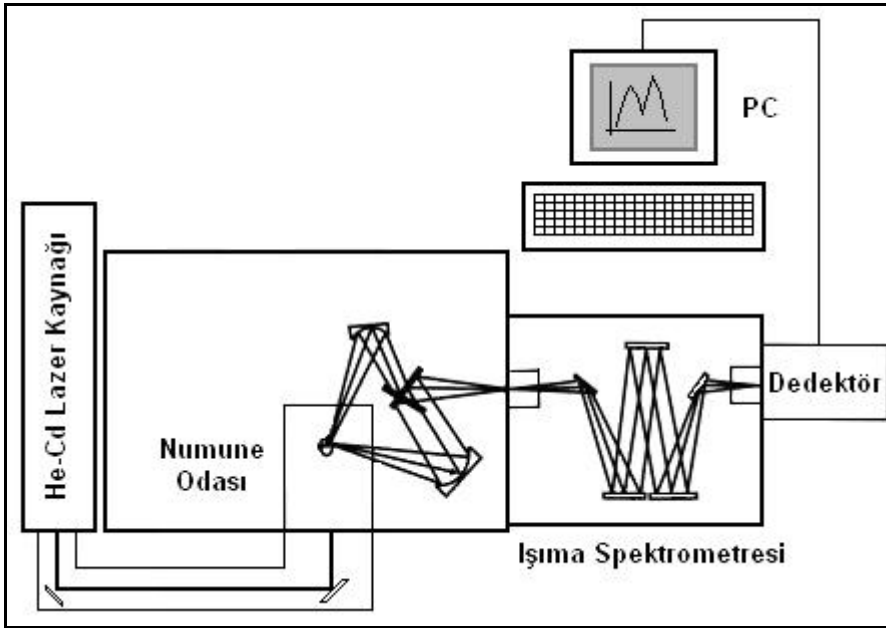
3.3.3. Fotoluminesans (PL)

Fotoluminesans (PL) basit, çok yönlü ve numuneye zarar vermeyen bir ölçüm yöntemidir. Sıradan bir PL çalışması için optiksel bir kaynak ve optiksel bir güç sayacı ya da spektrometre gereklidir. Bir numune tarafından soğurulan ya da yayınlanan belli enerjideki fotonlar, elektronik durumlar hakkında bilgi verir. Soğurma bir sistemin toplam bant yapısını öğrenmek için iyi bir araçtır. Çünkü bantlar enerji durumlarının görece olarak yüksek yoğunluğuna sahiptir [12]. Diğer yandan fotonla uyarılmış taşıyıcılar bantlar boyunca hızlıca termalize olduğundan ve daha alt seviyelere yerleştiklerinden PL ışıma, alt seviyeleri ayırmayı sağlar. Bu özellik PL'i kusur ve katkı seviyelerinin bulunduğu ara yüzeyleri analiz etmekte etkin kılar. Işımalı geçişler PL spektrumunda kusursuz pikler oluşturur. Bu nedenle PL ölçümleri bu tür durumlara çok duyarlı ve hassastır.

PL ölçümleri için kullanılan deneysel düzenekler laboratuarlara, kullanılan cihazlara ve ölçülmek istenen özelliklere göre bazı değişiklikler gösterir. Fakat bu düzeneklerde genel prensipler aynıdır. Optiksel bir ışık kaynağı ile uyarılan sistemin kendiliğinden yaptığı ışınımın toplanması ve dalga boyuna ya da enerjiye göre spektrumun elde edilmesi en temel prensiptir. Bu tez çalışmasında kullanılan PL deneysel düzeneğinin basit bir gösterimi Şekil 3.6’da verildi.



Şekil 3.6. Fotolüminesans ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek



Şekil 3.7. Fotolüminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematığı

PL ölçümlerinde gerçekleşen fiziksel olaylar ise Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Işık kaynağından gelen ışınlar, numune odasına yönlendirilir. Numune odasındaki örnek, gönderilen ışık ışınına maruz bırakılır. Numuneden yansıyan ışık, ışık spektrometresi yardımıyla filtre edilerek dedektöre gönderilir. Dedektör yardımıyla elektrik akımına çevrilen sinyaller bilgisayara gönderilerek, dalga boyuna karşılık PL şiddetindeki değişiminin spektrumunu gösteren bir grafik elde edilir.

Bu tez çalışmasında PL ölçümleri oda sıcaklığında (300K), 325nm dalga boylu, 55mW güç çıkışlı He-Cd lazer kullanılarak yapıldı. Ölçümlerden önce numuneler etil alkol ile temizlendi.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümün ilk kısmında MOCVD tekniği ile büyütülen AlGaN çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 süperörgü yapılarının büyütme prosesleri yapısal özellikleri ile birlikte sunuldu. Numunelerin yapısal ve optiksel özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) cihazları kullanılarak karakterize edildi.

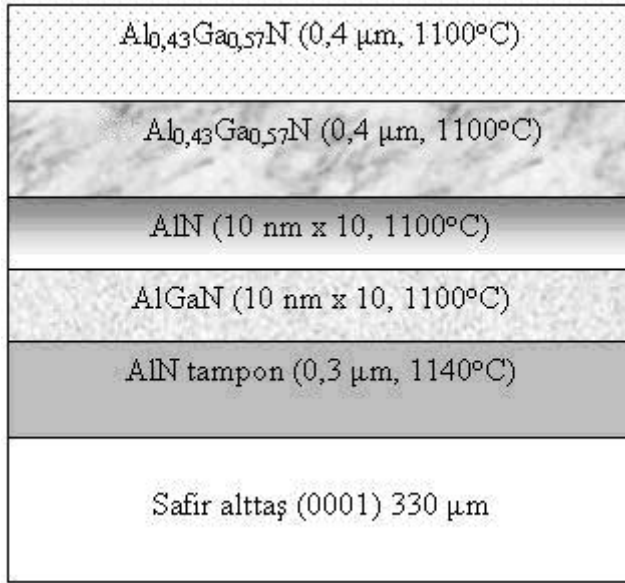
Deneysel ölçüm ve sonuçlardan önce numunelerin büyütme süreçleri sunuldu.

4.2. Materyal Büyütme Süreçleri

MOCVD sisteminde büyütme sırasında Al, Ga ve N kaynakları olarak TrimethylGallium (TMG), TrimethylAluminum (TMA) ve Ammonia kullanıldı. Her iki örnek de (0001) yönelimli (330 μ m) safir (Al₂O₃) alttaşlar üzerine büyütüldü. Epitaksiyel büyüme başlamadan önce safir alttaşlar, yüzey kirliliklerini kaldırmak için 10'er dakika 1100°C de tavlandı.

4.2.1. Çoklu yapı-1 numunesinin büyütme süreci

Şekil 4.1'de çoklu yapı-1 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri verildi. Büyütme yüksek sıcaklıkta (1140°C) 0,3 μ m kalınlıkta AlN tampon (buffer) tabaka ile başlatıldı. AlN tampon tabaka üzerine 1100°C'de 10x10 nm periyotlarla sırasıyla AlGaN ve AlN tabakaları 100'er nm kalınlıklarda büyütüldü. Son proseste aynı sıcaklıkta (1100°C) sırayla 400'er nm kalınlıkta Al_{0,43}Ga_{0,57}N tabakaları büyütüldü.



Şekil 4.1. $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ çoklu yapı-1 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri

4.2.2. Çoklu yapı-2 numunesinin büyütme süreci

Çoklu yapı-2 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri Şekil 4.2’de verildi. Büyütme işlemi 11,2 nm kalınlıkta AlN çekirdek (nucleation) tabaka ile başlatıldı. Bu AlN çekirdek tabaka üzerine yüksek sıcaklık (1135°C) düşük basınçta (25 mbar) 0,72 μm kalınlıklı AlN tampon tabaka biriktirildi. AlN tampon tabakadan sonra sırasıyla 1045°C’de (200 mbar) 2,77 μm kalınlıkta GaN ve 1086 °C’de (50 mbar) 1 nm kalınlıkta AlN tabakası büyütüldü. Son proste büyütme aynı sıcaklık ve basınçta (1086 °C ve 50 mbar) 18,8 nm kalınlıklı $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ ve bu tabakanın üzerine 10,6 nm GaN üst tabakası ile sonlandırıldı.

GaN cap (10,6 nm, 1086°C, p=50 mbar)
Al _{0,43} Ga _{0,57} N (18,8 nm, 1086°C, p=50 mbar)
AlN (1 nm 1086°C p=50 mbar)
GaN (2,77 µm, 1045°C, p=200 mbar)
AlN tampon (0,72 µm, 1135°C, p=25 mbar)
AlN nucleation (11,2 nm, t=2,15s)
Safir alttaş (0001) 330 µm

Şekil 4.2. Al_{0,43}Ga_{0,57}N /Al₂O₃ çoklu yapı-2 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri

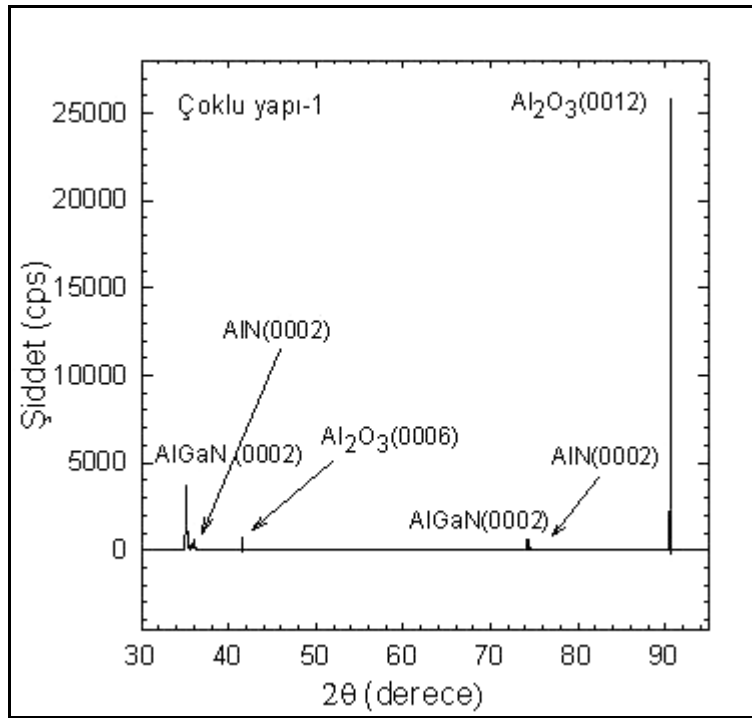
4.3. Karakterizasyon Deneyleri

4.3.1. Çoklu yapı-1 numunesinin karakterizasyonu

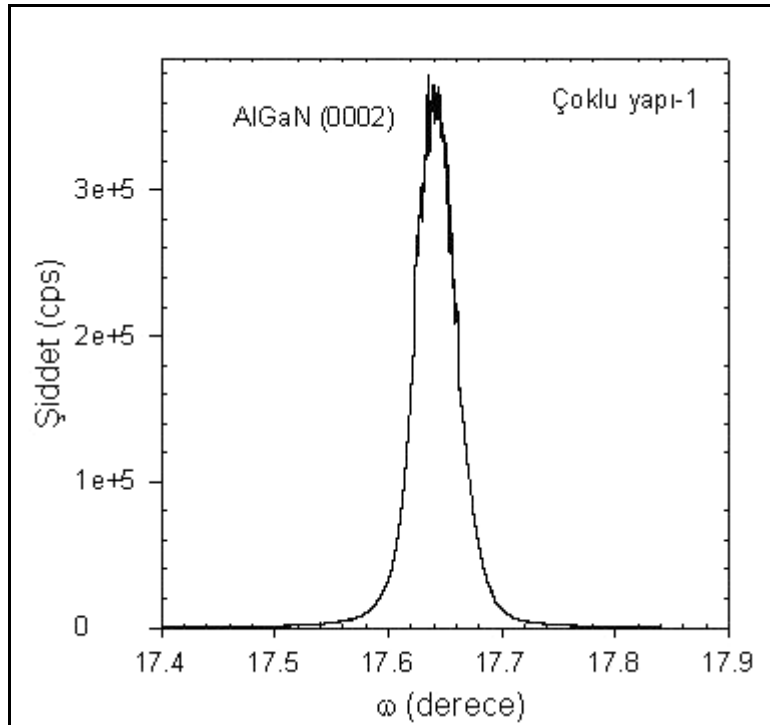
Çoklu yapı-1 numunesinin HR-XRD ile karakterizasyonu

Çoklu yapı-1 numunesinin yüksek çözünürlüklü XRD taraması sonucu elde edilen 2θ grafiği Şekil 4.3’de verildi. Her pikin tabaka yansımaları yüzey yönelimi ve yapıların isimleriyle etiketlendi. Bu şekle göre yapının tabaka pikleri açık olarak görülmektedir.

Çoklu yapı-1’in 2θ grafiğinin en yüksek piki (0012) Al₂O₃’dan gelmektedir (Şekil 4.3). Ayrıca (0002) ve (0004) düzlemlerinin yönelimlerine sırasıyla baktığımızda AlGaN ve AlN pikleri 34,982°, 35,868° ve 74,202°, 76,360° açılarda gözlemlendi. Örnek olarak yapıdaki bu (0002) AlGaN pik açısı literatürle uyumludur [38].

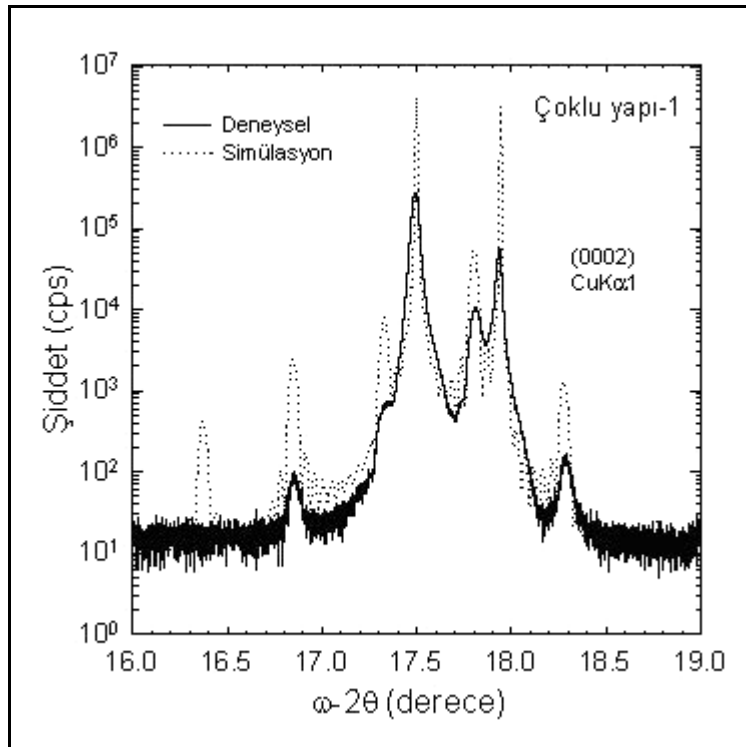


Şekil 4.3. Çoklu yapı-1 numunesinin 2θ grafiği



Şekil 4.4. Çoklu yapı-1 numunesinin AlGaIn (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması

Şekil 4.4’de çoklu yapı-1’in yüksek çözünürlüklü XRD taramasının döndürme (rocking) grafiği sunuldu. Böyle bir ölçümde numune ve dedektör birlikte hareket eder. Numunenin ayarlanmasında (0002) yönelimine dik (100) Azimut ayarlandı. Bu ayarlama sadece numune veya dedektör döndürülerek, döndürme (rocking) tarama ölçümü ile kontrol edilmektedir. Bu taramanın (Şekil4.5) en yüksek şiddette ayarlanması numune yüzeyinin, gelen X-ışınına paralel ayarlandığını gösterir. Ayrıca döndürme pikinin yüksekliğinin yarı genişliği (full width half maximum, FWHM), pik yüksekliği ve pik alanı literatürde yaygın olarak bilinen yüzey kalitesini gösteren özelliklerdir. Örneğin ölçümlerimizde FWHM değeri çoklu yapı-1 için $0,039^\circ$ ’dur. Literatürde Al katkılı yapıların yarı genişliği 200 arcsec değerinin aşağısında başarılı bir büyütme olarak değerlendirilmektedir. Bizim ölçümlerimizde arcsec biriminde çoklu yapı-1’in AlGaN piki için bu değer 140,4 arcsec olarak bulundu. Bu değere göre yapının (0002) yüzeylerinin kaliteli bir yapıya sahip olduklarını söyleyebiliriz.



Şekil 4.5. Çoklu yapı-1 numunesinin ω -2 θ taraması. Noktalar deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir

Bu döndürme eğrilerini yüksek şiddette gördükten sonra yüksek çözünürlükte $w-2\theta$ taraması yapıldı. Bu taramadan yapısal parametreler; kalınlık, Al konsantrasyonu, kütle yoğunluğu, gerilme (strain) ve gevşemeler (relaxation) hesaplandı. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi AlGa_N ve AlN tabakalarından gelen pikler yanında bu yapıların periyodik tekrarlarından gelen uydu (satellite) piklerini veya tabakaların girişimlerinden gelen saçakları (fringe) net bir şekilde görülmektedir.

Ölçümümüzün simülasyonu için ticari LEPTOS 2.0 programı kullanıldı. Bu metot fit işlemlerini yaparken yansıma, kırılma ve girişim teorilerine dayalı olarak kinematik ve dinamik denklemler kullanılır [39]. Çoklu yapı-1 numunesinin XRD ölçümleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’ ve Çizelge 4.2’de ayrıntılı olarak verildi.

Çizelge 4.1. Çoklu yapı-1 numunesinin $w-2\theta$ eğrisinin fit edilmesi ile elde edilen yapısal parametreler

Metarial		Thickness (nm)	Al content (%)	Relaxation (%)	da/a	dc/c	Density (gr/cm ³)
Al _x Ga _{1-x} N		1097,56	54,96	0,0	0,0	2,452x10 ⁻⁰²	4,53210 (nominal=4,95568)
AlN	X10	6,71	-	0,0	0,0	-2,494x10 ⁻⁰²	3,25660
Al _x Ga _{1-x} N		2,98	52,98	0,0	0,0	2,558x10 ⁻⁰²	4,58803
AlN(Buffer)		-	-	0,0	0,0	0,0	3,25660

Bu çizelgeye göre çoklu yapı-1’in kütle yoğunlukları beklenen değerdedir. da/a oranına göre gevşeme derecesi % 0’dır. Bu numune için şu sonucu kesin olarak söyleyebiliriz: Al’un kimyasal oranı aktif tabaka için yüksek değerdedir. Bu sonuç bize Al katkısının iyi kontrol edilmediğini gösterdi. Hatta periyotlar halinde büyütülen AlN tabaka kalınlıkları beklenenden düşük ama aktif tabaka kalınlığına göre yüksek değerde gözlemlendi. AlGa_N tabaka (aktif tabaka) ise hedeflenenden çok düşük bir kalınlıkta büyütüldüğü görüldü.

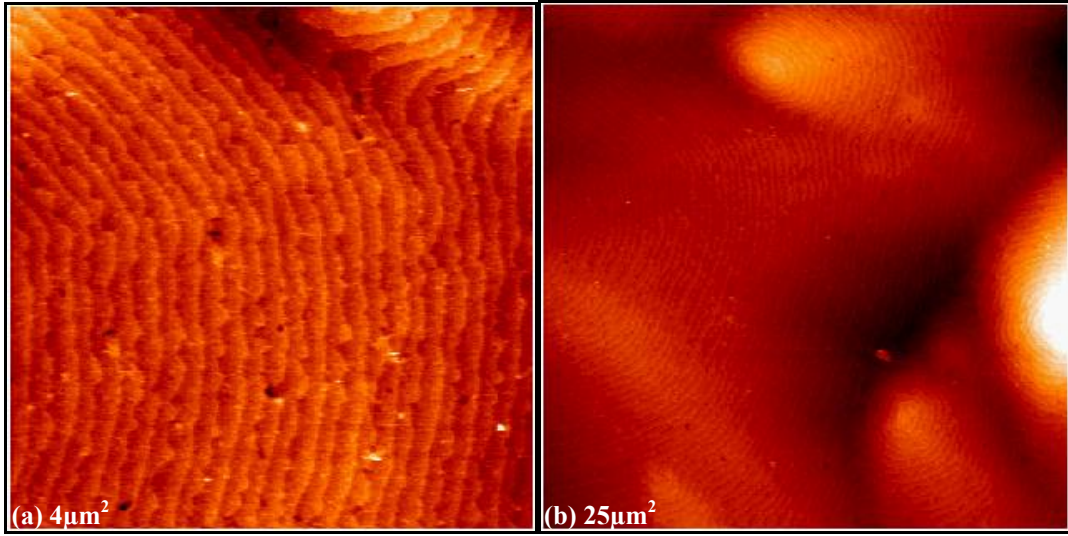
Çizelge 4.2. Çoklu yapı-1 numunesinin (0002) yönelimli $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}$ yüzeyinden yüksek çözünürlüklü XRD taramasında elde edilen döndürme eğrilerinin kalite özellikleri

Çoklu yapı-1 numunesi	
Pik yüksekliğinin yarı genişliği	0,039°
Pikin pozisyon açısı	17,642°
Maksimum şiddet	376251 cps
Pikin altında kalan alan	16865,7 cps.derece

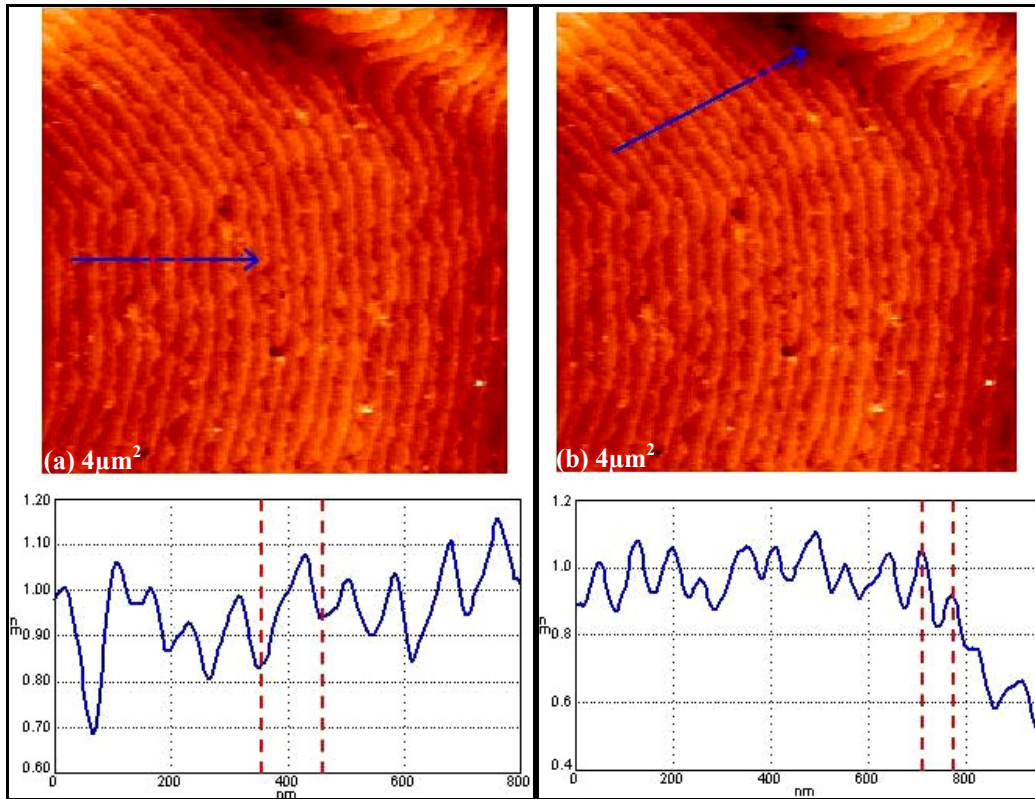
Çoklu yapı-1 numunesinin AFM ile yüzey karakterizasyonu

AFM ölçümleri için 4 ve 25 μm^2 tarama alanları tercih edildi. Bunun nedeni AFM ölçümlerinden, küçük tarama alanlarında (4 μm^2) yüzey üzerindeki kusur çeşitlerinin ve morfolojinin daha iyi belirlenebilmesi, büyük tarama alanlarının da (25 μm^2) ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerinin numuneyi daha iyi temsil etmesidir. Numunelerin AFM görüntülerinde açık renk yükseltiyi, koyu renk ise derinliği göstermektedir.

Çoklu yapı-1'in AlGa_N yüzeyinin oda sıcaklığında alınan 4 ve 25 μm^2 tarama alanlı AFM görüntüleri Şekil 4.6.a ve Şekil 4.6.b'de sunuldu. AFM ölçümleri sonucu elde edilen görüntülerde çoklu yapı-1'in AlGa_N yüzeyi üzerinde step türü morfolojinin var olduğu gözlemlendi. Küçük tarama alanlı AFM görüntüsünde birbirine paralel bu stepler, büyük tarama alanlı görüntüye göre daha iyi ayırt edilebilmektedir. Bunun yanı sıra 4 μm^2 tarama alanlı görüntüde stepler üzerinde siyah noktalar görüldü. Ayrıca büyük tarama alanlı görüntüden çoklu yapı-1'in AlGa_N yüzeyi üzerinde steplerin bazı bölgelerde spiral biçimde toplandığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Çoklu yapı-1 numunesinin a) $4\mu\text{m}^2$ b) $25\mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri

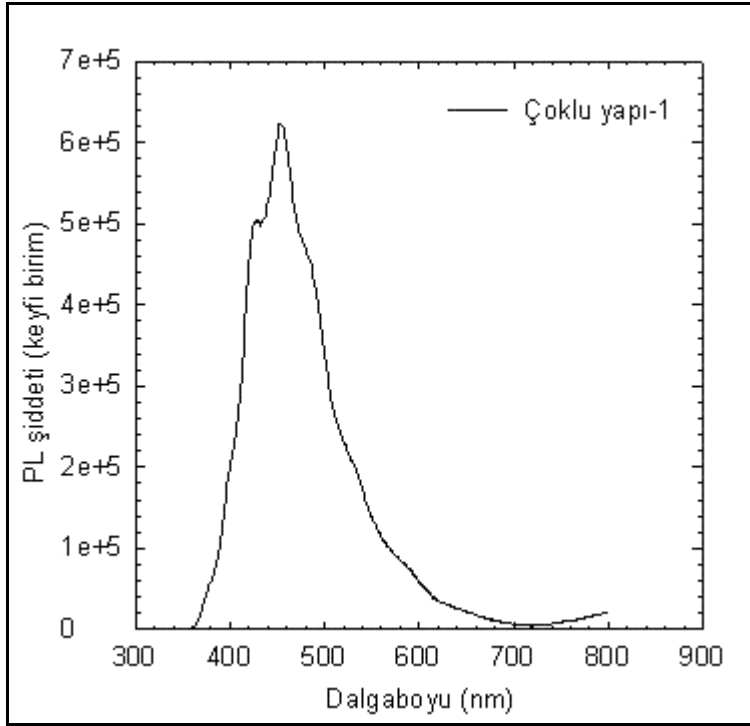


Şekil 4.7. Çoklu yapı-1 numunesinin $4\mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri. a) Yanal step büyüklüğü $\sim 105\text{ nm}$, b) Step yükseklik farkı $\sim 0,22\text{ nm}$ 'dir

Yüzey pürüzlülüğünün bir göstergesi olan rms değerleri, çoklu yapı-1'in AFM ölçümleri sonucunda elde edilen $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı görüntüler için sırasıyla yaklaşık 0,14 ve 0,79 nm'dir. Bu pürüzlülük değerleri AlGaIn yüzeyinin atomiksel düzlüğe sahip olduğunu net bir biçimde ortaya koydu. Farklı tarama alanları için yüzey pürüzlüğünde meydana gelen bu artış büyük tarama alanında yukarıda ifade edilen spiral yoğunluğu ile ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğünün diğer bir göstergesi de step genişliğidir. Buna göre yüzey üzerindeki dar stepler yüzeyin daha pürüzlü, geniş stepler ise yüzeyin daha pürüzsüz olduğu anlamına gelir. Literatürde Torabi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, step genişliği 100 nm ve üzeri olan AlGaIn yüzeylerinin daha pürüzsüz olduğu ifade edilmiştir [40]. Bu çalışmadaki çoklu yapı-1 numunesinin AlGaIn yüzeyi üzerindeki step genişliği yaklaşık 105 nm'dir (Şekil 4.7.a). Bu sonuç Torabi ve arkadaşlarının sonuçları ile uyum içindedir. Ayrıca yüzey üzerindeki step yükseklik farkı $\sim 0,22$ nm olarak bulundu (Şekil 4.7.b). Bu değer bir monolayer AlGaIn'a yakındır.

Çoklu yapı-1 numunesinin PL ile karakterizasyonu

Şekil 4.8'de çoklu yapı-1 numunesinin oda sıcaklığında ölçülen PL spektrumu verilmiştir. Yapıdaki her bir materyalin yasak enerji aralığı, uyarılma foton enerjisinden ($\sim 4,8$ eV) yüksek olduğundan PL spektrumunda banttan-banda geçişlere ilişkin herhangi bir ışıma gözlemlenememiştir. Bu sistemimizde bulunan uyarıcı ışık kaynağının uygun dalga boyunda olmamasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile gözlemlenen ışımlar çoklu yapıdaki çeşitli kusurlardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.8. Çoklu yapı-1 numunesinin fotolüminesans (300K) spektrumu

Işımanın maksimum olduğu enerjinin 2,72 eV (~ 455 nm) olması derin tuzak seviyelerini işaret etmektedir. Dislokasyon, adacıklı yapı ve boşluk (void) yoğunluğunun genellikle lüminesansa önemli etki yapmadığı düşünülürse, elde edilen ışımanın yapıdaki kusurlardan kaynaklandığı söylenebilir [41]. Öte yandan, dislokasyon yoğunluğunun ışınım şiddetine etki ettiği tespit edilmiştir [42]. Oluşması muhtemel kusurlardan bir tanesi N boşluğu (V_N)'dir ve daha çok alıcı özelliği taşır. En yakın komşu Ga atomu N boşluğuna sıçrayabilir ve V_N kusuru V_{Ga} kompleksine dönüşür ve bu kompleks, verici özelliği taşır [43]. Gözlemlenen ışımanın çoklu yapı-1 yapısında olması muhtemel oksijen kaynaklı bir bileşeni de olabilir. Ayrıca, ara yüzlerde oluşan kusurların da bu PL spektrumuna etkisi göz ardı edilmemelidir.

Çoklu yapı-1 numunesinin içerdiği kusurların PL spektrumu ile tartışmasız ilişkilendirilebilmesi için düşük sıcaklıklarda ölçüm yapılması ve lüminesans karakterinin sıcaklıkla değişiminin gözlemlenmesi gerekir.

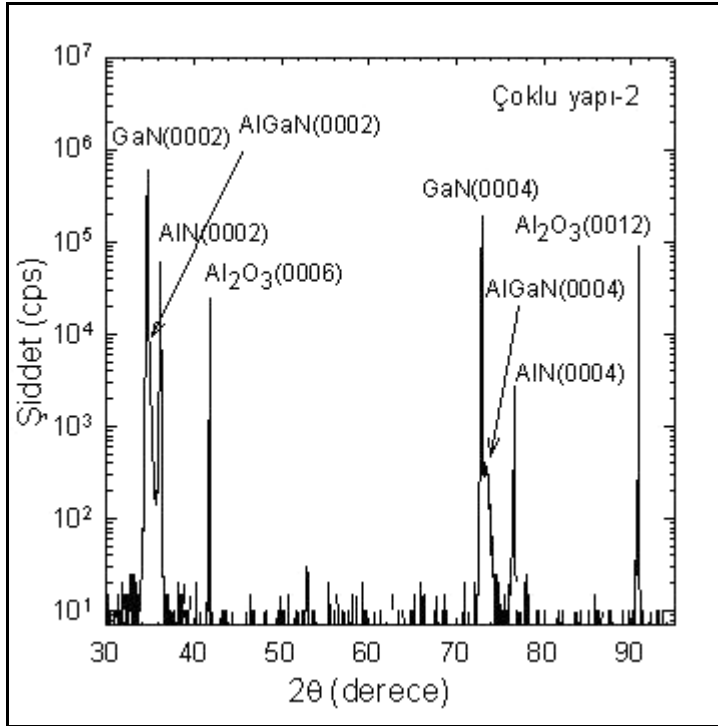
4.3.2. Çoklu yapı-2 numunesinin karakterizasyonu

Çoklu yapı-2 numunesinin HR-XRD ile karakterizasyonu

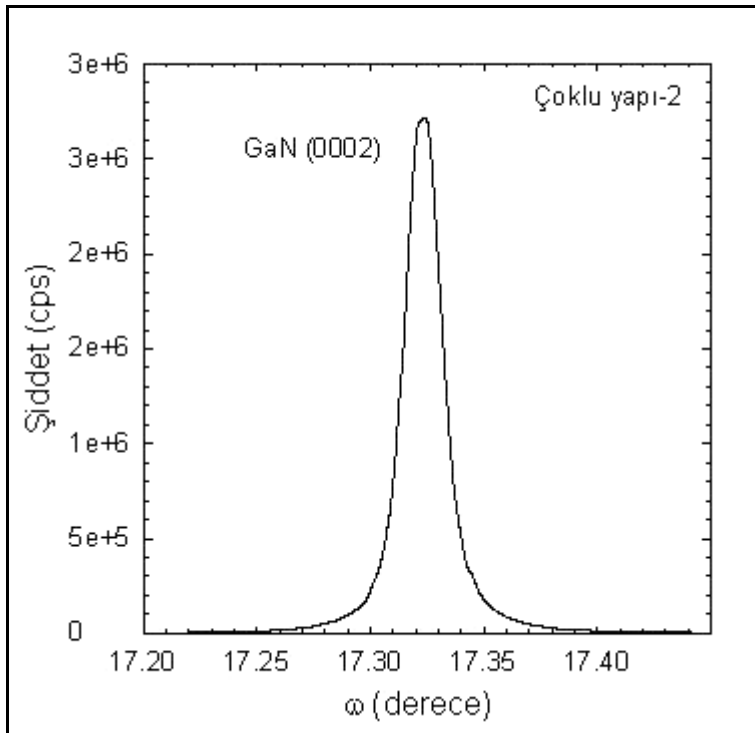
Çoklu yapı-2 numunesinin yüksek çözünürlüklü XRD taraması sonucu elde edilen 2θ grafiği Şekil 4.9'da verildi. Grafikte yapının tabaka yansımalarından gelen her pik yüzey yönelimi ve tabaka isimleriyle etiketlendi.

Çoklu yapı-2'nin 2θ grafiğinde en yüksek pik Al_2O_3 (0012) olarak görülmektedir (Şekil 4.9). (0002) ve (0004) düzlemlerin yönelimlerine sırasıyla baktığımızda GaN, AlGaIn ve AlN pikleri $34,639^\circ$, $34,800^\circ$, $36,200^\circ$ ve $72,919^\circ$, $73,440^\circ$ ve $76,645^\circ$ açılarda gözlemlendi.

Numunelerin yapısal parametrelerini elde edebilmek için (kalınlık, konsantrasyon, gerilme...) yüksek çözünürlüklü monochromatorlerin kullanılması gerekir. Kesin bir yüksek çözünürlükte ölçüm için Ge (022) yönelimli dört kristal yaygın olarak kullanılmaktadır. Böyle bir monochromatorün kullanılması ile örneğin Si'un (001) yönelimli ölçümde en yüksek çözünürlük $0,00435^\circ$ olarak ölçüldü ve bu arcsec (derece 3600 ile çarpılarak elde edilir) biriminde 15,6 değerindedir. Dolayısıyla ölçümlerimiz için böyle bir monochromator kullanıldı.

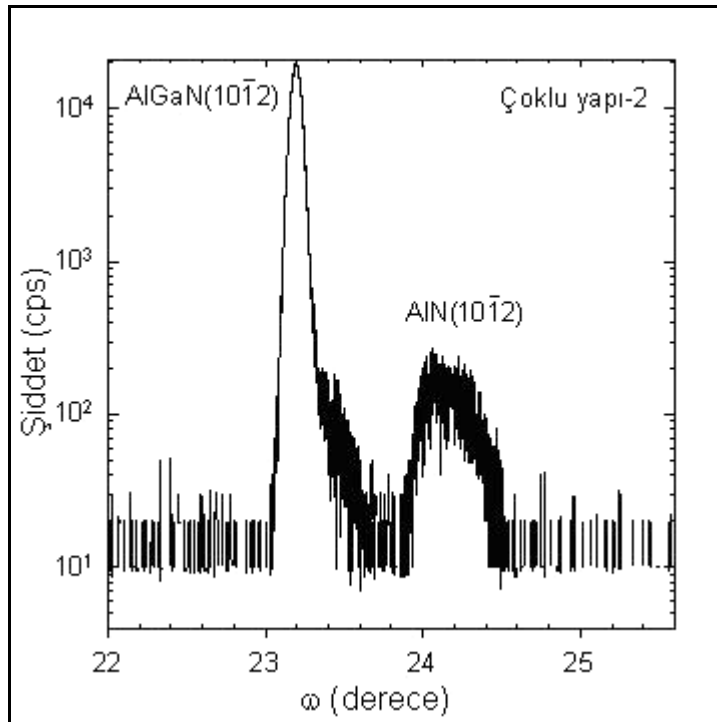


Şekil 4.9. Çoklu yapı-2 numunesinin 2θ grafiği



Şekil 4.10. Çoklu yapı-2 numunesinin GaN (0002) yöneliminin döndürme (rocking) taraması

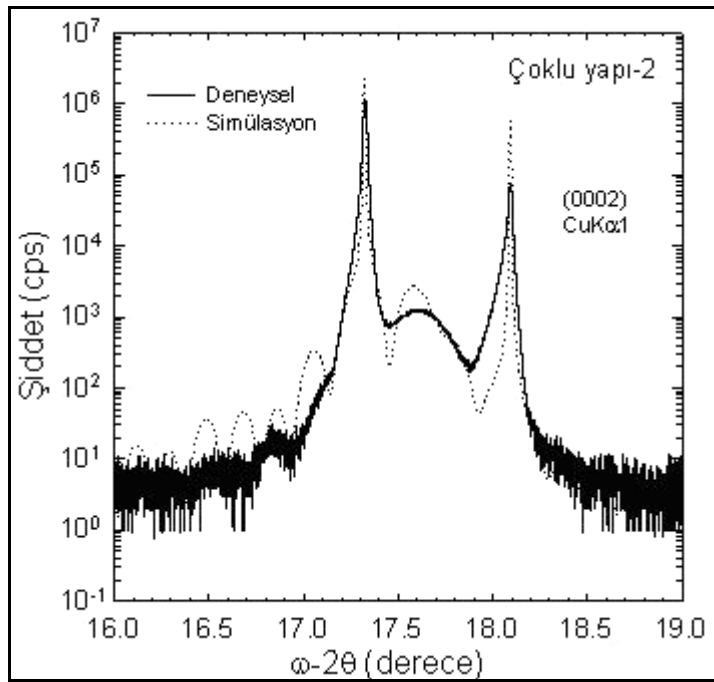
Şekil 4.10'da çoklu yapı-2'nin yüksek çözünürlüklü XRD taramasının döndürme (rocking) grafiği verildi. Ölçümlerimizde pik yüksekliğinin yarı genişliği (FWHM) çoklu yapı-2'nin (0002) yönelimli GaN piki için $0,019^\circ$ yani 68 arcsec'dır. Literatürde GaN tabakalarının (0002) yönelimli döndürme eğrileri sonucu elde edilen tipik FWHM değeri 250–300 arcsec civarındadır [44]. Bu değerlere göre numunenin (0002) yönelimli GaN yüzeylerinin kaliteli olduğu sonucuna varıldı.



Şekil 4.11. Çoklu yapı-2 numunesinin AlGaIn ve AlN ($10\bar{1}2$) yöneliminin döndürme (rocking) taraması

Tabii ki incelediğimiz her iki numunenin de AlN veya GaN tabakaları hekzagonal wurtzite yapıdadır. Bu inceleme hekzagonal yapının farklı bir yüzeyini gözlemleyerek de yapılabilir. Burada yalnızca çoklu yapı-2 için ($10\bar{1}2$) yönelimli döndürme taraması yapıldı. Bu ölçümlere göre AlGaIn ve AlN pikleri Şekil 4.11'de gösterildi. Bu şekle göre pik yüksekliklerinin yarı genişliklerinden (FWHM) AlGaIn için $0,076^\circ$ ve AlN için $0,175^\circ$ değerleriyle görmekteyiz. Böylelikle yüksek şiddet elde edildi.

Çoklu yapı-2 numunesinin ($10\bar{1}2$) döndürme eğrileri sonucunda elde edilen FWHM değerleri AlGaN için 273,6 arcsec, AlN için ise 630 arcsec olarak hesaplandı. Safir alttaş üzerine büyütülen AlN tabakalarının ($10\bar{1}2$) döndürme eğrileri sonucunda elde edilen tipik FWHM değeri 1000 arcsec civarındadır [44]. Buna göre bu numunenin AlN tabakalarının ($10\bar{1}2$) FWHM değerinin (630 arcsec) literatürle uyumlu olduğu ve kaliteli bir yüzeye sahip olduğu sonucuna varıldı.



Şekil 4.12. Çoklu yapı-2 numunesinin $w-2\theta$ taraması. Noktalar deneysel eğriye fit edilerek bulunan eğriyi gösterir

Çoklu yapı-2'nin karakterizasyonunda kullandığımız diğer bir XRD taraması, $w-2\theta$ grafiği Şekil 4.12'de verildi. Bu taramadan yapısal parametreler (kalınlık, Al konsantrasyonu, kütle yoğunluğu, gerilme ve gevşeme) hesap edildi. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi AlGaN ve AlN tabakalarından gelen pikler yanında tabakaların girişimlerinden gelen saçaklar (fringe) net bir şekilde görülmektedir.

HR-XRD ölçümlerinde her iki numune için de AlN tabakası referans olarak alındı. Burada alttaşın referans olarak alınmamasının sebebi örgü yapısından kaynaklanmaktadır. Alttaşın örgü yapısı AlGaN'a göre farklıdır. Bu 2θ grafiğinde

(Bkz. Şekil 4.3) safirin (0006) piki AlGa_N göre çok uzak bir açı değerinde (41°) görüldü. Bu yüzden aktif tabakaya uygun örgüde bir alttaşın büyütülmesi gerekmektedir. Örgü uyumluluğunun olabilmesi gerilme veya gevşeme etkilerini bertaraf edecek yapıda uygun bir modda büyütülmesi gerekir. Basit bir örnekle açıklanacak olursa; örneğin küp şekerlerinin kutu içinde yüzeye dik uzayarak dizilişleri, yani gerilme istenen bir durumdur. Fakat kutunun altındaki küpler üzerine yerleştirilen şeker küplerinin yanal boylarının uzun olması yani şekerlerin rahatlayarak genişlemesi istenmeyen bir durumdur. Bu durum kalitesiz ara yüzeyleri ortaya koyar. Tabi ki bu durum elektronik aygıtın performansını da sınırlar. Literatürde bu etkileri göz önüne alarak AlGa_N filmlerin büyütmeleri için vida tipte tampon tabaka büyütme yapılır. Örgü yapısı uygun bir tampon tabaka büyütüldükten sonra yine tampon tabakaya uyumlu aktif tabaka ya da tabakalar büyütülebilir. Bu büyüme şartlarının doğruluğunu test etmek için $w-2\theta$ ölçümlerine uygun bir model olarak simüle edilmesi gerekir. Bu nedenle ölçümlerimizin simülasyonu için ticari LEPTOS 2.0 programı kullanıldı [39]. Çoklu yapı-2'nin XRD ölçümleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de ayrıntılı olarak verildi.

Çizelge 4.3. Çoklu yapı-2 numunesinin $w-2\theta$ eğrisinin fit edilmesi ile elde edilen yapısal parametreler

Metarial	Thickness (nm)	Al content (%)	Relaxation (%)	da/a	dc/c	Density (gr/cm ³)
GaN	8,42	-	89,2	$9,025 \times 10^{-03}$	$1,819 \times 10^{-02}$	6,08840
Al _x Ga _{1-x} N	15,42	43,52	92,9	$-5,372 \times 10^{-03}$	$3,471 \times 10^{-02}$	4,85586
AlN	0,97	-	0,000	0,0	$-5,255 \times 10^{-02}$	3,25660
GaN	3151,64	-	80,5	$1,976 \times 10^{-02}$	$4,338 \times 10^{-02}$	6,08840
AlN(Buffer)	-	-	0,000	0,0	0,00	3,25660

Çizelge 4.3'e baktığımızda çoklu yapı-2 için kütle yoğunlukları GaN üst tabakası hariç beklenen değerdedir. Tabaka kalınlıkları hedeflenen değerlere uygun bulundu. Gerilmelerin ise sıfıra yakın olduğu belirlendi. Fakat AlGa_N'nün yüzey gerilme veya gevşeme normalin üzerinde gözlemlendi. Gevşemenin gözlenmesi yapının elektronik aygıt olma özelliğini olumsuz etkilemektedir.

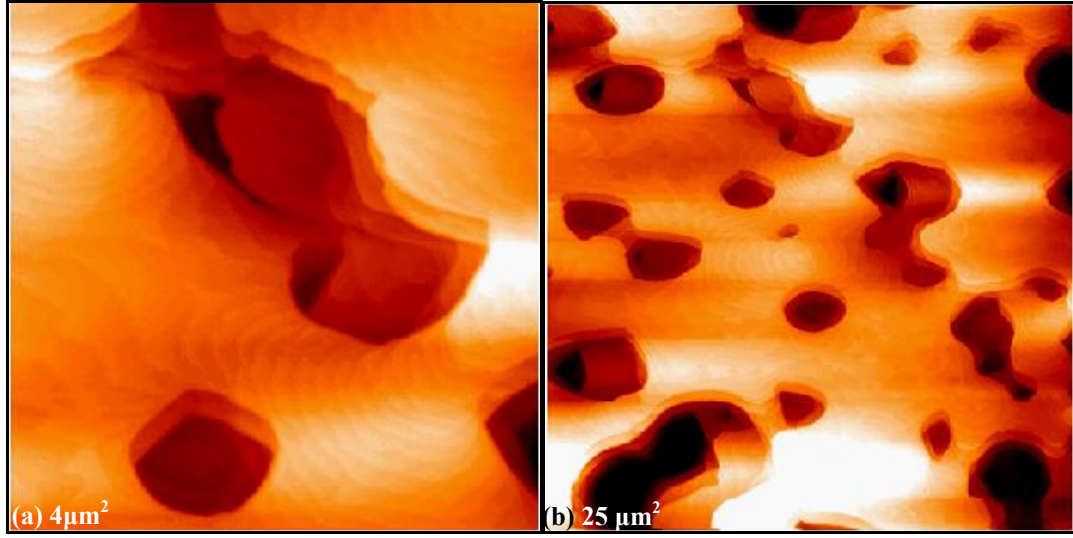
Çizelge 4.4. Çoklu yapı–2 numunesinin (0002) yönelimli GaN yüzeylerinden yüksek çözünürlüklü XRD taramasında elde edilen döndürme eğrilerinin kalite özellikleri

Çoklu yapı–2 numunesi	
Pik yüksekliğinin yarı genişliği	0,019°
Pikin pozisyon açısı	17,275°
Maksimum şiddet	2717002 cps
Pikin altında kalan alan	64838,1 cps.derece

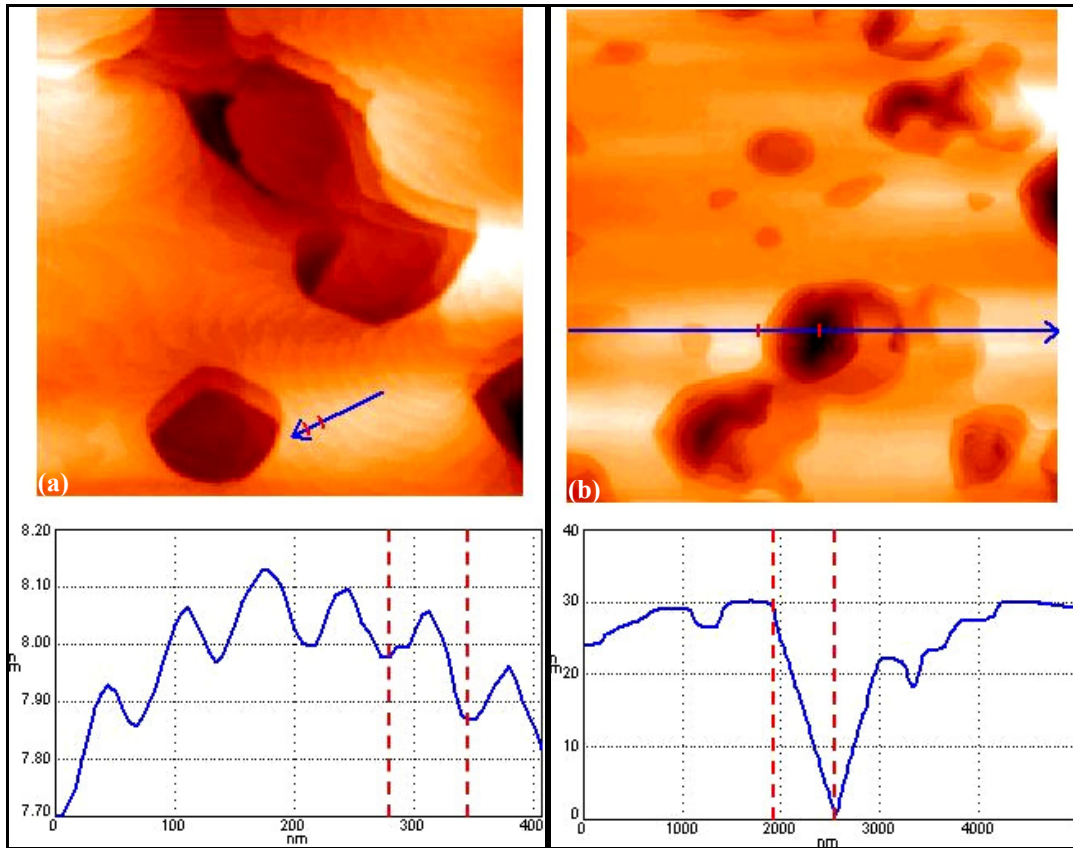
Çoklu yapı–2 numunesinin AFM ile yüzey karakterizasyonu

Şekil 4.13.a ve Şekil 4.13.b sırasıyla çoklu yapı–2 numunesinin en üst GaN tabakasının $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntülerini gösterir. Her iki görüntüde de yüzey üzerinde stepler ve terasların yanı sıra derin çukurların olduğu gözlemlendi. Küçük tarama alanlı ($4 \mu\text{m}^2$) görüntülerde bu stepler ve çukurlar daha belirgin bir biçimde görüldü. Yüzey üzerindeki yaklaşık 60–80 nm genişlikli (Şekil 4.14.a) bu stepler ve teraslar temelde step-flow büyüme modunun baskın olduğunu öne sürmesine rağmen derin çukurlar büyümenin tam anlamıyla step-flow olmadığını açık bir biçimde göstermektedir.

Şekil 4.14.b’de de görüldüğü gibi çukurların derinliği yaklaşık 29,2 nm’dir. Bu derinlik dikkate alındığında kalın GaN tampon tabaka üzerinde, bu kusurların mevcut olduğu bölgelerde büyümenin gerçekleşmediği sonucuna varılabilir. Ayrıca çukurlar içinde GaN yüzeyi üzerinde, AFM görüntülerinde siyah noktalar olarak ortaya çıkan vida tipi dislokasyonlara benzer siyah noktaların olduğu gözlemlendi. Kusurların dibindeki bu siyah noktaların GaN tabaka yüzeyindeki vida tipi dislokasyonlara karşılık gelmesi olasıdır.



Şekil 4.13. Çoklu yapı-2 numunesinin GaN tabakasının a) $4 \mu\text{m}^2$ b) $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri

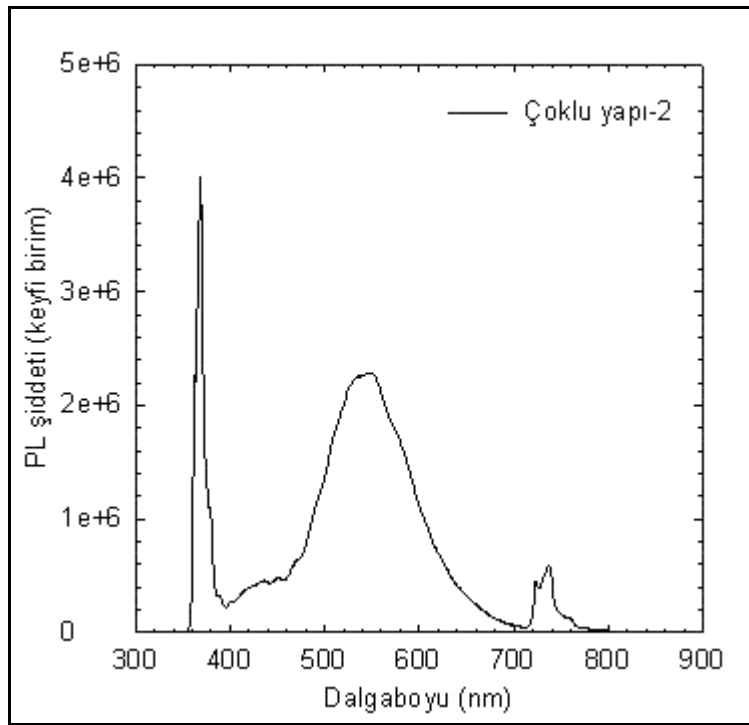


Şekil 4.14. Çoklu yapı-2 numunesinin $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri
a) Yanal step büyüklüğü $\sim 67 \text{ nm}$, b) Çukur derinliği $\sim 29,2 \text{ nm}$ 'dir

GaN yüzeyinin $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri için yüzey pürüzlülük değerleri (rms) sırasıyla 1,5 nm ve 3,1 nm olarak bulundu. Büyük tarama alanlı görüntünün yüzey pürüzlüğünün büyük olması yüzey üzerindeki çukur yoğunluklarıyla ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğünün birkaç nm oluşu çoklu yapı-2 yüzeyinin oldukça düz (pürüzsüz) olduğunu açık bir biçimde gösterdi.

Çoklu yapı-2 numunesinin PL ile karakterizasyonu

Şekil 4.15’de çoklu yapı-2’nin oda sıcaklığında (300K) ölçülen PL spektrumu verildi.



Şekil 4.15. Çoklu yapı-2 numunesinin fotolüminesans (300K) spektrumu

Yaklaşık 3,4 eV’daki (~ 365 nm) keskin pik, çoklu yapı-2 numunesindeki wurtzite GaN tabakasının enerji bant aralığına karşılık geldiği görüldü. Bulduğumuz bu sonuç literatürdeki wurtzite GaN’ün 3,42 eV (300 K) bant aralığı enerjisi ile uyumludur [1]. Yaklaşık 550 nm’de görülen sarı-yeşil emisyon piki iletim bant kenarının aşağısında

yaklaşık 2,25 eV'ta derin akseptör seviyeleri ile ilişkilendirilebilir [1]. 1,68eV (~735 nm)'daki infrared emisyon piki yapıdaki çeşitli kusurlardan kaynaklanması olasıdır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında MOCVD tekniği ile büyütülen çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 $\text{Al}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ süperörgü ince filmlerin yapısal ve optiksel özellikleri, yüksek çözünürlüklü X-ışını difraksiyon (HR-XRD) cihazı, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) sistemleri kullanılarak incelendi.

Yüksek çözünürlüklü X-ışını difraksiyonu (HR-XRD) ile yapılan kırınım desenleri analizleri sonucunda her iki yapının kalınlık, Al konsantrasyonu, kütle yoğunluğu, gerilme (strain) ve gevşeme (relaxation) gibi yapısal parametreleri hesap edildi ve çizelgeler halinde sunuldu.

HR-XRD sonuçlarının, hedeflenen büyütme şartlarıyla birkaç durum dışında uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca bu sonuçlardan numunelerin wurtzite yapıda olduğu ve kristal kalitesinin iyi olduğu sonucuna varıldı.

Yüksek çözünürlüklü XRD tarama sonuçlarının literatürle uyum içerisinde olduğu görüldü. Örnek olarak bizim çalışmalarımızda çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2'nin 2 θ grafiklerinin (0002) yönelimli AlGaN pik pozisyonları sırasıyla 34,982° ve 34,800° olarak bulundu. Bulduğumuz bu değer literatür trendleri ile uyumludur ve numunelerin uygun kristal yapılara sahip olduğunu destekler [38].

XRD ölçüm sonuçlarının başka bir literatür karşılaştırmasında, safir alttaş üzerine büyütülen AlN tabakalarının (10 $\bar{1}$ 2) döndürme eğrileri sonucunda elde edilen tipik FWHM değeri 1000 arcsec civarında olduğu belirlendi [45]. Çoklu yapı-2 numunesinin (10 $\bar{1}$ 2) döndürme eğrileri sonucunda elde edilen FWHM değerleri AlN için 630 arcsec olarak hesaplandı. Buna göre bu numunenin AlN tabaka değerinin (630 arcsec) literatürle uyumlu olduğu ve AlN tabakalarının kaliteli bir yüzeye sahip olduğu sonucuna varıldı. Ayrıca (0002) döndürme eğrisinin FWHM değeri çoklu yapı-2'nin GaN tabakaları için 68 arcsec olduğu hesaplandı. Aynı literatürde GaN tabakalarının (0002) yönelimli döndürme eğrileri sonucu elde edilen tipik FWHM

değeri 250–300 arcsec civarındadır [44]. Bu değerlere göre çoklu yapı–2’nin GaN yüzeylerinin kaliteli olduğu sonucuna varıldı.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sonuçları ile çoklu yapı–1 numunesinin AlGaN yüzeyinin step-flow büyümeye ve atomiksel düzlükte bir yüzeye sahip olduğunu, çoklu yapı–2 yüzeyinin de pürüzsüz olduğu, fakat bunun yanında yapının yüzeyinde ve ara tabakalardan kaynaklanan bazı kusurların da mevcut olduğu gözlemlendi.

AFM yüzey taraması sonucunda bir yüzey üzerindeki dar stepler yüzeyin daha pürüzlü, geniş stepler ise yüzeyin daha pürüzsüz olduğu anlamına gelir. Literatürde yapılan çalışmada, step genişliği 100 nm ve üzeri olan AlGaN yüzeylerinin daha pürüzsüz olduğu ifade edilmiştir [40]. Bu çalışmadaki çoklu yapı–1 numunesinin AlGaN yüzeyi üzerindeki step genişliği yaklaşık 105 nm’dir. Bu sonuca göre yüzey pürüzlülüğü cihaz uygulamaları için kabul edilebilir seviyededir.

Çoklu yapı–1 ve çoklu yapı–2 numunelerinin oda sıcaklığında (300K) ölçülen fotoluminesans (PL) spektrumları, yapılardaki AlGaN yasak enerji bant aralığı uyarılma foton enerjisinden ($\sim 4,8$ eV) yüksek olduğundan çoklu yapı–2’nin GaN tabakası hariç PL spektrumunda banttan-banda geçişlere ilişkin herhangi bir ışıma gözlemlenemedi. Ayrıca çoklu yapı–2’nin yaklaşık 3,4 eV enerjili GaN PL spektrumu ise literatürdeki wurtzite GaN’ün enerji bant aralığına karşılık geldiği görüldü [1].

Yapılan bu karakterizasyonlardan her iki AlGaN süperörgü yapılarının iyi kalitede ve cihaz uygulamalarına uygun yapıda olduğu sonucuna varıldı.

KAYNAKLAR

1. Morkoç, H., “ Nitride semiconductors and devices”, Hull, R., Osgood, Jr., R.M., Sakaki, H., Zunger, A., **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, Germany, 1-39, 45-80, 83-141, 163, 332-336 (1999).
2. Pankove, J.I., Miller, E.A., Berkeyheiser, J.E., “GaN electroluminescent diodes”, **RCA Rev.**, 32: 383 (1971).
3. Amano, H. et. al., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, **Appl. Phys. Lett.**, 48: 353 (1986).
4. Nakamura, S., “GaN growth using GaN buffer layer,” **Jpn. J. Appl. Phys.**, 30: L1705 (1991).
5. Amano H. et al., “P-type conduction in Mg-doped GaN treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)”, **Jpn. J. Appl. Phys.**, 28: L2112 (1989).
6. Nakamura, S. et. al., “Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films”, **Jpn. J. Appl. Phys.**, 31: L139 (1992).
7. Morkoç, H., Cingolani, R., Gil, B., “Polarization effects in nitride semiconductor and device structures”, **Springer-Verlag**, Germany, 3: 97 (1999).
8. Strite, S., Morkoç, H., “GaN, AlN and InN: A Review”, **Journal of Vacuum Science and Technology**, B10: 1237 (1992).
9. Omnès, F., Marenco, N., Beaumont, B., Ph. de Mierry, Monroy, E., Calle, F., Muñoz, E., “Metalorganic vapor-phase epitaxy-grown AlGaIn materials for visible-blind ultraviolet photodetector applications,”, **J. Appl. Phys.**, 86: 5286-5292 (1999).
10. Jacobs, B., “ Towards integrated AlGaIn/GaN based x-band high-power amplifiers”, **Technische Universiteit Eindhoven**, Eindhoven, 14-15 (2004).
11. Orton, J. W., Foxon, C. T., “Group III Nitride Semiconductors for Short Wavelength Light-Emitting Devices”, **Rep. Prog Phys.**, 61: 1-75 (1998).
12. Özkaya S., “GaAs/Al_{0,2}Ga_{0,8}As süperörgünün optiksel özelliklerinin fotoluminesans yöntemiyle incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 10-14, 24 (2005).
13. Gezci S., “Katılmal fiziği”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası**, Gümüşsuyu, 32-38 (1992).

14. Razeghi, M., "Optoelectronic devices based on III–V compound semiconductors which have made a major scientific and technological impact in the past 20 years", *IEEE J.Select. Topics Quant. Electron.*, 6: 1344-1354 (2000).
15. Pankove, J. I., "GaN: from fundamentals to applications", *Mat. Sci. Engin.*, B61-62: 305-309 (1999).
16. 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", *J. Appl. Phys.*, 76: 1363-1398 (1994).
17. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y., "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer", *Appl. Phys. Lett.*, 48: 353-355 (1986).
18. Kato, Y., Kitamura, S., Hiramatsu, K., Sakai, N., "Selective growth of wurtzite GaN and $Al_xGa_{1-x}N$ on GaN/sapphire substrates by metalorganic vapor phase epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 144: 133-140 (1994).
19. Kung, P., Walker, D., Hamilton, M., Diaz, J., Razeghi, M., "Lateral epitaxial overgrowth of GaN films on sapphire and silicon substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 74: 570-572 (1999).
20. Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto, Y., "Characteristics of InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes" *Appl. Phys. Lett.*, 68: 3269-3271 (1996).
21. Kuramata, A., Kubota, S., Soejima, R., Domen, K., Horino, K., Tanahashi, T., "Room-temperature continuous wave operation of InGaN laser diodes with vertical conducting structure on SiC substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37: L1373-1379 (1998).
22. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y., "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer", *Appl. Phys. Lett.*, 48: 353-355 (1986).
23. Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., "Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaIn Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 64: 1687–1689 (1994).
24. Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita, T., Kiyoku, H., Sugimoto Y., "Characteristics of InGaN Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 68: 3269–3271 (1996).
25. Morkoç, H. Botchkarev, A., Salvador, A. et. al., "GaN based III-V nitrides by molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 150: 887-891 (1995).

26. Bıyıklı N., “High-performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ based uv photodetectors for visible/solar-blind applications”,Doktora Tezi, **The Institute of Engineering and Sciences of Bilkent University**, Ankara, 29-34 (2004).
27. Razeghi, M., “Short-Wavelength Solar-Blind Detectors-Status, Prospects, and Markets,” **Proc. of IEEE**, 90: 1006-1014 (2002).
28. Gotz, W., Kern, R. S., Chen, C. H., Liu, H., Steigerwald, D. A., Fletcher, R. M., “Hall-effect characterization of III–V nitride semiconductors for high efficiency light emitting diodes” **Mat. Sci. Engin.**, B59: 211-217 (1999).
29. Cebe S., “GaN yarıiletken ince filmlerin optik özelliklerinin fotolüminesans tekniği ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 6 (2004).
30. Zhou, L., Smith, J. D., Storm, D. F., Katzer, D. S., Binari, S. C., and Shanabrook, B. V., “Effect of Al/N flux ratio during nucleation layer growth on the microstructure of GaN films grown by MBE”, **Appl. Phys. Lett.**, 88: 011916 (2006).
31. Miyoshi, M., Egawa, T., Ishikawa, H., Asai, A. I., Shibita, T., Tanaka, M., and Oda, O., “Nanostructural characterization and two-dimensional electron-gas properties in high-mobility AlGa_N/AlN/GaN heterostructures grown on epitaxial AlN/sapphire templates”, **J. Appl. Phys.**, 98: 063713 (2005).
32. Arulkumaran, S., Egawa, T., Ishikawa, H., and Jimbo, T., “Characterization of different-Al-content $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN hetrostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire”, **J. Vac. Sci. Technol.**, B21: 2 (2003).
33. Wilson J., Hawkes, J.F.B., “Optoelektronik”,Okur İ., **Değişim yayınları**, Adapazarı, 311-325 (2000).
34. Sarıkavak., B., “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs ($x=0,15$) süperörgüsünün MBE ile büyütülmesi ve elektriksel-yapısal özelliklerinin belirlenmesi”,Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 46-49 (2005).
35. Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M. , Soliman, H.H., “Roughness parameters”, **Journal of Materials Processing Technology**, 123: 133-145 (2002).
36. Cheal,R.L., Yong, J.P., “Characteristics of UV photodetector fabricated by $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ / GaN heterostructure”, **J. Cryst. Growth**, 252: 51-57 (2003).
37. Schmidtling, T., Pohl, U.W., Richter, W., “In situ spectroscopic ellipsometry study of GaN nucleation layer growth and annealing on sapphire in metal organic vapor phase epitaxy”, **J. Appl. Phys.**, 98 (33522): 1-5 (2005).

38. Gong, J. R., Liao, W. T., Hsieh, S. L., Lin, P. H., Tsai, Y. L., "Strain-induced effect on the Al incorporation in AlGa_N films and the properties of AlGa_N/Ga_N heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Journal of Crystal Growth*, 249: 32 (2003).
39. LEPTOS User Manual (www.bruker-axs.de), Order no M88-E02052., Version 2.0, June 17, (2004).
40. Torabi, A., Ericson, P., Yarronton, E. J., Hoke, E., "Surface and interface Characterization of Ga_N/AlGa_N high electron mobility transistor structures by x-ray and atomic force microscopy", *J. Vac. Sci. Technol.* B20(3): 1234 (2002).
41. Reshchikov, M. A., Morkoç H., "Luminescence properties of defects in Ga_N", *J. Appl. Phys.*, 97 (061301): 6-7 (2005).
42. Fälth, J. F., Gurusinghe, M. N., Liu X. Y., Andersson T. G., Ivanov, I. G., Monemar, B., Yao, H. H., Wang, S. C., "Influence of dislocation density on photoluminescence intensity of Ga_N", *J. Cryst. Growth*, 278: 406-410 (2005).
43. Look, D. C., Reynolds, D. C., Jones, K. L., Kim, W., Aktaş, Ö., Botchkarev, A., Salvador, A., Morkoç, H., "Electrical and optical properties of semi-insulating Ga_N", *Materials Science and Engineering*, B44: 423-426 (1997).
44. Bai, J., Wang, T., Comming, P., Parbrook, P. J., David, J. P. R., Cullis, A. G., "Optical properties of AlGa_N/Ga_N multiple quantum well structure by using a high-temperature AlN buffer on sapphire substrate", *J. Appl. Phys.*, 99 (023513): 2-3 (2006).
45. Wang, C. L., Gong, R., "Properties of LT-AlGa_N films and HT-Ga_N films using LT-AlGa_N buffer layers grown on (0001) sapphire substrates", *Journal Of Materials Science*, 16: 107-110 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TECİMER, Hüseyin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 09.05.1981 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0555 256 33 95
Faks :-
e-mail : htecimer81@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2007
Tezsiz yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Gazi Üniversitesi Fizik Öğretmenliği	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2003
Lise	Kanuni Lisesi	1997

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, masa tenisi, otomobil