



**AlInN HEMT TEMELLİ YAPILARIN
NOKTASAL YAPI KUSURLARININ İNCELENMESİ**

Erkan HEKİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Erkan HEKİN

03/01/2025

AlInN HEMT TEMELLİ YAPILARIN
NOKTASAL YAPI KUSURLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Erkan HEKİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, GaN/AlInN/AlN yüksek elektron hareketine sahip transistör (HEMT) yapı örnekleri “Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (MOCVD)” kullanılarak Al_2O_3 üzerinde büyütüldü. Büyütülen örneklerin yapısal mozik kusurları “Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım (HRXRD)” cihazı ile incelendi. Eğim açısı, yanal ve dikey mozaik kristal boyut, vida ve kenar dislokasyon yoğunlukları In değerine bağlı olarak Wiliamson Hall (WH) metodu kullanılarak saptandı. Değişik In oranlarında kusurlar artan veya azalan eğilimler sergiledi. Büyütülen tabakaların uygun sıcaklıkta uygun büyütme oranına ulaştığı gözlemlendi. Örneklerin yüzey morfolojisi atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) yöntemi ile optik karakteristik özellikleri Raman Spektroskopisi ve Fotoluminesans (PL) ölçme tekniği ile gerçekleştirildi. Örnekler için epitaksiyel tabakaların kristal kalitesinin B, A ve C örneğine göre düştüğü görüldü.

Bilim Kodu : 20203

Anahtar Kelimeler : GaN/AlInN/AlN/Safir HEMT, XRD, yapı kusurları, noktasal kusurlar, zorlama, gerilme

Sayfa Adedi : 93

Danışman : Doç. Dr. Yunus ÖZEN

INVESTIGATION OF STRUTURAL POINT DEFECTS OF
AlInN HEMT BASED STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Erkan HEKİN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

In this thesis, GaN/AlInN/AlN high electron mobility transistor (HEMT) structure samples were grown on Al_2O_3 using “Metal Organic Chemical Vapor Deposition Method (MOCVD)”. Structural mosaic defects of the grown samples were examined with “High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD)” device. Inclination angle, lateral and vertical mosaic crystal size, screw and edge dislocation densities were determined using the Wiliamson Hall (WH) method depending on the In value. Defects exhibited increasing or decreasing trends at different In ratios. It was observed that the grown layers reached the appropriate growth ratio at the appropriate temperature. The surface morphology of the samples was carried out by atomic force microscopy (AFM) method and optical characteristic features were carried out by Raman Spectroscopy and Photoluminescence (PL) measurement technique. It was observed that the crystal quality of the epitaxial layers for the samples decreased compared to the B, A and C samples.

Science Code : 20203

Key Words : GaN/AlInN/AlN/Safir HEMT, XRD, structure defeccts, incestigation of point, strain, stress

Page Number : 93

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yunus ÖZEN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanmasında bilgi ve tecrübeleri ile destek olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Yunus ÖZEN, değerli hocalarım Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK ve Prof. Dr. Halit ALTUNTAŞ’a teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmalarına her türlü imkânı sağlayan ölçümler ile analizlerin alındığı “Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi” ile örneklerin üretildiği “Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezine” teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda yardımcı olan tüm arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Çalışmam süresince hayatın her anında yardımcı ve destek olan Annem, Babam, Ablalarım ile her zorluğun üstesinden birlikte geldiğim bana sürekli destek olan sevgili Eşim Emine ve Biricik Çocuklarım, Canım Kızım Eylül ile Canım Oğlum Yiğit Ege HEKİN’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GRUP III NİTRÜRLERİN ÖZELLİKLERİ VE BÜYÜTME	5
2.1. Kristal Yapı.....	5
2.1.1. Kristal yapı kusurları.....	8
2.2. Bant Yapısı	11
2.3. Üçlü Alaşımlar	12
2.4. Materyal Parametreleri.....	13
2.4.1. GaN yarıiletken bileşiğinin özellikleri	14
2.4.2. InN yarıiletken bileşiğinin özellikleri	14
2.4.3. AlN yarıiletken bileşiğinin özellikleri.....	15
2.5. Yarıiletken Heteroyapılar	16
2.6. Yarıiletken Kuantum Kuyuları	17
2.7. AlInN Yapılarda Kutuplanma ve 2DEG	17
2.7.1. III Grup-Nitrür heteroyapılarda kutuplanma.....	18
2.7.2. Doğal kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanma.....	19

	Sayfa
2.8. Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) ve Özellikleri	23
2.9. GaN HEMT Cihazların Çalışma Prensibi ve 2DEG Kaynağı.....	28
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	31
3.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD)	31
3.2. Karakterizasyon Teknikleri	34
3.2.1. X-ışını kırınımı.....	34
3.2.2. Yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı (HRXRD).....	36
3.2.3. Atomik kuvvet mikroskopu (AFM)	45
3.2.4 Raman spektroskopisi	46
3.2.5. Fotoluminesans spektroskopisi (PL)	47
4. DENEYSEL BULGULAR VE YORUMLAR.....	49
4.1. GaN/AlInN/AlN Heteroyapılar İçin Tampon Malzemeler	49
4.2. Deney.....	50
4.2.1. MOCVD tekniği ile GaN/AlInN/AlN/Safir HEMT büyütmesi	51
4.2.2. XRD analizi.....	52
4.2.3. Örgü parametreleri	67
4.3. AlN/GaN/AlInN Yapının Mozaik Kusurları.....	68
4.3.1. Williamson Hall grafiği yanal-dikey mozaik boyut ve düzlem eğilme açısı	68
4.3.2. Kenar ve vida dislokasyonlar	71
4.4. AlN/GaN/AlInN Yapının Nokta Kusurları	73
4.4.1. Örgü uzunluğu.....	73
4.4.2. Örgü rahatlaması	73
4.4.3 Örgü zorlanması (a- ve c-)	74

	Sayfa
4.4.4. İki eksenli örgü zorlanma (a- ve c-)	75
4.4.5. Hidrostatik basınç	75
4.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	76
4.6. Raman Spektroskopisi	77
4.7. Fotoluminesans (PL)	80
5. SONUÇLAR	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. GaN'ın 300 K'de bazı özellikleri	14
Çizelge 2.2. InN'ın 300 K'de bazı özellikleri	15
Çizelge 2.3. AlN'ın 300 K'de bazı özellikleri	15
Çizelge 2.4. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemelerin bazı özellikleri	25
Çizelge 2.5. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemelerin avantaj ve dezavantajları	25
Çizelge 2.6. Heteroepitaksi kaynaklı problemler	26
Çizelge 3.1. X-Işını kırınımında kullanılan parantezler	40
Çizelge 3.2. GaN ve AlN elastik sabitler	43
Çizelge 4.1. A, B ve C örneklerinin büyütülme şeması	52
Çizelge 4.2. GaN, AlInN ve AlN için kırınım piklerin pozisyonları	54
Çizelge 4.3. GaN, AlN ve AlInN tabakanın simetrik düzlem FWHM değerleri	61
Çizelge 4.4. GaN, AlN ve AlInN tabakanın asimetrik düzlem FWHM değerleri	62
Çizelge 4.5. GaN, AlN tabakanın asimetrik düzlem FWHM değerleri	62
Çizelge 4.6. GaN, AlN ve AlInN için A, B, C örnekleri tepe konumları ve FWHM değerleri	64
Çizelge 4.7. A, B ve C örneklerin % In oranları	66
Çizelge 4.8. AlInN tabakanın sabit büyütme sıcaklığındaki örgü parametreleri	68
Çizelge 4.9. A, B, C örneklerinin mozaik özellikleri	69
Çizelge 4.10. GaN ve AlN için dislokasyon yoğunlukları (birinci ve ikinci metod)	72
Çizelge 4.11. A, B ve C örneklerine ait Raman ve XRD analiz sonuçları	78
Çizelge 4.12 AlInN PL ölçümlerinin yasak enerji bant aralığı ile FWHM değerleri	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Hekzagonal kristal yapı ile birim hücreden oluşmuş hacim gösterimi (b) Hekzagonal metal nitrür yapı şematik gösterimi	6
Şekil 2.2. Tetrahedral yapı	7
Şekil 2.3. Noktasal kusurlar	8
Şekil 2.4. Burgers vektörünün gösterimi	9
Şekil 2.5. Kenar tipi dislokasyonu şematik gösterimi	10
Şekil 2.6. Vida tipi dislokasyonu şematik gösterimi	10
Şekil 2.7. Karışık dislokasyon şematik gösterimi	11
Şekil 2.8. (a) Malzeme direkt bant aralığı (b) Malzeme indirekt bant aralığı	12
Şekil 2.9. III-V grubu InGaN ve AlInN alaşımının elementlerinin temsili oluşumu	13
Şekil 2.10. GaN, AlN ve InN hekzagonal yapısı	13
Şekil 2.11. Yarıiletken heteroyapılarının farklı tipleri	16
Şekil 2.12. Kuantum kuyu bant diyagramı	17
Şekil 2.13. GaN kristalinde (a) Ga - yüzlü (b) N - yüzlü kristal düzenleri	18
Şekil 2.14. Ga-yüzlü ve N-yüzlü (AlInN/GaN) çoklu heteroyapılarda doğal kutuplanma ile piezoelektrik kutuplanma gösterimi	21
Şekil 2.15. AlGaIn/GaN çoklu heteroyapı için; (a) piezoelektrik kutuplanmaya bağlı tabaka yükü ve kutuplanma alanı (b) doğal ve piezoelektrik kutuplanmaya bağlı tabaka ve kutuplanma alanı	23
Şekil 2.16. Temel HEMT yapısı	24
Şekil 2.17. AlGaIn / GaN HEMT yapıları cihazın şematik çizimi	29
Şekil 2.18. Gate (kapı) voltaj değişimlerine bağlı bant diyagramı	29
Şekil 3.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.2. MOCVD ince film büyütülmesi	33
Şekil 3.3. Bragg Yasası şematik diyagramı ve spektrometresi	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Yüksek çözünürlüklü kırınım ölçerin şematik diyagramı ve dönüş eksenini gösteren örnek referans uzay	37
Şekil 3.5. X-Işını kırınım geometrisi; a) Bragg kırınımı b) S vektörü gösterimi.....	39
Şekil 3.6. Ters uzayda üç boyutlu Bragg Yansıması.	40
Şekil 3.7. a) Farklı örgü sabitine sahip epitaksiyel tabaka ile alttaş b) Zorlama c) Gevşeme	43
Şekil 4.1. A, B ve C örneklerinin θ -2 θ XRD taraması.....	53
Şekil 4.2. A, B, C örneklerinin GaN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri	55
Şekil 4.3. A, B, C örneklerinin AlN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri	56
Şekil 4.4. A, B, C'nin örneklerinin AlInN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri	57
Şekil 4.5. A, B, C örneklerinin GaN tabakada asimetric (104), (105), (106) düzlemlerine ait dönme eğrileri	58
Şekil 4.6. A, B, C örneklerinin AlN tabakada asimetric (104), (105), (106) düzlemlerine ait dönme eğrileri	59
Şekil 4.7. A, B, C örneklerinin AlInN tabakada asimetric (104), (105) düzlemlerine ait dönme eğrileri	60
Şekil 4.8. A, B, C örneklerinin GaN tabakada asimetric (121) düzlemi dönme eğrisi...	60
Şekil 4.9. A, B, C örneklerinin AlN tabakada asimetric (121) düzlemi dönme eğrisi ...	61
Şekil 4.10. GaN ve AlN tabakalar için (002), (004) simetrik düzlemlerde FWHM'nin In oranı gösterimi.....	65
Şekil 4.11. Asimetric düzlem GaN katmanları burulma açıları.....	67
Şekil 4.12. A, B C örnekleri için Williamson Hall grafikleri	70
Şekil 4.13. AlInN tabakasının In oranına bağlı a- ve c- örgü uzunluğuna ait çizilen grafik	73
Şekil 4.14. AlInN tabakanın In oranına bağlı örgü rahatlaması	74
Şekil 4.15. AlInN tabakanın In oranına bağlı (a- ve c-) zorlanma.....	75

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. In oranına bağlı iki eksenli (a- ve c-) zorlanma	75
Şekil 4.17. In oranına bağlı hidrostatik basınç	76
Şekil 4.18. HEMT yapıdaki örneklerin AFM görüntüsü	77
Şekil 4.19. A örneği Raman spektrumu	79
Şekil 4.20. B örneği Raman spektrumu	79
Şekil 4.21. C örneği Raman spektrumu	79
Şekil 4.22. AlInN tabakasının PL ölçüm grafiği	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Periyodik tablo	2
Resim 3.1. AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi	33
Resim 3.2. Yatay gaz akış reaktörü.....	34
Resim 3.3. Pro AFM ölçüm cihazı.....	45
Resim 3.4. Raman spektroskopisi cihazı	46
Resim 3.5. Fotoluminesans spektroskopisi cihazı	46



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tez çalışmasında kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

Simgeler	Açıklamalar
a, c, u	Örgü sabiti
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Safir
E_g	Yasak bant aralığı
N	Kırılma indisi n
P	Katkılama tipi
N_2	Azot gazı
NH_3	Amonyak
H_2	Hidrojen gazı
n_3	Taşıyıcı yoğunluğu
P_{SP}	Kendiliğinden polarizasyon
P_{PZ}	Piezoelektik polarizasyon
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
T	Sıcaklık
ZnS	Çinko sülfür
x	İndiyum ve Alüminyum kompozisyonu
x, y, z, Φ , ξ , χ	Ölçüm eksenleri
μ	Mobilite
λ	Dalgaboyu
α_a	Termal genleşme katsayısı
α_Ω	Eğilme açısı
α_φ	Bükülme açısı
$2\theta, \omega$	Kırınım-tarama açısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AlN	Alüminyum nitrit
AlInN	Alüminyum indiyum nitrit
AlGaN	Alüminyum galyum nitrit
AFM	Atomik kuvvet mikroskopu
FET	Alan etkili transistör
FWHM	Pik yüksekliğinin yarı genişliği
GaN	Galyum nitrür
HCP	Hekzagonal sıkı paket
HEMT	Yüksek elektron mobiliteli transistör
HFET	Heteroyapılı alan etkili transistor
HRXRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı
K.B.	Keyfi birim
LED	Işık yayan diyot
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar biriktirme
PL	Fotoluminesans
RHEED	Yansıma yüksek enerjili elektron kırınımı
RMS	Kare ortalama karekök
SL	Uydu piki
TMAI	Trimetilalüminyum
TMGa	Trimetilgalyum
TMIn	Trimetilindiyum
InN	İndiyum nitrit
XRD	X-ışınları kırınımı
2DEG	İki boyutlu elektron gazı
UV	Mor ötesi
W-H	Williamson-Hall

1. GİRİŞ

Yarıiletkenlerle ilgili çalışmalar 20. Yüzyıl ile hız kazandı. 1947 yılında katı hal transistör Germanyum (Ge) tabakasından yapılmıştır. Radyo devresinde kullanıldı [1]. Zaman içinde yapılan çalışmalar ile yarıiletken teknolojisinde ilerlemeler yaşanmıştır. 1960-1970'li yıllarda Ga ve Al kullanılarak Alüminyum Nitrür (AlN), Galyum Nitrür (GaN) büyütülmüştür [2,3]. P-katkılı GaN üretiminde yaşanan zorluklar ve kaliteli alttaşların bulunamaması, çalışmaları durma noktasına getirmiştir. Ancak çalışmaların farklı alttaşlar üzerinde büyütülmesi arayışı başlanmış. 1990'lı yıllarda ise kaliteli ve ekonomik olmasının yanında mekaniksel ve kimyasal dayanıklılığı göz önünde bulundurularak Safir (Al_2O_3) malzeme üzerinde metal organik buhar biriktirme (MOCVD) metodu ile GaN film tabaka büyütülebilmıştır. Yüksek sıcaklıklarda çalışan cihazlarda yüksek potansiyel ve direnç gösterdiği ve yüksek elektron taşıma özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu sayede optoelektronik yapılar hayatımızda yer almaya başlamıştır. III-V grup nitrürler ile alaşımlarının kullanım alanları hızla artmaktadır [4].

Geniş uygulamaları alanları bulunan III-V grup yarıiletkenlerin başlıca kullanım alanları;

- Lazerler,
- Güneş pilleri,
- Led ekranlar,
- Radar sistemleri,
- Foto dedektörler,
- Cep telefonları, uydular,
- Dayanıklılığı yüksek transistörler,
- Dijital kamera ve fotoğraf makineleri,
- Optik veri depolama sistemleri (cd ve dvd),
- Beyaz ve renkli ışık yayan diyotlar, renkli göstergeler,
- Fiber optik kablolar gibi geniş bir ticari alan uygulamalarında kullanılmaktadır [5].

Yarıiletkenler birçok teknolojik alanda kullanılmaktadır. Neredeyse tüm elektronik cihazlarda görmek mümkündür. İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasındaki bölgede bulunurlar. Işık, ısı ve manyetik alan etkisi altında veya farklı gerilimlerde iletkenlik özelliği kazanabilmektedirler.

Sahip oldukları fiziksel özellikler III-V grup yarıiletkenlerle çalışmaları daha cazip hale getirmiştir. Geniş bant aralığı ve kuvvetli kimyasal bağ özelliklere sahip nitratlar ve alaşımları olan “Galyum Nitrür (GaN)”, “Alüminyum Nitrür (AlN)”, “İndiyum Nitrür (InN)” periyodik tabloda bulunan V. Grup Azot (N) elementinin bileşikleridir.

III-V grup yarıiletkenler önemli yarıiletken alt gruplarını oluşturmaktadır.

Yarıiletken özellik gösteren elementler

Resim 1.1. Periyodik tablo

Yarıiletkenlerin sınıflandırılmaları;

- Tek atoma sahip yarıiletkenler; Silikon (Si), Germanyum (Ge)
- Bileşik yarıiletkenler;

- İkili; GaN, AlN, InN, GaAs, InAs, InSb, GaP.

III-V grup;

➤ Üçlü; $\text{In}_x\text{Al}_{(1-x)}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$, $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$

III-V grubu yarıiletkenlerin önemli fiziksel özellikler taşımaktadır. Bunlar;

- Yüksek bant aralığı,
- Yüksek erime sıcaklığı,
- Yüksek ısıl iletkenlik,
- Yüksek kırılma noktası,
- Düşük dielektrik sabiti.

Bu özelliklerin yanında güçlü bağ yapısına sahip olan III-grup yarıiletkenlerin bant aralıkları; İndiyum Nitrit (InN): 0,7eV, Galyum Nitrit (GaN): 3,4eV ve Alüminyum Nitrit (AlN): 6,2eV enerji değerine sahiptir. Bu yarıiletkenler hekzagonal kristal yapıdadır [6,7]. Bilimsel çalışmalarda sıklıkla GaN ve AlGaN bileşikler kullanılmıştır. Ancak In ve N atomları ile yapılan çalışmalarda ortaya çıkan performans sorununu çözümlenmesinde alan etkili transistör (FET) kullanıldığı yapılan çalışmalarda görülmüştür [8].

Yarıiletkenler yeşil, mor, mavi ışık yayan lazer diyotlar ve yüksek sıcaklığa sahip transistörlerde kullanılır. Geniş bant yapısı ve güçlü bağ özelliklerine karşın dalga boyları 200nm–1700nm aralığında değişen ultraviyole (UV) ve kırmızı ışık dalga boyundan biraz uzun dalga ile başlayan kızıl ötesi (IR) tayf ile uyumludur. Yarıiletken alaşımları daha ileri seviyeye çıkarmak için değerlik bant ile iletim bant arasındaki enerji farkından kaynaklı yasak enerji aralığı, p ile n tipi malzemede iletim bandı ile değerlik bant arasında oluşan enerji seviyesindeki bant bükülmesi ile örgü sabiti vb. değerler değiştirilerek çalışmalar yürütülmektedir. Elektronik cihazların performansı için yarıiletken alaşımların oranları önemlidir. x alaşım oranları $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ ve $\text{In}_x\text{Al}_{(1-x)}\text{N}$ 'in kontrol altında olmalıdır. Alaşım oranındaki değişim cihaz performansını etkilemektedir [9,10].

III-grubu “Yüksek Elektron Hareketli Transistör (High Electron Mobility Transistor (HEMT))” yüksek sıcaklıklara ve zorlu çevre koşullarına sahip olmalarının yanında yüksek frekanslı ve düşük gürültü çalışmaları ile ön plana çıkmaktadır [11]. Günümüzde değişik alanlarda kullanılmaktadır. HEMT’lerin frekans aralığı 10-110GHz arasında değişim göstererek kullanılan malzeme türüne göre değişiklik gösterir [12,13]. AlGaIn/GaN tabanlı HEMT yapılarda direkt bant aralıkları Galyum Nitrit (GaN) 3,4eV ve Alüminyum Nitrit (AlN) 6,2eV olan yarıiletken bileşikler avantaj sağlamaktadır. Güçlü kutuplaşma ve yüksek iletkenlik, yüksek kırılma voltajı ve yüksek frekansta yapılan uygulama çalışmaları bulunmaktadır [14]. HEMT yapıların yüksek performansı açısından bariyer tabaka olarak AlGaIn yerine AlInN kullanılmaya başlamıştır [15]. Farklı bariyer tabaka kullanarak örgü parametreleri ve polarizasyonu birbirine uyumlu heteroyapılı malzeme elde edilmiş $\text{Al}_x\text{In}_{(1-x)}\text{N}_x$ alaşım oranı ayarlanabilmiştir. AlInN/GaN ve AlGaIn/GaN HEMT yapıların birbirinden farkı AlInN/GaN yapısının taşıyıcı yoğunluğu daha yüksektir. Buna karşılık dezavantajı büyütme yüksek sıcaklık koşullarında olduğundan In oranı yüksek sıcaklıklarda buharlaştığından In alaşım oranını ayarlamak zordur.

Çalışmamızda “AlInN/GaN/AlN/Al₂O₃” Hemt yapısı “Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD)” tekniği ile büyütüldü. Büyütülen örneklerin noktasal kusurları, mozaik kusurları “Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım (HRXRD)” cihazı ile incelendi. Hesaplamalarda dönme (rocking) eğrilerine ait pik pozisyonları ile birlikte pik genişlemelerinden yararlanıldı. Kusurların belirlenmesi için HEMT yapının AlN ve GaN katmanlarının kenar- vida tipi dislokasyonları, ortalama eğim-bükülme açıları, yanal-dikey mozaik kristal boyutu ölçümleri gerçekleştirildi. Örneklerin simetrik-asimetrik pik düzlemleri kullanılarak kalitesine bakıldı. Mozaik yapı kusurlarını belirlemek için, Williamson-Hall Metodu (W-H) metodu ile eğim bükülme açıları, tedirgin edici dislokasyonları (TDs), yanal-düşey kristal boylarına bakıldı. Büküm açısı, asimetrik (hk.l) yansımalar ve w açısı taramaları kullanılarak belirlendi. İndiyum oranına bağlı mozaik yapı kusur analizi (12.1) kristalinin yönelimde gerçekleştirildi. Morfolojik özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yöntemi ile optik karakteristik özellikleri Raman Spektroskopisi ve Fotolüminesans (PL) ölçme teknikleri ile gerçekleştirildi.

2. GRUP III NİTRÜRLERİN ÖZELLİKLERİ VE BÜYÜTME

Periyodik tabloda III-V grubunda bulunan yarıiletken ikili bileşiklerinden olan GaN, AlN ve InN ve bunların üçlü bileşiklerinden olan AlInN/GaN, AlGaIn/GaN fiziksel özelliklerinin belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bu bölümde nitrür malzemelerin yapısal özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.1. Kristal Yapı

Elementlerin sınıflandırılmasında periyodik tablo kullanılır. Periyodik tabloda elementler yapılarına göre gruplara ve bölümlere ayrılmıştır. Yarıiletkenlerde barındırdığı benzer kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından periyodik tabloda konumlandırılmışlardır.

Yarıiletkenler;

- Elementler,
- Bileşikler,
- Alaşım yarıiletkenler olarak gruplandırılır.

Element yarıiletkenler: Aynı cins atomlardan oluşan Alüminyum (Al), İndiyum (In) gibi yarıiletkenlerdir. Doğada saf halde bulunurlar. Kovalent bağ ile birbirlerine bağlanmıştır.

Bileşik yarıiletkenler: Yapay büyütmeye teknikleri ile elde edilir. İki elementten oluşur. Alüminyum Nitrür (AlN), Galyum Nitrür (GaN) ve Galyum Arsenik (GaAs) gibi. Kristal bağlanma; kovalent ve iyonik bağlanması ile oluşur.

Alaşım yarıiletkenler: Bir bileşiğin başka bir elementle birleştirilmesiyle oluşur. $Al_{1-x}In_xN$, $In_xGa_{1-x}N$, gibi örnekler verilebilir. Burada x katsayısı solundaki elementin %'de bileşimini ifade eder. İşlenerek oluşturulan yarıiletkenler ile üstün özelliklerde diyot, led, HEMT gibi cihazlar üretilir.

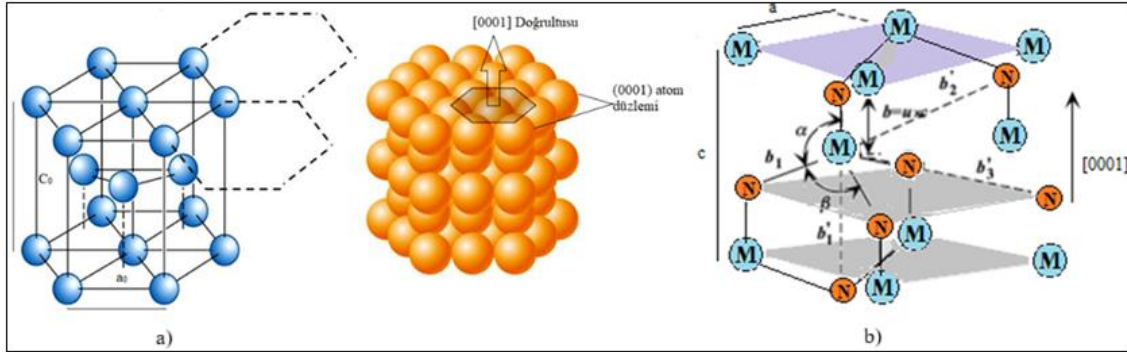
III-V grubu bileşik yarıiletkenler tam olarak kovalent bağ ile bağlı değildir. Bileşikte bulunan elementler birbirinden farklı olduğundan elektron dağılımları simetrik olmayıp, elektronların yük dağılımı merkez atoma doğru kaymış durumdadır. Periyodik tablonun

III-V grubunda bulunan yarıiletken bileşikler iyonik bir bağlanma özelliği gösterir. Bu durum da III-V grup yarıiletken bileşikler hem iyonik hem kovalent bileşiklerin karışımı özelliği gösterir. Fakat birçok yarıiletkende kovalent bağ baskındır [16,17].

III grup yarıiletkenler nitrürler;

- Hekzagonal (wurtzite),
- Çinko sülfür (ZnS),
- Kaya tuzu yapıdadır.

Çinko sülfür yapı düşük sıcaklıkta kübik yapının büyümesi ile kararlı hal alır. Hekzagonal (wurtzite) yapılar kararlı yapı olup termodinamik dayanıklılıkları yüksektir. III grup altıgen hekzagonal yapıli nitrürlerden en kararlıları; AlN, GaN ve InN yarıiletken bileşik yapılarıdır. Yüksek kristal kalitesine sahip yapılar elektriksel ve optiksel uygulamalarda kullanılırlar. Tez çalışmamızda III grup nitrür yapılar hekzagonal yapıdadır [18,19].



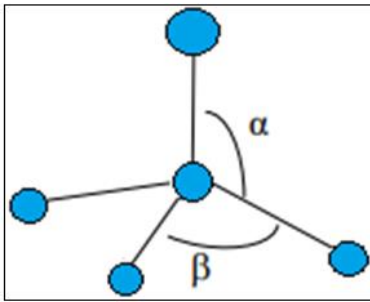
Şekil 2.1. (a) Hekzagonal kristal yapı ile birim hücreden oluşmuş hacim gösterimi
(b) Hekzagonal metal nitrür yapı şematik gösterimi

Hekzagonal kristal yapı sıkı paketlenmiş iç içe geçmiş altıgen (hcp) yapıdan oluşur. Yani birim hücresi altıgen olan örgü noktaları iki atomlu bazlardan meydana gelir.

Şekil 2.1. (a)'da örgü parametreleri c_0 ve a_0 olarak adlandırılır. a_0 taban düzlemi, c_0 taban düzlemine dik parametre ile yüksekliği temsil eder. Şekil 2.1. (b)'de anyon ve katyonlar arası uzaklık parametresi u oranı, bağ uzunluğu b 'nin c ye oranı ile ifade edilir. (örgü parametresi; a, c ve u), (en yakın komşu uzaklığı; $b=uc$, ikinci yakın komşu uzaklığı; b_1', b_2', b_3' , atomlar arası açısı; α ve β) $u=0,375$ olup, hekzagonal yapı $3c/8$ sıkı hekzagonal örgüden oluşmuştur. Eksenler arası oran $c/a = 8/3 \cong 1,633$ değeri ideal hekzagonal yapıdan söz edilebilir [19].

Şekil 2.1 (b)'de u değeri ve c/a oranı değişiminin ideal değerinden saptığı düşünülür. Ancak c/a ile u değeri birbiri ilişkidir. c/a değeri küçüldüğünde uzaklığı 4 tetrahedral değerinde sabit tutmak için tetrahedral açılar bozularak u değeri artış gösterir.

Şekil 2.2'de kararsız durumdaki kristal $[0001]$ yönlü bağ ile diğer bağlar arasındaki açı α ile gösterilmiştir. III grup nitrürler için c/a oranı ideal değerden küçüktür. Atomlar arasındaki $109,5$ ideal açıdan daha küçük olduğu $\alpha < \beta$ ve $c/a < 8/3$ durumunda mükemmel olmayan tetrahedral yapıyı göstermektedir.



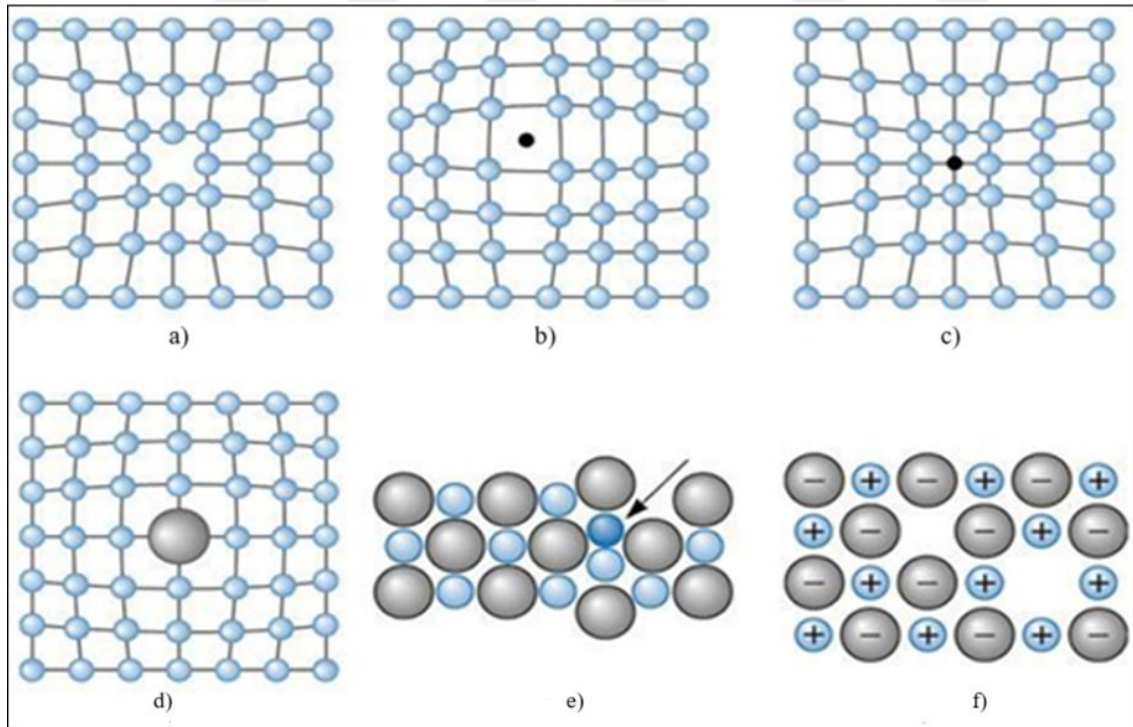
Şekil 2.2. Tetrahedral yapı

Hekzagonal yapılarda c -yönelimli ters simetri bulunmamaktadır. Bu da atomlar arası gruplaşma ile kutupsal bir özellik gösterir. Grup III nitrür atomlarının gruplaşması azot atomunun varlığını gösterir. Aksi durumundan da söz edilebilir. Yani c - yönündeki ideal hekzagonal kristalde iki farklı durumda atomik sonlandırma özelliği görülür. (0001) ve $(000\bar{1})$ yüzeydir. (0001) yüzeyli atom, III grubu (Ga, In ya da Al) yüzey/kutuplaşması ile son bulur iken $(000\bar{1})$ yüzeyli atom N atomları ile son bulur. Burada N yüzey/kutuplaşmayı ifade eder. Söz konusu kutuplaşmanın hangi yönde olduğunu tespit etmek için, III grup atomlar ve N atomu arasında oluşan bağların yönüne bakılır. Bu durum yüzeyde son bulan atomun türünden bağımsızdır [20]. Hekzagonal altıgen yapıya sahip III grup nitrür kristal yapıların yüzey, düzlem ve yönleri bulmak için (hkl) indislerinden faydalanılır. Negatif yön için sembol üzeri üst çizgi kullanılır. Dört adet standart gösterim vardır. Örgü simetrilerinin; aynı düzlem veya yüzeyler için $\{hkl\}$, belli bir yön için $[hkl]$, aynı taraf için $\langle hkl \rangle$, belli bir düzlem veya yüzey için (hkl) ile gösterimi yapılır.

2.1.1. Kristal yapı kusurları

İdeal kristal yapılarda atomlar düzenli olarak dizilirler. Gerçek kristallerde farklı örgü kusurları bulunur. Kristal yapıların içerisinde değişik boyutta yabancı atomlar bulunabilir. Yani kusursuz kristal yapılara rastlamak oldukça imkansızdır. Kristallerde atomlar kaymış veya kristal düzlemleri farklı olabilir. Kristal yapı düzenin bozulması ile kusurlu yapı oluşur. Kusurların boyutu ile biçimi, çok az da olsa miktarı da yapının özelliklerini etkiler. Yarıiletkenler, kristalin yapısında bulunan kusur ve büyütme sırasında meydana gelen yapısal kusurlar içerir. Kusur oluşumlarına; ortamın büyütme koşulları, malzeme katkılanması, safsızlığın cinsi, alt ve tampon tabaka vb. durumlar etki eder [21]. Kristal yapılar noktasal, çizgisel, düzlemsel, hacimsel kusur olarak sınıflandırılabilir. Çalışmamızda noktasal ve çizgisel kusurlara yer verilmiştir.

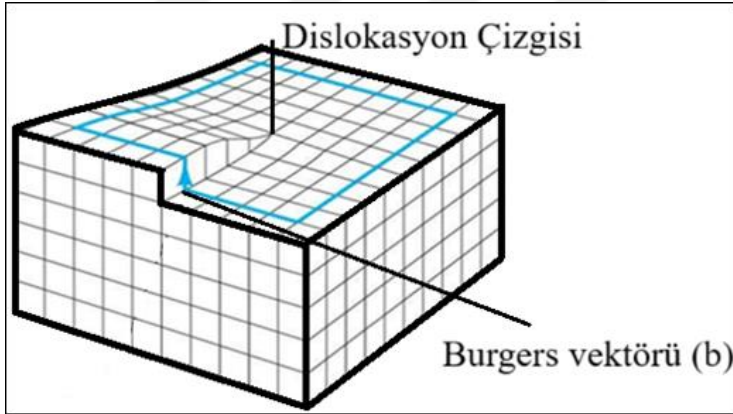
Noktasal kusurlar; Tek bir kafes (örgü) noktasındaki veya etrafındaki hatadan kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3’de nokta kusurlar görülmektedir [22].



Şekil 2.3. Noktasal kusurlar

- a) Boşluk kusuru; Genellikle yüksek sıcaklık veya düşük sıcaklarda atomların kristal yapı içerisinde yer değiştirmesi ile atom olması gereken noktada bulunmamasıdır.
- b) Arayer kusuru; Kafes (örgü) noktası arasına bir atom yerleşmiş ise oluşur. Arayer atom, yapıya ait asıl atomlardan küçüktür.
- c) Küçük yeralan kusuru; Bir kafes noktasında yapıyı oluşturan atomun yerinde farklı türde bir atomun bulunmasıdır. Atomun bulunduğu konuma göre küçük çaplı olmasıdır.
- d) Büyük yeralan kusuru; Bir kafes noktasında yapıyı oluşturan atomun yerinde farklı türde bir atomun bulunmasıdır. Atomun bulunduğu konuma göre büyük çaplı olmasıdır.
- e) Frenkel kusuru; İyonların yer değiştirmesidir. Atom yer değiştirerek fazla bir arayer oluştur.
- f) Schottky kusuru; Zıt iyonlu elektriksel yük çiftinin olması gereken yerde bulunmamasıdır.

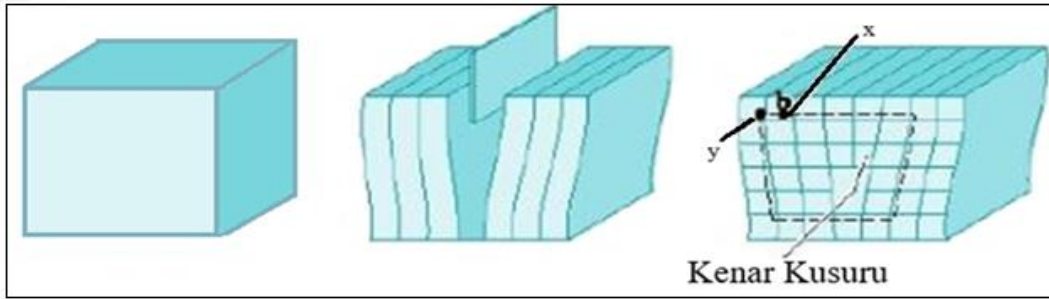
Burgers vektörü; “b” sembolü ile ifade edilir. Diskolasyonların büyüklüğünü, hareketini ve yönünü belirlemek için kullanılan vektöre verilen isimdir. Bu vektör yön ve şiddeti gösterir [23].



Şekil 2.4. Burgers vektörünün gösterimi

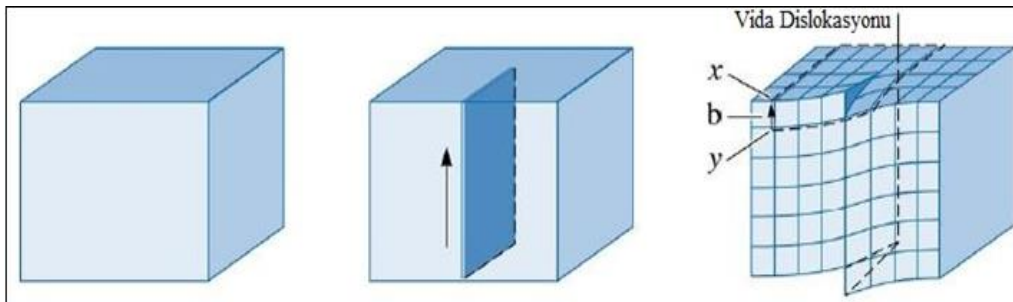
Çizgisel kusurlar (dislokasyonlar); Kristallerde atomsal dizilişleri, bir hat (çizgi) boyunca yapı düzeninin bozulması sonucu oluşur. Atomlar denge durumundan ayrıldığında çizgi çevresinde artık gerilmeler meydana gelir. Ve şekil değiştirme enerjisi depo edilir. Dislokasyon olarak adlandırılan bu çizgisel kusurlar, bir uçtan diğer uca uzanan kristal düzleminin beklenmedik bir şekilde son bulması ile oluşur. Genellikle dislokasyonlar büyütülen film tabaka ile alt tabaka arasında örgü ve termal uyumsuzluk olarak görülür [24].

Kenar tipi dislokasyon; Kristal parçasına Şekil 2.5’de görüldüğü gibi ilave ek düzlem yerleştirildiğinde kristal düzleminin alt tarafındaki atomların arasında bulunan uzaklık değişmez iken kristalin üst tarafında sıkışma meydana gelir. Bu düzensizliğin merkezi olan doğru, kenar kusuru olarak adlandırılır. Pozitif ve negatif kenar dislokasyonu oluşur. Pozitiflik $\perp$ sembolü ile negatiflik $\neg$ sembolü ile ifade edilir. Pozitif durumda ek yarı düzlem kayma düzleminin üzerinde yer alırken, negatif durumda kayma düzleminin altında yer alır. Eğer kristal parçasına kayma gerilmeleri uygulanırsa Şekil 2.5’deki siyah nokta yer değiştirerek kayma hareketi gerçekleşir. Kayma yönü ve kat edilen mesafe “burgers (b)” vektörü ile tanımlanır.



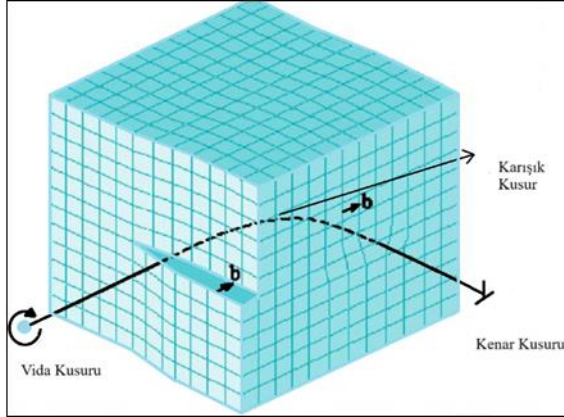
Şekil 2.5. Kenar tipi dislokasyonu şematik gösterimi

Vida tipi dislokasyon; Kristal yapıda bir düzlem boyunca paralel kayma şeklinde ötelenme oluşur. Kusursuz bir kristal parçasının tam ortasına bir düzlem yerleştirilsin. Kayma düzleminin üst ve alt tarafına kayma gerilmesi uygulandığında kayan ve kaymayan bölgeleri ayıran hat vida kusuru olarak adlandırılır. Vida dislokasyonu sıra halinde gerçekleşirken kenar dislokasyonu iki uç kenar arasında uzanan bir dalga hareketi gibi görülür. Burgers vektörü “b” vida kusuru etrafındaki eşit atom aralığını kapatmak için gereklidir.



Şekil 2.6. Vida tipi dislokasyonu şematik gösterimi

Karışık dislokasyon; Kenar ve vida dislokasyonlarının bir araya gelmesiyle oluşan dislokasyon eğri şeklindedir [24]. Şekilde 2.7’de görüldüğü gibi kesikli siyah eğri boyunca kusur hattı gösterilmektedir. Kusurlardan vida kusuru 0° iken, kenar kusuru 90° , karışık kusur ise γ° olarak verilmektedir.



Şekil 2.7. Karışık dislokasyon şematik gösterimi

2.2. Bant Yapısı

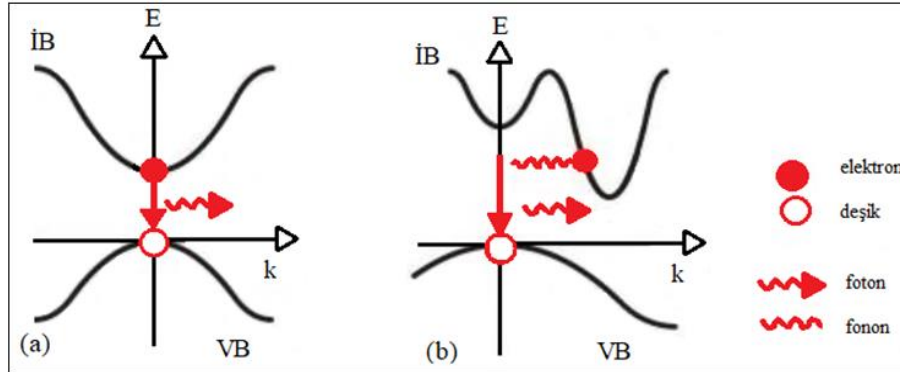
Elektronik bant yapısı bir malzemenin elektrik, manyetik ve optik özelliklerini gösterir. Kristallerde elektronlar enerji bant aralıklarındadır. Bu bantlar elektronların olmadığı bölgelerde birbirinden ayrılır. Bu bölgeler enerji aralığı veya bant aralığı olarak isimlendirilir.

Yarıiletken malzemeler bant aralığındaki geçişlerine göre ikiye ayrılır.

- Direkt (doğrudan) bant aralığına sahip yarıiletkenler,
- İndirekt (doğrudan olmayan) bant aralığına yarıiletkenler.

Direkt bant yarıiletkenler; Şekil 2.8 (a)’da görüldüğü gibi valans bandının maksimum tepe noktası ve iletkenlik bandının minimum noktası aynı doğrultuda olan yarıiletkenlerdir. Yani valans bandı maksimum noktası ile iletkenlik bandı minimum noktası “k” değeri $k=0$ olduğu durumda, yasak bant aralığı kadar bir enerjiyi alarak iletkenlik bandına geçer. “k” dalga vektörü aynı kalır. Enerji momentumu kristal örgüsüne verilerek kaybedilmez [25].

İndirekt bant yarıiletkenler; Şekil 2.8 (b)'de valans bandının maksimum noktası ile iletkenlik bandının minimum noktası aynı doğrultuda değilse indirekt bant yarıiletkendir. Başka bir ifade ile $k \neq 0$ 'dan farklı olduğu k değerinde valans bandından bir elektronun, k 'nın farklı değerindeki iletkenliğinin minimum noktasına varabilmesi için kristal örgüye momentum transfer etmesi gerekmektedir.



Şekil 2.8. (a) Malzeme direkt bant aralığı (b) Malzeme indirekt bant aralığı

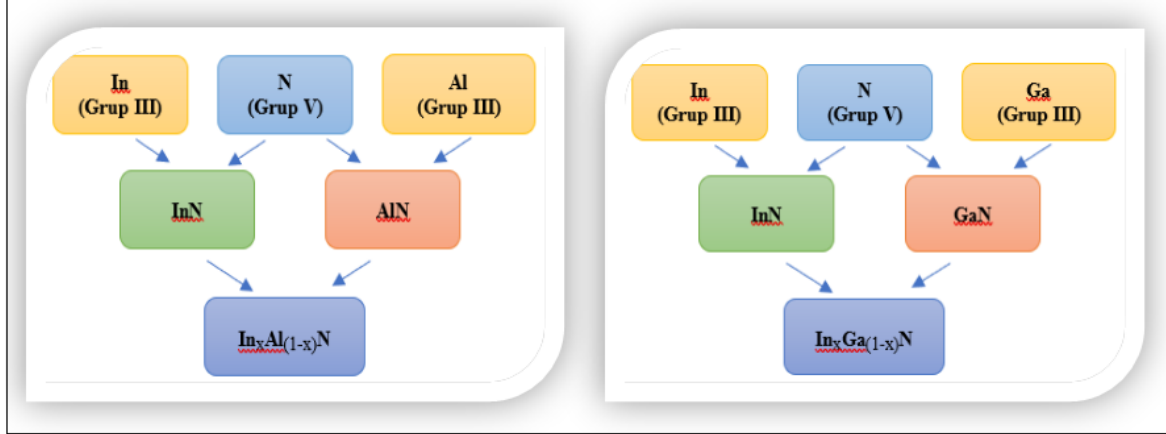
Yarıiletkenlerin iletkenlikleri ayarlanarak aynı malzeme hem çok iyi bir iletken hem de iyi bir yalıtkan yapılabilir. III grup nitrürler doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkendirler. Günümüzde elektronikte ve optoelektronik cihaz üretiminde önemli bir yere sahiptir. Yarıiletken malzemelerde metallere farklı olarak elektrik iletimi, iletim veya değerlik bandından veya her ikisinden birden gerçekleşmesi sağlanabilir. III grup yarıiletkenlerin bant aralıkları enerji değerleri InN: 0,7eV / GaN: 3,4eV / AlN: 6,2eV'tur. Üçlü ve dördümlü alaşımlar için enerji değeri 0,7eV - 6,2eV aralığında geniş bandın ayarlaması gereklidir.

2.3. Üçlü Alaşımlar

III grup nitrürlerin hepsi farklı özelliklere sahiptir. İkili bileşik çalışmalarının devamında üçlü alaşım ile dördümlü alaşımlarla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.9'da III-V grubu InGaN ve AlInN alaşımlarının elementlerinden temsili oluşumu gösterilmiştir [26].

Ga, Al ve In alaşım karışımlarının oranları alaşımların özelliğinin belirlenmesinde önemlidir. Üçlü alaşımlarda "x" alaşımların yüzde (%) değerini göstermektedir. $x=0,26$ olan bir $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ örneğinin yapısında yapı içerisinde bulunan N ile birlikte Al oranı %0,26 ve Ga oranı %74 temsil etmektedir [27]. Üçlü yarıiletken bileşiklerde "x" alaşım oranının

değiştirilmesi, yasak enerji aralığının ve örgü parametrelerinin ayarlanmasını sağlar. Vegard “yasası Eş. (2.1)’de üçlü bileşiğin “x” alaşım oranına bağlı örgü sabiti için kullanılır [28.]

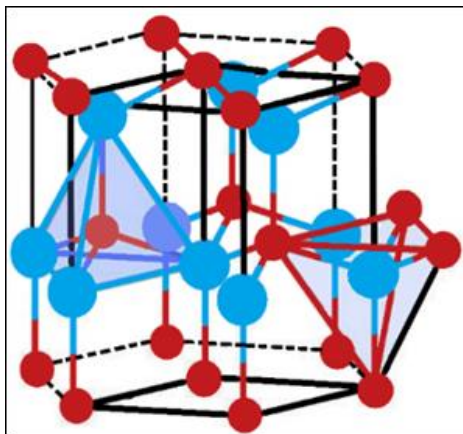


Şekil 2.9. III-V grubu InGaN ve AlInN alaşımının elementlerinin temsili oluşumu

$$E_{\text{alaşım}}(x) = (x) E_g(A) + (1-x) E_g(B) - bx(1-x) \quad (2.1)$$

Eşitlikteki $E_g(A)$ ve $E_g(B)$ sırası ile A ve B; ikili bileşiklerin yasak enerji aralıklarını, b; üçlü bileşiğin yasak enerji aralığının x alaşım oranına göre eğrilik parametresini ifade eder.

2.4. Materyal Parametreleri



Şekil 2.10. GaN, AlN ve InN hekzagonal yapısı

Çalışmamızda kullanılan Hekzagonal kristal yapıdaki GaN, AlN ve InN yarıiletken bileşiklerin özellikleri hakkında bilgiye aşağıda yer verilmiştir.

2.4.1. GaN yarıiletken bileşiğinin özellikleri

III-V grubu yarıiletken bileşik olan GaN direkt bant aralıklı ve çok sert bir materyaldir. GaN ($\sim 3,4$ eV) geniş bant aralığına sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda da kimyasal kararlıdır. Zorlu koşullarda çalışmasından dolayı optoelektronik, yüksek frekans, yüksek güçlü cihazlarda tercih edilir [29]. Oda sıcaklığı koşullarında (300K)'de yarıiletken bileşiğin bazı özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bileşiğin n-tipi taşıyıcı konsantrasyonu yüksektir. GaN bileşiğin p-tipi büyütmesinde zorluklarla karşılaşmış olup kristal büyütme teknolojisinin gelişimi ile bu zorluklar büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Çalışmalar sürekli ilerlemektedir. Mg ile GaN katkılandığında yarıiletken tipi p- olmaktadır [30]. Yüksek sıcaklık ve voltajda çalışması GaN taransistörlerin tercih sebebi olmuştur. Safır, ZnO ve SiC alttaşlar üzerine büyütülebilmektedir [31].

Çizelge 2.1. GaN'ın 300 K'de bazı özellikleri [32,33]

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Hekzagonal
Yasak enerji aralığı (eV)	3,42
Örgü sabiti, a(Å)	3,199
Örgü sabiti, c(Å)	5,185
Isısal genleşme katsayısı α_a (10^{-6} K ⁻¹)	5,59
Isısal genleşme katsayısı α_c (10^{-6} K ⁻¹)	3,17
Erime noktası (°C)	>1700
Isıl iletkenliği κ (W/cm K)	2,3
Kırılma indisi, n	2,35 (1 μ m)

2.4.2. InN yarıiletken bileşiğinin özellikleri

III-V grup azotlu yarıiletken bileşik olan InN bileşik yapısı periyodik tablonun III. ve V. sütununda yer alan İndiyum (In) ile Azot (N) elementinden oluşur. Geniş bant aralıklı, düşük etkin kütle ve yüksek fonon enerjilidir. Yüksek sıcaklık ile yüksek güç isteyen uygulamalar için ideal malzemedir. InN yarıiletken bileşiği ile ilgili yasak enerji bant aralığı enerjisinin 1,9 eV olduğu önerilirken [34,35] 2005 yılında yapılan çalışmalarda yasak enerji bant aralığının yaklaşık 0,7eV olduğu tespit edilmiştir [36]. Yasak enerji aralığının yüksek çıkması InN yarıiletken kristal yapının saf elde edilmemiş olması oksitlenme ve nokta kusuruna bağlı olduğu anlaşılmış olup iyi kalitede InN büyütülmüştür. Ve daha düşük yasak

enerji aralığına ulaşılmıştır [37]. Oda sıcaklığı koşullarında (300 K)'de yarıiletken bileşiğin Çizelge 2.2'de bazı özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.2. InN'ın 300 K'de bazı özellikleri [32,33]

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Hekzagonal
Yasak enerji aralığı (eV)	0,7
Örgü sabiti, a(Å)	3,545
Örgü sabiti, c(Å)	5,703
Isısal genleşme katsayısı α_a (10^{-6} K ⁻¹)	5,6
Isısal genleşme katsayısı α_c (10^{-6} K ⁻¹)	3,8
Erime noktası (°C)	1100
Isıl iletkenliği κ (W/cm K)	0,8
Kırılma indisi, n	2,15 (1 μ m)

2.4.3. AlN yarıiletken bileşiğinin özellikleri

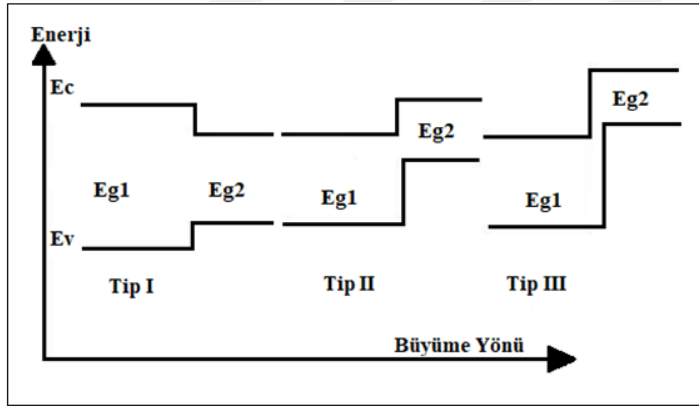
III-V grup azotlu yarıiletken bileşik olan Hekzagonal yapıdaki ideal GaN'ın yapısına en yakın ve InN'dan sonra en yakın malzemedir [38]. AlN yüksek sıcaklıklarda kararlıdır. Optoelektronik uygulama alanlarında (yüksek hızlı veri iletimi, enerji tasarrufu, güvenlik sistemleri, yenilenebilir enerji, tıbbi, bilimsel, tüketici elektroniği vb.) kullanılır. Oda sıcaklığı koşullarında (300 K)'de yarıiletken bileşiğin Çizelge 2.3'de bazı özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.3. AlN'ın 300 K'de bazı özellikleri [32,33]

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Hekzagonal
Yasak enerji aralığı (eV)	0,78
Örgü sabiti, a(Å)	3,110
Örgü sabiti, c(Å)	4,982
Termal genleşme katsayısı α_a (10^{-6} K ⁻¹)	4,2
Termal genleşme katsayısı α_c (10^{-6} K ⁻¹)	5,3
Erime noktası (°C)	3000
Isıl iletkenliği κ (W/cm K)	3,2
Kırılma indisi, n	2,80 (1 μ m)

2.5. Yarıiletken Heteroyapılar

Bir yarıiletken tabakanın farklı yarıiletken tabaka üzerine büyütülmesi ile yarıiletken heteroyapısı elde edilir. Malzemeler farklı olduğundan bant aralıkları da farklıdır. Farklı bant aralığındaki yarıiletken malzemeleri büyötmek için çeşitli epitaksiyel büyötmte metotları kullanılır. Yarıiletken ince film biriktirme tekniğı ile atomik hassasiyetli heteroyapılar MOCVD, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) kristal büyötmte teknikleri ile büyötülebilir. Tez çalışmamızda kullanılan MOCVD tezin ileri bölömlerinde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Farklı büyötmte koşulu, farklı kalınlıkta yarıiletken malzeme ile modern elektronik uygulamalarda ve diğter yarıiletken aygıtların üretiminde dayanıklı heteroyapılı cihazlar tasarlanıp üretilebilmektedir. Çoklu yapılı farklı yarıiletkenler olduklarından kristal yapıları ve yapısal örgü uyumsuzlukları oluşur. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve kaliteli büyömenin sağlanabilmesi için uygun malzeme seçilir. Yarıiletken kristal heteroyapılarının örgü uzunluklarının birbirlerine yakın olması gerekmektedir [39]. Üç farklı çoklu yapılı yarıiletkenler Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Yarıiletken heteroyapılarının farklı tipleri

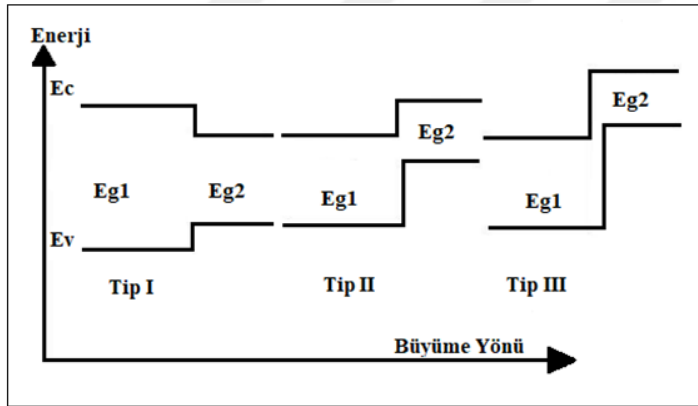
Tip I: E_g değeri küçük olan materyal E_g değeri büyük olan materyalin valans bandı ile iletkenlik bandı arasında bulunduğu durumdur.

Tip II: Bant bükölmelerden biri, iki yarıiletken materyalin E_g aralığındaki farktan çok daha fazladır.

Tip III: Bant bükölmelerden biri daha fazla E_g değerinde olan materyalin E_g aralığında daha yüksektir.

2.6. Yarıiletken Kuantum Kuyuları

Kuantum kuyulu yarıiletkenler, düşük bantlı bir yarıiletken ile kendisinden daha yüksek bant aralıklı iki yarıiletkenin arasına yerleşmesi ile elde edilen yapı Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Kuyu tabakanın kalınlığı birkaç nm civarındadır [39,40]. Elektronların x ve y eksenlerindeki iki ekseninde yönelimleri serbesttir. Ancak z ekseninde elektronların yönelimi sınırlıdır. Kuyu genişliği (L_w), $L_w < 10 \text{ Å}$ yeteri kadar küçük olduğunda kuyuda bulunan elektronlar büyüme yönünde hareketlenerek kuantumlanır. Hareket yönündeki enerji seviyeleri büyüme doğrultusunda farklı değerler alır [41,42]. Kuantum kuyuları tekli veya çoklu yapıda olabilirler. Tekli kuantum kuyusu Si/Ge InGaN/GaN, InP/GaAs, AlGaAs/GaAs, gibi örnek çeşitleri verilebilir. Enerji bant aralığı dar olan yarıiletken malzemenin diğerine göre daha fazla olan bant aralığına sahip iki yarıiletken arasında sıkıştırılması ile elde edilir. Enerji bant aralığı dar yarıiletken, kuantum kuyusunu oluşturur. Çoklu kuantum kuyulu yapı, tekli kuantum kuyulu yapıların peş peşe büyütülmesi sonucu oluşur. Potansiyel bariyer genişliği, kuyu genişliğinden büyüktür [43].



Şekil 2.12 Kuantum kuyu bant diyagramı

2.7. AlInN Yapılarda Kutuplanma ve 2DEG

III grup nitridler çoklu bileşikler yüksek kutuplanma özelliklerine sahiptir. Bunun için; Kutuplanma nasıl olur? Meydana gelme nedeni nedir? Kutuplanma sonucu neler olur? Sorularının yanıtlarına bakalım.

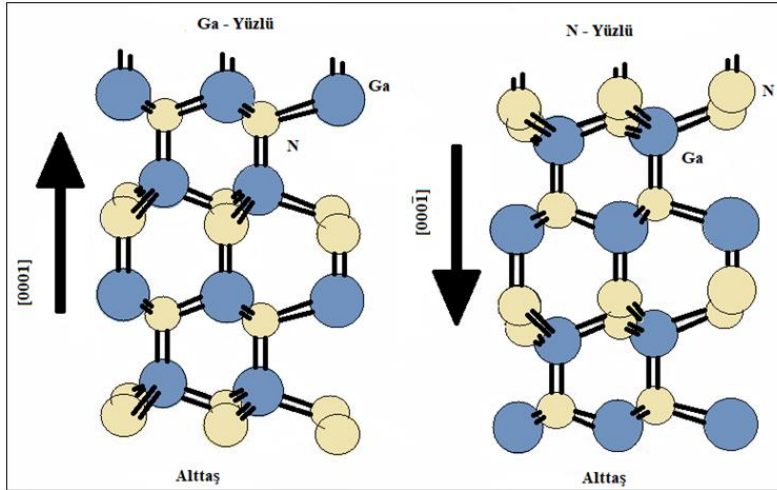
2.7.1. III Grup-Nitrür heteroyapılarda kutuplanma

Yüksek elektronegatifliğe sahip III-V grubu hekzagonal metal-N yapısı arasındaki kovalent bağ Al-N ve Ga-N bağları ile diğer III-V grubu bileşikler arasında oluşan kovalent bağlardan daha çok iyonik bağ yapısına sahiptir. III-V yapılardan olan III-N'lar özel yapı olarak ifade edilir.

Elektronların bağa katılan iki veya daha fazla atom arasında ortaklaşa kullanıldığı bağ kovalent bağ olarak adlandırılır. Tek bir kovalent bağ yapısı iki atom arasında bölüşülmüş bir elektron çiftinden oluşmaktadır.

İyonik bağda durum ise bir elektronun bir atomdan uzaklaşarak diğer atomun etkisine geçtiği durumdur. Burada bağ oluşturan atomlardan biri elektron kaybederek artı (+) yüklü, diğerinde elektron kazanarak eksi (-) yüklü iyonlara dönüşürler.

Elektronegatiflik; Bir bağ oluşturan her bir atomun bağ elektronlarını çekebilme gücü olarak tanımlanır.



Şekil 2.13. GaN kristalinde (a) Ga - yüzü (b) N - yüzü kristal düzenleri

Hekzagonal III grup-N yapısı c-ekseni boyunca ters simetri özelliği göstermediğinden, metal-N bağları arasındaki kuvvetli iyonik bağ özelliği [0001] yönelimli kristal boyunca güçlü kutuplanma gösterir [44,45]. Söz konusu kutuplanma SiC'da [0001] yönelimi boyunca görülür. Ga yapısı c-ekseni boyunca ters simetri özelliği göstermez safir üzerine [0001]

yönünde büyütülen kristalleri Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Elektronegatiflikleri göz önüne alındığında $N > Ga$, elektron dalga fonksiyonu Ga-N için azota doğru yer değiştirmiştir. Kristal hekzagonal yapının ters simetri göstermediği yönde, kristalin bir yüzeyinde pozitif yük oluşumu görülürken diğer yüzeyinde negatif yük oluşumu görülür. Bu etki Al-N çiftinde de görülür.

Grup III-N malzemelerindeki bu özellik kendiliğinden polarlanmadır. III-V grup yarıiletkenler diğer kutuplanmalara göre 5 kat daha fazladır [40,41]. Güçlü polarizasyon etkisi ile 2-boyutlu yük birikmesi AlInN tabakanın GaN tabaka üzerine büyütülmesinde görülür. Bileşik çoklu grup III-V yarıiletken yapılarda büyütme sırasında katkılanma yapmadan yük birikmesi oluşmaz. Katkılanma yapmaya gerek kalmadan yük birikmesi görülen AlGaIn/GaN ile InAlN/GaN diğer III-V grup çoklu yarıiletken yapılardan ayrılırlar. Yük kaynaklarının ara katmanda tuzaklanmış yüzey yüklerinin kristal yapı tarafından söğrulmesinden kaynaklı olduğu düşünülebilir [46].

2.7.2. Doğal kutuplanma ve piezoelektrik kutuplanma

III-V grup hekzagonal ve diğer düşük simetrlili kristal yapıya sahip yarıiletkenler; Doğal kutuplanma (DP) ve Piezoelektrik kutuplanma (PE) özelliği gösterebilirler. Gerginliği sıfır olan bir kristalin iç yapısından kaynaklı kutuplanma alanı doğal kutuplanma, kristalde belirli nedenlere bağlı gerilmeye bağlı kutuplanma ise piezoelektrik kutuplanma olarak tanımlanabilir. III-V grup yarıiletkenlerden olan III-N grubu yarıiletkenler, aralarında gerilme olmadığında kristalin iç yapısından kaynaklı doğal kutuplanma özelliği gösterebilirler. Çoklu yapılarda bu özellikten dolayı elektrik alan meydana gelir. Söz konusu kutuplanma III-N grubu yarıiletkenlerde $[0001]$ yönelimi boyunca görülür. Kutuplanmalar bu eksen boyunca gerçekleşir. Şekil 2.13’de Hekzagonal GaN kristalinde kutuplanma $[0001]$ yönünde alttaşa doğru olurken, N-yüzlerde alttaşa zıt yönde $[000\bar{1}]$ yönlü yönelim görülür.

AlN ve GaN’ın kutuplanma katsayıları birbirinden farklıdır. AlN’da oluşan doğal kutuplanma GaN’ın kutuplanma katsayısından $\sim 2,5$ kat fazla olup, örgü uyumsuzluğu yaklaşık %2’dir. Kristaller arasındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan piezoelektrik kutuplanmanın etkisi doğal kutuplanmaya göre daha küçüktür.

c-ekseni boyunca kendiliğinden polarizasyon; $\vec{P}_{DP} = P_{DP} \cdot \hat{z}$ piezoelektrik kutuplanma katsayıları; e_{33} ve e_{31} ile verilir.

P Piezoelektrik kutuplanma;

$$P_{PE} = \sum_j e_{ij} \varepsilon_j \quad (2.1)$$

Burada ε_j gerginlik, e_{ij} piezoelektrik kutuplanma sabittir.

III-N için Eş. (2.1), Eş. (2.2)'ye indirgenebilir [33].

$$P_{PE} = e_{33} \varepsilon_3 + e_{31}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{(c - c_0)}{c_0} \quad (2.3)$$

ε_3 , c - eksen boyunca olan zorlanmadır. Düzlem içi zorlanma izotropiktir.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{(a - a_0)}{a_0} \quad (2.4)$$

Burada a_0 , c_0 örgü parametrelerinin denge değerleridir. Büyütme [0001] yönünde olduğunda e_{15} piezoelektrik sabiti ihmal edilir. Tez çalışmamda incelediğimiz numunelerde uygun koşul sağlandığından bu sabiti ihmal edebiliriz.

InN ve GaN yapıların, doğal kutuplanmasının aynı olduğu, %10'luk bir örgü uyumsuzluğu olduğundan söz konusu elde edilen kristal çoklu yapılarda piezoelektrik kutuplanma daha baskındır [47].

Alanda indüklenen yük yoğunluğunun polarizasyona bağımlılığı Eş. (2.5) ile ifade edilir.

$$\rho_p = \nabla \cdot \vec{P} \quad (2.5)$$

GaN/AlInN veya AlInN/GaN çoklu heteroyapısında ara yüzeyinde oluşan polarizasyon

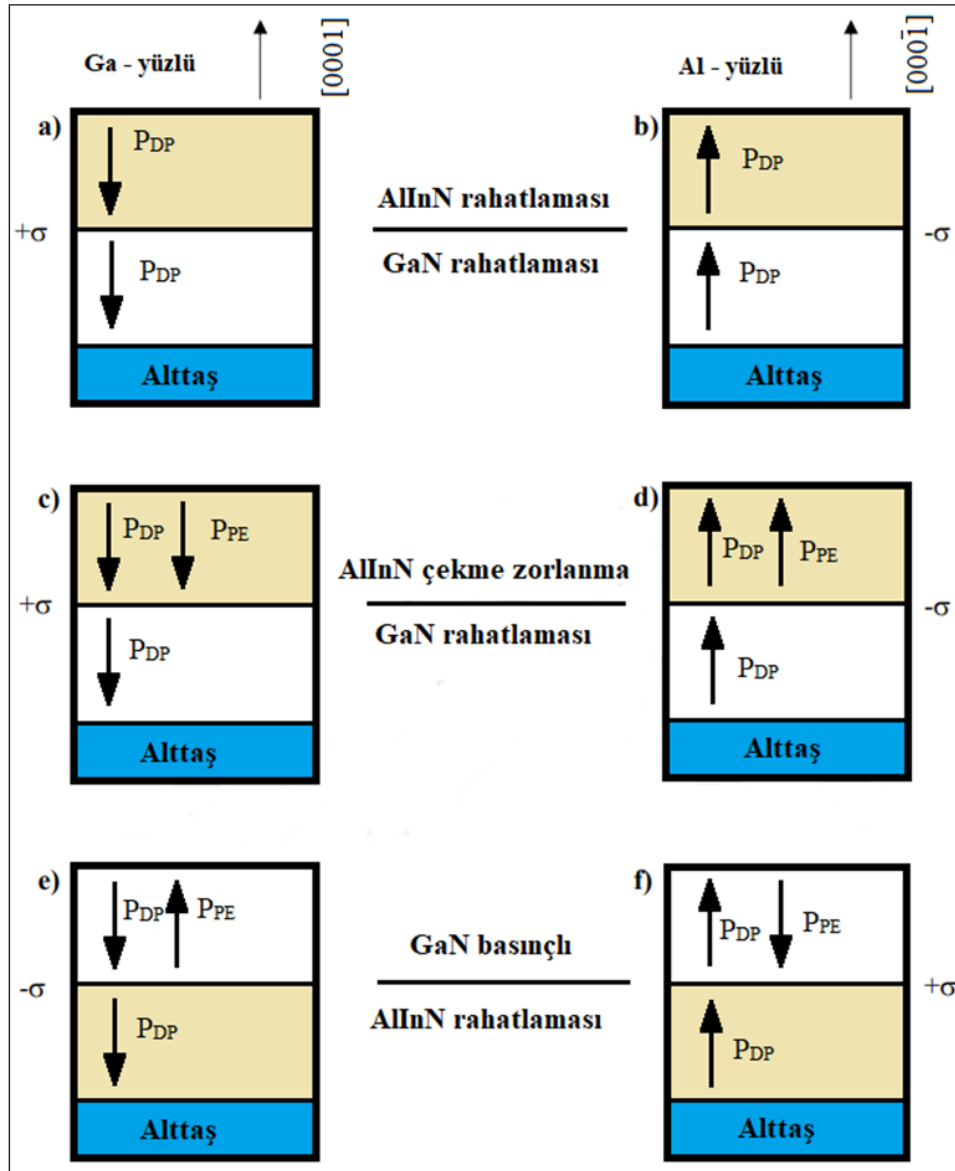
tabaka yük yoğunluğu (σ) [33];

$$\sigma = P(alt) - P(üst) \quad (2.6)$$

$$\sigma = [P_{DP}(alt) + P_{PE}(alt)] - [P_{DP}(üst) + P_{PE}(üst)] \quad (2.7)$$

$$\sigma = [P_{PE}(alt) - P_{PE}(üst)] - [P_{DP}(alt) + P_{DP}(üst)] \quad (2.8)$$

$$\sigma = \sigma(P_{PE}) + \sigma(P_{DP}) \quad (2.8)$$



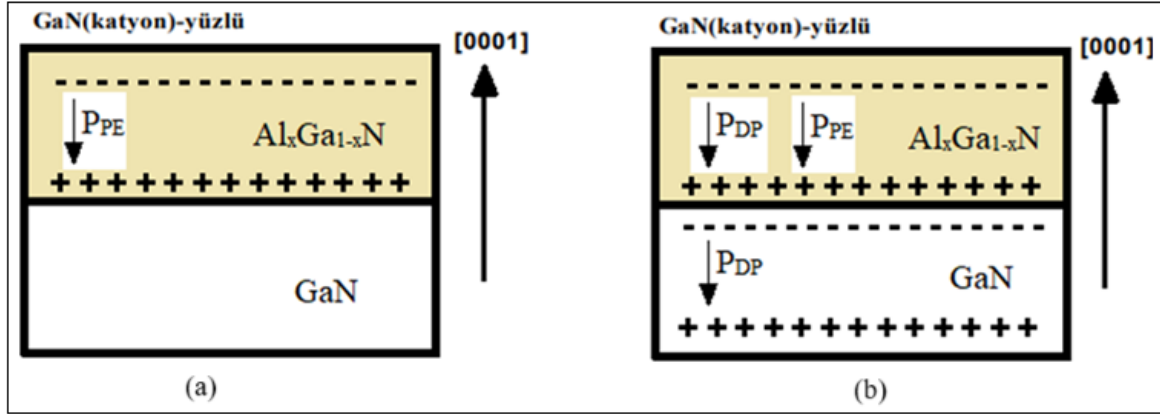
Şekil 2.14. Ga-yüzlü ve N-yüzlü (AlInN/GaN) çoklu heteroyapılarda doğal kutuplanma ile piezoelektrik kutuplanma gösterimi

Polarizasyon oluşumunu sağlayan levha yük yoğunluğunun pozitif olduğu durumda, serbest elektronlar polarizasyon tarafından indüklenen yük davranışı gösterdiği gibi tersi davranışta gösterebilir. Yani 2DEG oluşumunda bariyer ve tampon tabakanın heteroyapısında birikim olur. AlInN ve GaN arasında 2DEG oluşabilmesi için bant süreksizliği yeterli büyüklükte, arayüzeyin ise yeterli düzlükte olması gerekmektedir. GaN üstünde AlInN bulunan Ga yüzey durumunda polarizasyona bağlı yük yoğunluğu pozitif olduğu Şekil 2.14 (a)'da görülmektedir.

Heteroyapının düzensiz olması durumunda çekme ve zorlanma durumunda bariyer katman AlInN'nin piezoelektrik polarizasyonu, AlInN ile GaN'ın arasındaki farkı büyütür 2DEG'in tabaka yük yoğunluğunu ve elektron kararsızlığı artacaktır. Polarizasyon ile indüklenen Şekil 2.14 (b) ve (d)'de görüldüğü üzere iki boyutlu yük yoğunluğu negatif ($-\sigma$) değerdedir. Yük yoğunluğunun negatif olması heteroyapıda boşluk oluşumunu sağlar. İki boyutlu boşluk (holl) gazı (2DHG) oluşur. Şekil 2.14'de görüldüğü üzere Ga ve Al yüzü yapılarında AlInN/GaN arayüzeyinde gerginliğin bulunması veya bulunmaması arayüzeyde 2DEG'in oluşumu gözlemlenir. N-yüzlü yapılarda arayüzeyde 2DHG oluşumu gözlemlenir.

Aynı durum Ga (Al)-yüzlü GaN/AlGaN yapılarda görülür. c-eksenli safir altta üzerine büyütülen AlGaN/GaN çoklu heteroyapının piezoelektrik kutuplanmaya bağlı elektrik alan ve tabaka yükü ve elektrik alanı Şekil 2.15 (a)'da görülmektedir. Yine aynı yapı içerisindeki piezoelektrik alan doğal kutuplanmadan oluşan alanlar Şekil 2.15 (b)'de görülmektedir. 2DEG oluşumunda meydana gelen taşıyıcı yüklerin önemli bir kaynağı yarıiletken yüzeydir. $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ gibi HEMT yapılarında büyütme şartları, kimyasal olaylar, kullanılan yüzey kaplaması, çevre şartları vb. etkenler doğrudan yapıların performansında önemli rol oynar [48]. Şekil 2.15 (b)'de $Al_xGa_{1-x}N$ ve GaN tabaka arasındaki polarizasyondan kaynaklı $Al_xGa_{1-x}N$ yüzeyinde görülen negatif yüke bağlı olarak arayüzeyde pozitif yük görülür. Pozitif yük kaynaklı arayüzeyde elektron birikmesiyle 2DEG oluşur.

Kuvvetli elektrik alan oluşum koşulları için malzeme seçimi ve katkılanma önemlidir. Arayüzey iletim bandında üst seviye taşıyıcı yük yoğunluğu elde etmek için, taşıyıcı yükleri iyi sınırlandırılmalıdır [49,50]. $Al_xGa_{1-x}N$ yapının katkısız olması durumunda $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ heteroyapının arayüzeyde $10^{13}cm^{-2}$ mertebesinde 2DEG oluşumuna yol açmıştır [48,72].



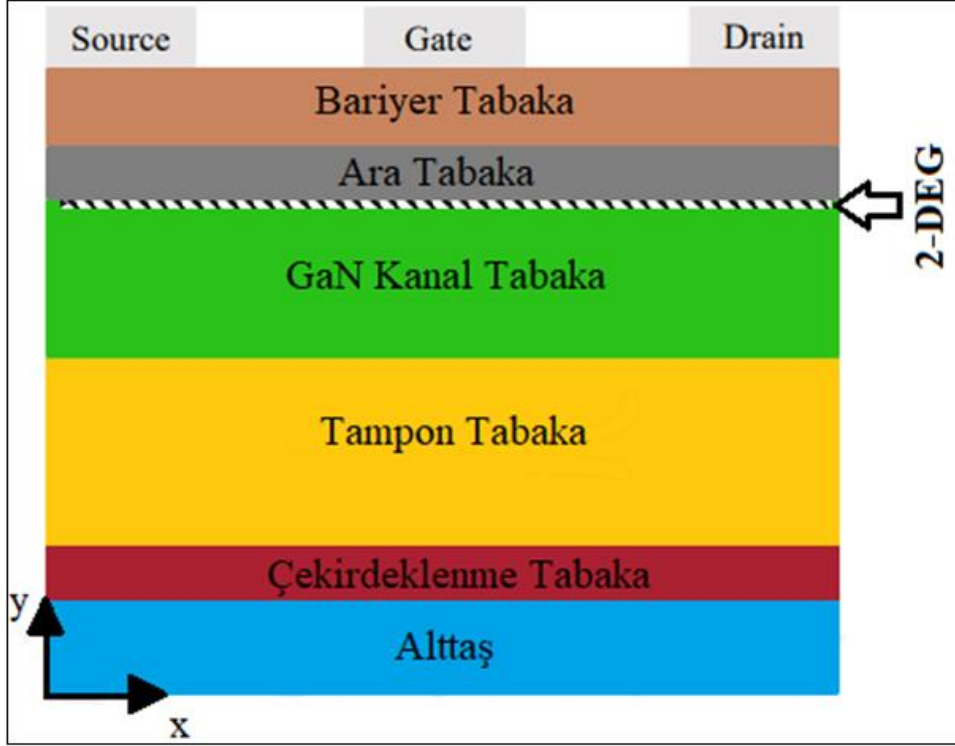
Şekil 2.15 AlGaIn/GaN çoklu heteroyapı için; (a) piezoelektrik kutuplanmaya bağlı tabaka yükü ve kutuplanma alanı (b) doğal ve piezoelektrik kutuplanmaya bağlı tabaka ve kutuplanma alanı

2.8. Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) ve Özellikleri

Bu transistörler, polarizasyon ve bant yapısı farklı iki yarıiletken malzeme arasında bağlantı içeren yarıiletken tabakaların birbiri üzerine büyütülmesini sağlayan alan etkili bir transistördür. Karma eklemli (HFET) veya değişken katkılı (MODFET) alan etkili transistör olarakta bilinirler. İlk olarak HEMT yapısı 1979 yılında Mimura tarafından ortaya konulmuş ve yapı ile ilgili ilk makale 1980 yılında yayınlanmıştır [51]. III-V grup HEMT yapısı ile oldukça geniş çalışmalar yapılmıştır. Yüksek elektron mobilitesine ve yüksek hıza dayalı radyo frekansı ve mikrodalga aygıt uygulamaları ile ilgili birçok umut verici çalışmalar yapılmıştır. Modern epitaksiyel büyütme teknikleri sayesinde yüksek kalitede yarıiletken tabakalarının büyütülmesi ile yüksek frekansta (20-100 GHz) çalışabilen, düşük gürültülü HEMT aygıtları üretilebilmiştir.

Temel HEMT yapısı, yüksek enerjiye sahip iletim bantlı bariyer tabaka ile düşük enerjiye sahip iletim bantlı kanal tabakası arasında kalan hetero arayüzeydeki yüzey yüklerinden meydana gelir. Pozitif yük indüklenmiş ise elektronlar indüklenen yükün yerini doldurmaya çalışır. İki-boyutlu elektron gazı (2DEG) kanal ve bariyer tabaka arasındaki arayüzeyde oluşur. Yüksek güçlü ve frekanslı aygıtların üretilmesi için yüksek yoğunluğa ve mobiliteye sahip 2DEG HEMT'lere ihtiyaç vardır. Temel HEMT yapısı Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

Alttaşlar geniş bant aralıklı yarıiletkenlerin epitaksiyel büyütülmesinde kullanılır. HEMT yapılar; Silisyum (Si) [52], Safir (Al_2O_3) [53], Silisyum KARBÜR (SiC) [54] ve GaN [55] gibi altlıklar üzerinde büyütülme sağlanmaktadır.



Şekil 2.16 Temel HEMT yapısı

Epitaksi; Tek kristalli alttaş yüzeyine yönelimli kristal büyütme işlemidir. Homoepitaksi ve heteroepitaksi büyütme mevcuttur. Büyütme sırasında film ile alttaş aynı tür yapıdan oluşuyor ise homoepitaksi, alttaş ile farklı tür yapıdan oluşuyorsa da heteroepitaksi diye isimlendirilir.

Alttaş seçimi yapılırken; Kullanılan tabaka ve alttaş arasındaki uyum için, termal iletkenlik ve genleşme katsıyısının (CTE), farklı sıcaklıklardaki maksimum elektriksel geçirgenliği, çap genişliği (yaklaşık 2 ve 8 inç), kristalin kalitesi, kusur oranı, yüzey kaplaması, yüzey özellikleri, büyütülen tabaka, yapının mekanik ve kimyasal özellikleri belirleyici kriterlerdir.

Yüksek kaliteli tek kristal GaN alttaş oldukça önemlidir. GaN alttaşın istenilen kalitede üretilmemesi ve yüksek maliyeti, araştırmaları farklı alttaş arayışına yönlendirmiştir. Fakat GaN alttaşlar ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [56]. GaN'ın, Si tabaka üzerinde

büyütülmesi Si'un düşük maliyetle bulunmasından dolayı tercih edilmektedir. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemeler ile özellikleri Çizelge 2.4'de verilmiştir [57, 58]. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemelerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.5'de [58]. Heteroepitaksi kaynaklı problemler Çizelge 2.6'da verilmektedir [58,59].

Çizelge 2.4. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemelerin bazı özellikleri

Alttaş	Örgü Sabiti		Isıl Genleşme		Isıl İletkenlik	Erime Noktası
	[Å]	Uyumsuzluk GaN/AlN [%]	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Uyumsuzluk GaN/AlN [%]	[W cm ⁻¹ K ⁻¹]	[K]
GaN	<u>a</u> =3,189 <u>c</u> =5,185	- / 2,4 - / 3,9	5,59 3,17	- / 25,7 - / -66,2	4,1	2791
AlN	<u>a</u> =3,112 <u>c</u> =4,982	-2,5 / - -4, 1 / -	4,15 5,27	-34,7 / - 39,3 / -	5,9	3487
Safir	<u>a</u> =4,7589 <u>c</u> =12,991	-16 / -13,3	7,3 8,5	23,4 / 43,2	0,41	2303
6H-SiC	<u>a</u> =3,0806 <u>c</u> =15,117	-3,5 / -1	4,46 4,16	-25,3 / 7	4,9	3102
Si (111)	<u>a</u> ₁₁₁ =3,84	17 / 19	2,6	-115 / -60	1,3	1412

Çizelge 2.5. HEMT yapılar için tercih edilen alttaş malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Alttaş	Avantajları	Dezavantajları
Safir (Al ₂ O ₃)	• Düşük maliyet • Yaygın olarak bulunabilme • Yüksek sıcaklıklarda kararlılık • Kolay temizleme	• Çok zayıf termal iletkenlik ve zayıf ısı dağıtımı • GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu • Güç uygulamalarına kullanılmaz
Silisyum karbür (SiC)	• Yüksek termal iletkenlik • GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu	• Yüksek maliyet • Yüksek kusur yoğunluğu (mikroborular ve vida türü kusurlar)
Silisyum (Si)	• Düşük maliyet • Yaygın olarak bulunabilme • Si temelli mikroelektronik aygıtlarla bütünleşme olanağı • İletken ve yalıtkan formlarda bulunabilme	• GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu • GaN ile yüksek termal uyumsuzluk • Zayıf termal iletkenlik

Çizelge 2.6. Heteroepitaksi kaynaklı problemler

Alttaş Özelliği	Karşılaşılan Problem
• Yanal örgü sabiti (a) uyumsuzluğu; • Dikey örgü sabiti (c) uyumsuzluğu;	• Güçlü uyumsuz yer değiştirme yoğunluğu: Cihazda kaçak akım, farklı madde difüzyonu, alçak termal iletkenlik • Anti-faz ve ters etki sınırları
• Düşük ısısal iletkenlik	• Düşük ısısal dağılım
• Farklı tabakalarda yüzey süreçleri	• Uyumsuz tabakalar biriktirme
• Filmden tabakadaki farklı kimyasallar	• Farklı kimyasallarla alttaşın kötü büyümesi
• Polarsız alttaş yüzey	• Epitaksiyel film tabakada karmaşık polarizasyon ve ters bölmeler

Kısaca alttaş ve tabakalardan bahsedersek;

Safir (Al_2O_3); İyonik bağ yapısına sahip safir, tek kristal rombohedral birim hücre ve hekzagonal birim hücre olarak bilinir [60]. 1971 yılında MOCVD yöntemi ile GaN büyütmede, “H. M. Manasevit” ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır “Manasevit ve diğ, 1971” [61]. Çizelge 2.4’de Safir (Al_2O_3) bazı özellikleri verilmiştir. Çizelge 2.5’de bazı avantaj ve dezavantajları görülmektedir. Safirden kaynaklı oksijen GaN epitaksiyel tabakada istenmeyen katkılanmaya neden olduğu ve elektron yoğunluğunu arttırdığı görülmüş olup, diğer alttaşlarla karşılaştırıldığında çok fazla araştırma yapılması Al_2O_3 ön plana çıkartmıştır [62,63]. Safirin örgü kusurlarını gidermek için; alttaşın yüzeyindeki kirliliği gidermek için parlatma ve ters yüzey tabaka oluşturulur, tabaka nitrülenir, düşük sıcaklıkta ince tampon tabaka GaN ve AlN biriktirilmesi ile epitaksiyel yüzey büyütmesi için tavlama yapılır.

GaN için, Ga-polariteli pürüzsüz ve kaliteli büyütülen filmler MOCVD ve HVPE yöntemi ile c- yönelimli Al_2O_3 alttaş üzerindeki büyütülerek elde edilir [64,65]. MOCVD yöntemi ile N-polarite filmler üretilir [66]. Bu tez çalışmasında da alttaş olarak Al_2O_3 alttaş kullanıldı.

Silisyum Karbür (SiC); Merkezi Silisyum atomu olup bütün çoklu yapılarda C atomlarının kovalent bağlı tetrahedron (bir taban ve tabanı ortak bir noktaya bağlanan çok yüzlü üçgen piramit) yapısıdır. Veya $CSi_4 - SiC_4$ dur. 6H- SiC alttaş, GaN epitaksisi için önemli yığılma özelliği gösterir. Al_2O_3 ile kıyaslandığında yapıyı basitleştirir. Karbon (C) ve Silisyum (Si)’un polaritesi, GaN film tabakasının polarite kontrolünü basit hale getirir. AlN ve GaN’dan daha düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Filmler katmanlar oda

sıcaklığında iki eksenli gerilime maruz kalırlar. Çizelge 2.5’de avantaj ve dezavantajları görülmektedir.

Silisyum (Si); Avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.5’de verilmiştir. GaN tabanlı cihazlar için iyi bir alttaştır. Si alttaş üzerindeki GaN epitaksiyel tabaka kalitesi SiC ve Al₂O₃ kalitesinden daha zayıftır.

Galyum Nitrat (GaN); GaN epitaksiyel tabaka ve cihaz üretimi için GaN alttaş kullanımı son derece başarılıdır. Heteroepitaksi problemler kalmaz. Bu alttaş ile homoepitaksi Silisyum, Safir veya Silisyum Karbür gibi alttaşlarda oluşan kristalin polaritesi, katkısız yoğunluk, gerilme, örgü uyumsuzluğu, sıfır (0) veya çok düşük termal genleşme katsayısı, tampon katmanlara veya nitridasyona ihtiyaç duyulmaz [59].

Çekirdek tampon tabakaları; GaN tabaka, Safir üzerine büyütüldüğünde örgü uyumsuzluğundan kaynaklı çekme, gerilimi ortaya çıkarak çatlaklar oluşabilmektedir. GaN tabaka ile alttaş arasındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklı çatlama olmaması için GaN ile alttaş tabaka arası ara tampon bir tabaka ile büyütülmesi uygun olur.

Kanal tabaka; III-N grup yarıiletkenler arasında gerilme olmadan kristalin iç yapısından kaynaklı doğal kutuplanma görülür. III-N grubu yarıiletkenlerden Hekzagonal GaN kristalinde kutuplanma alttaşa doğru [0001] olurken c -düzleminde oluşan kendiliğinden polarizasyon için tampon tabaka [0001] yönelimi boyunca GaN tabaka üzerine büyütülür. Büyütülen tabakada kanal oluşturduğundan kanal tabaka olarak adlandırılır.

Bariyer tabaka; Büyütme sırasında malzeme, kanal tabakasının üzerine yüksek enerji bant aralığına sahip ve düşük elektron ihtiyacı bulunan tabakada büyütülür. İletim bandındaki elektron dengelenmesine bağlı olarak kanal ile bariyer tabaka düşük bant aralığına sahip bir yarıiletkenin daha yüksek bant aralığına sahip yarıiletkenin arasına yerleştirilmesine bağlı polarizasyon farkı kuantum kuyu oluşumuna neden olur. Kuyuda elektronların sıkışması ile kanal oluşur. Yüksek elektron mobiliteli GaN yapılarda, AlGaN bariyer tabaka olur. Bu tabaka ya katkılı ya da sınırlı değerdedir. Bahse konu yapılarda kanal elektronlarını sınırlandırılmak ve yoğunluğu yükseltmek için AlN ara tabaka kullanılabilir [67].

Pasivasyon tabaka; Malzeme yüzeyindeki pürüzlülükleri ve çöküntülerden kaynaklı etkiyi azaltmak için genelde SiN tabaka kullanılır.

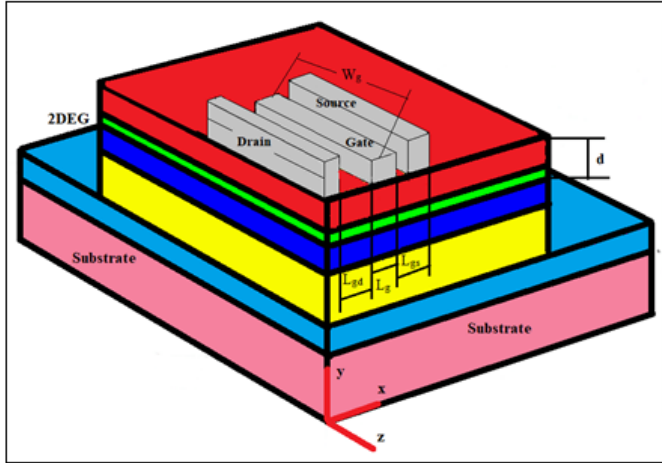
Ohmik kontaklara erişim sağlanabilmesi için çok alaşımlı yarıiletken üzerine kaynak ve drenaj olarak adlandırılan elektronlar konumlandırılır. Daha sonra yarıiletken üzerine üçüncü elektron olarak adlandırılan kapı, metal ve yarıiletken bağlantı bariyerinin oluşması için konumlandırılır. Bu bariyerin amacı kanal tabakası taşıyıcı yoğunluğunun kontrolünü sağlar. Kanal tabakası ara yüzey alt kısmında bulunur. Taşıyıcı yoğunluğu gate (kapı) voltajına bağlıdır. Voltaj düştükçe gate (kapı) elektronun yoğunluğu azalma eğilimi gösterir. Eşik voltajının (V_{th}) oluşması için kanalın sıkışması gerekir. Eşik voltajının negatif ve pozitif olduğu durumlarda HEMT değişik durumlar gösterir. Negatif durumda tükenme modu (D mod), pozitif durumda cihaz gelişim modu (E mod). AlGaN / GaN HEMT yapısı D modlu transistördür [68].

2.9. GaN HEMT Cihazların Çalışma Prensibi ve 2DEG Kaynağı

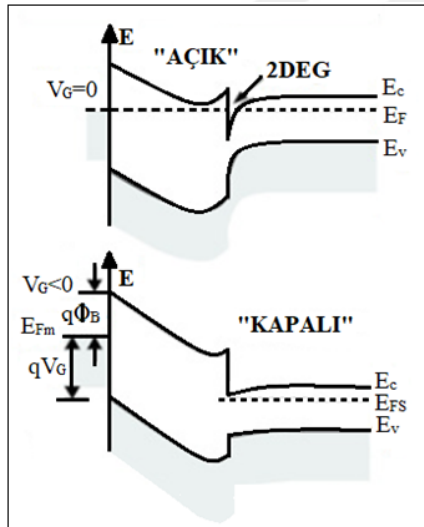
Enerji bant diyagramının voltajla değişimi HEMT yapısı hakkında bilgi edinmemize yardımcı olur. Yani HEMT yapılarında yüzeydeki potansiyele bağlı gate (kapı) voltaj değişimi kendiliğinden oluşan 2DEG elektronların kontrolü ile sağlanmaktadır. Gate ile hareketi sağlanan elektronlar, source (kaynak) ve drain (akaç) arasında akımın hareketini sağlar. Şekil 2.17’de AlGaN / GaN HEMT yapıları cihazın şematik çizimi verilmiştir. Şekil 2.18’de gate (kapı) voltaj değişimlerine bağlı bant diyagramı görülmektedir [69].

Drain’e pozitif yönde bir gerilim (V_{DS}) uygulandığında source ve drain arasında oluşan potansiyel yük azalması ile 2DEG boyunca elektronlar harekete geçer V_G (kapı voltajı) ile source ve drain arasındaki akım kontrol altında tutulur. V_G ’nin negatif yönde artırılması kapı altında kalan yüklerin 2DEG kanalı boyunca hareketlenmesine neden olur. V_G ’nin oldukça yüksek olduğu durumlarda yükler tüketim tabakası yönünde 2DEG bölgesine kadar genişleme göstermesi ile 2DEG yoğunluğunun ihmal edilebileceği seviyeye azalır. Bu değeri sağlayan en düşük kapı eşik voltajının (V_{th}) oluşumu sağlanır. V_G ’nin eşik voltajının üstünde olduğu durumda ise kaynak ve drenaj arasında elektron akışı sonucu drain gerilimi artış gösterir. Drenaj ve kaynak arasında oluşan akım belli bir doyum noktasına doğru hareket eder. Kanal tabakadan akan akım en yüksek doyuma ulaştığı değer I_{DDs} , 2DEG yoğunluğuna bağlıdır. Yoğunluk arttıkça I_{DDs} artış gösterir. HEMT yapıları cihazlarda yüksek

frekans limitleri için L_g (kapı uzunluğu) değeri önemlidir. L_g 'nin düşük olması yüksek frekans değerine ulaşım için önemlidir. Yüksek güç uygulamalarında L_g değerinin büyüklüğü istenir. Drenaj üzerinden akan akım W_g kapı genişliği ile orantılı değişir [70,71].



Şekil 2.17. AlGaN / GaN HEMT yapıları cihazın şematik çizimi [69,70]



E_c = İletim bandı enerjisi

E_v = Valans bandı enerjisi

E_{Fm} = Metal Fermi Seviyesi

E_{Fs} = Yarıiletken Fermi Seviyesi

$q\phi_B$ = Schottky bariyer yüksekliği

V_G = Kapı voltajı

Şekil 2.18. Gate (kapı) voltaj değişimlerine bağlı bant diyagramı [69,70]

Ortam koşulları faktörleri kristal kusurlarına sebep olur. AlGaN tabakanın üzerinde oluşan bant aralığındaki enerjiden kaynaklı tabakanın yüzeyinde meydana gelen yüzey tuzakları 2DEG için en önemli kaynaktır. Söz konusu durum belli bir bariyer kalınlığını kapsar. 2DEG için bariyer tabakadaki güçlü polarizasyondan kaynaklı elektrik alan kanala doğru hareket eder. 2DEG oluşumu gerçekleşir.



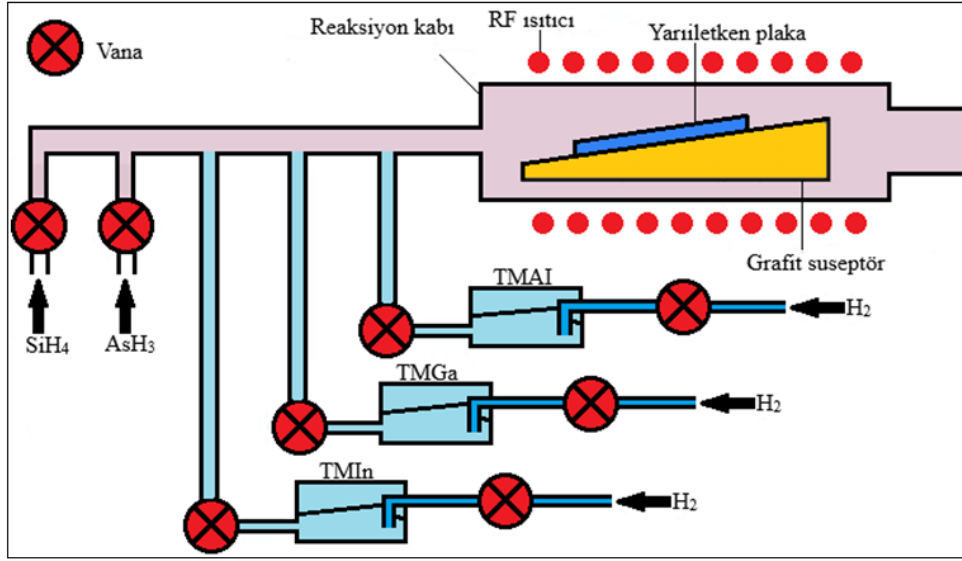
3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu çalışmada yararlanılan “Metal Organik Kimyasal Buhar Birikim (MOCVD)” tekniği sayesinde Safir (Al_2O_3) alttaş üzerine $\text{AlInN}/\text{GaN}/\text{AlN}$ HEMT yapılar In oranında büyütülmüştür. “Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım (HRXRD)” cihazı kullanılarak örneklerin yapısal karakterizasyonları belirlenmiştir. Örneklerin yapısal mozaik kusurları (eğim açısı, yanal- dikey kristal boyutu, vida ve kenar dislokasyon yoğunluğu) In değerine bağlı olarak incelenmiştir. Ayrıca Morfolojik özellikleri Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) yöntemi ile optik karakteristik özellikleri Raman Spektroskopisi ve Fotoluminesans (PL) ölçme teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde; büyütme yöntemi, kullanılan cihazlar ve yapılan ölçümlerden bahsedilecektir.

3.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD)

MOCVD, bir alttaş malzeme üzerine aynı anda birden fazla epitaksiyel tabakaların nanometre hassasiyetinde atomik biriktirme ile büyütülebilen kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. Tez de III-grubu (Nitrit tabanlı, As tabanlı, P tabanlı vb.) malzemelerin yüksek kalitede ve yüksek saflıkta büyütülmesi için kullanılmıştır. Sistemin temel çalışma prensibi; Organik gaz moleküllerine bağlı metal atomlarının tavllanmış bir alttaş üzerine gönderilmesi ile alttaş yüzeyinde reaksiyon oluşturmaktır. Burada elde edilmesi planlanan yarıiletken malzemenin oluşturulması aşamasında; belli bir sıcaklıkta ortamdaki organik gaz molekülleri ile metal atomları arasındaki bağın kopması ile oluşturulmak istenen malzemenin alttaş yüzeyinde katmanlar şeklinde kristallenmesi sağlanır. Yatay reaktörlü MOCVD sisteminin gösterimi Şekil 3.1’de görülmektedir.

MOCVD büyütmede kullanılan malzemelerin saflığı çok önemlidir. İkili ve üçlü yapıli alaşımların GaN , AlN , AlGaIn ve AlInN büyütmelerinde kullanılan Trimetil-İndiyum (TMIn), Trimetil-Galyum (TMGa), Trimetil-Alüminyum (TMAI) ve organik sıvı gazlar olup, oda sıcaklığında yüksek buhar basıncına sahiptir. Bu gazlar H_2 ile taşınır. TMIn , TMGa , TMAI , metal organik gaz karışımları sıcak ortamda tutulan alttaş üzerindeki taşıyıcı gazlar (H_2 veya N_2) amonyak NH_3 ile tepkimesinde istenilen malzemenin alttaş üzerinde tabakalar halinde kristallenmesi sağlanır.



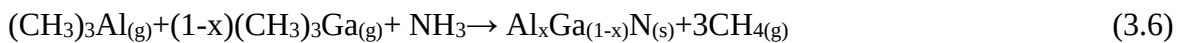
Şekil 3.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi [62]

Kimyasal reaksiyon türlerinin yarı iletkenlerde termal ayrışması için ikili, üçlü ve daha fazla bileşiklere ait genel denklemler Eş.(3.1), (3.2) ve (3.3) ile verilmektedir.



Eşitliklerde H Hidrojen, R bir organik, örneğin metil $[(CH_3)_3]$ veya etil $[(C_2H_5)_3]$ A, B, ve D, biriken katı madde türlerini oluşturur.

Aşağıda GaN, AlN ve AlGaIn için tepkimeler görülmektedir.

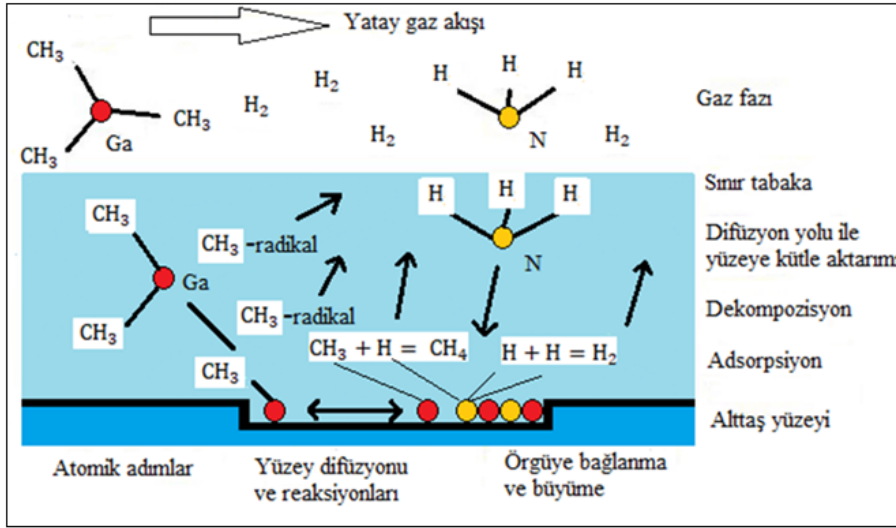


InN için Eş. (3.7)'de görülmektedir.



Tepkime sonunda metan gazı ve diğer gazların dışarı salınımı olur. Büyütme esnasında büyüme hızı, tabaka kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin belirlenmesi gereklidir.

Şekil 3.2’de MOCVD yöntemi ile ince filmin büyütülmesi sırasında oluşan temel fiziksel olayların temsilini göstermektedir. Resim 3.1’de Bilkent yerleşkesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde (NANOTAM) bulunan AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi, Resim 3.2’de yatay gaz akışına sahip reaktör görülmektedir.



Şekil 3.2. MOCVD ince film büyütülmesi [73,74]



Resim 3.1. AIXTRON 200/4 RF-S MOCVD sistemi



Resim 3.2. Yatay gaz akış reaktörü

Sistemin çalışması; Reaktörün 3 fazlı 50 Hz frekans, 380V, 24kVA, RF jeneratör ile ısınması sağlanır. Sistem bileşenleri de aynı kaynak ile beslenmektedir. Sistemde yüksek saflıktaki taşıyıcı gazlar kullanılır. Taşıyıcı gazlar sisteme 3,5 bar basınçla gönderilir ve ortamda yaklaşık 10 l/dk tükenmektedir. Sistemde iki adet kabin havalandırması mevcuttur. Havalandırma hızları 1000 m³/saat'dir. Sistemin soğutulmasında kullanılan suyun akış hızının 4 bar basınç farkı 15 l/dk olmalıdır. Böylece her seferde 2 inç büyüklüğe sahip tek materyal üretilmektedir. Sistem ile sıcaklık, büyütmenin görüntüsü, büyütülen malzeme yüzeyinin düzgünlüğü kontrol edilebilir.

3.2. Karakterizasyon Teknikleri

Amaç, büyütülen yarıiletken malzemenin fiziksel özellikleri hakkında teknik bilgiye sahip olmaktır.

3.2.1. X-ışını kırınımı

Her teknolojik keşif gibi X-ışınlarının da geliştirilmesi günlük yaşamımızda önemli bir rol oynamaktadır. Kristal yapıların yapısal analizlerin belirlenmesinde kullanılan fiziksel bir yöntemdir. X-ışını kırınımı metodu ile kristalin karakteristik özellikleri ile birlikte kristale bağlanmamış atomların atom pozisyonları, bağ uzunlukları, bağ açısı tespit edilir.

X-ışınları Alman fizikçi Wilhelm Röntgen tarafından, 1895 yılında elektron tüpleri (Crookes-Lenard tüpü) üzerinde çalışma yaparken keşfedilmiştir. X ışını; havası alınmış röntgen tüpünde, katot ile anot arasında yüksek voltaj uygulandığında, katottan anota doğru hızlandırılan elektronların anottaki yüksek atom numaralı metal ile etkileşimi oluşmaktadır.

X-ışını kırınımı önemli bir deneysel tekniktir. X-ışınları tekniği malzemelerin yapısal (ince film, toz, polimer, vs.) analiz tanımlanmaları ve karakteristik özelliklerini sağlayan yöntemlerden birisidir. Yani çoklu alaşım yapıların analizleri detaylı yapılabilir. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı tekniği ile büyütülen tabaka kalınlıkları, kristal kalitesi, alaşım yapıları mol oranları, ince film yapılarda oluşan gerginlik ve kusurlar belirlenebilir [74,75].

Bragg yasası: 1912'de W.L. Bragg, bir kristal üzerine θ açısı ile gönderilen X-ışını demeti, kristaldeki atomlar tarafından saçılır. Saçılan ışınlardan aynı dalga boyunda ve aynı fazda olanlar üst üste biner ve birbirlerini güçlendirir. Farklı fazda ve farklı dalga boyunda olan ışınlar ise birbirini söndürür. Bütün kırınım deneyleri Şekil 3.3'de görüldüğü gibi Bragg yasası Eş. (3.8)'e dayanır.

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad n=0,1,2,3\ldots \quad (3.8)$$

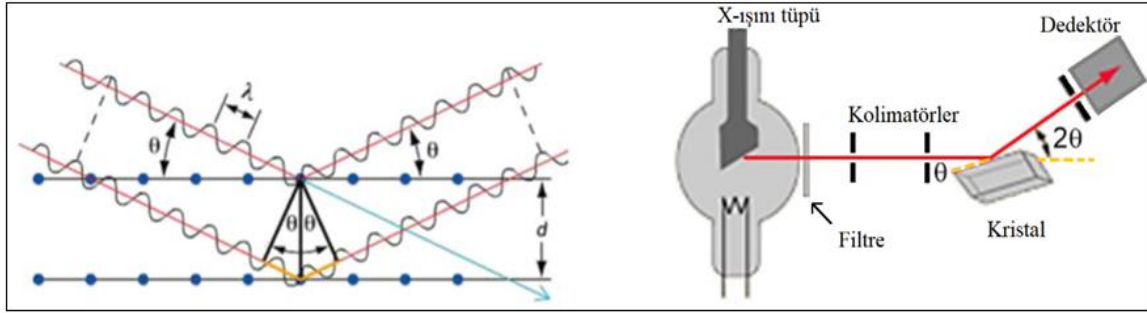
Gelen ışının dalgaboyu λ , atomik düzlemler arası uzaklık d , yansıma açısı θ 'dır [74,76]. Kristal üzerine gönderilen X-ışınları kristalden gelen ışının Eş. (3.9)'u sağlaması ile yansıma oluşur. Farklı tüm açılarda ışını yok edici etkiler oluşur.

$$\sin\theta = n\lambda/2d_{hkl} \quad (3.9)$$

Farklı atomik düzlemlerden saçılan ışınlar yapıcı girişim oluşturarak birbirlerini kuvvetlendirir. Yani farklı düzlemlerden saçılan ışınlar arasındaki yol farkı kullanılan ışının dalga boyunun tam katlarına eşit olmalıdır.

Hekzagonal altıgen yapılu grup III nitrür yapılar için (h,k,l) düzlemlerinin aralıkları Eş. (3.10)'da verilmektedir. Şekil 3.3'de Bragg yasasının şematik diyagramı ve spektrometresi verilmiştir.

$$d_{hkl} = \left(\frac{\sqrt{4}}{\sqrt{3}} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{1}{c^2} \right)^{-1} \quad (3.10)$$



Şekil 3.3. Bragg Yasası şematik diyagramı ve spektrometresi

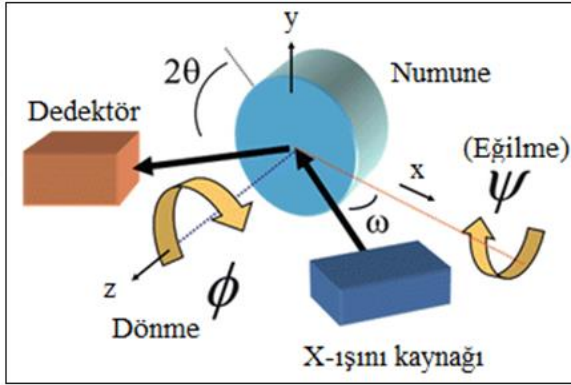
3.2.2. Yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı (HRXRD)

Bu metod ile numunenin boyutu, yapısı, kimyasal bileşimi, tabaka kalınlığı vb. özellikleri incelemede kullanılan bir laboratuvar tekniğidir. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı cihazı; yarıiletken malzemenin mikro yapısal analizlerini, karakterizasyonunu, tabaka yapısını, zorlanma ve bileşimini belirlemede kullanılmaktadır. Bu cihaz malzeme üzerine gönderilen X-ışınımı saçılma ilkesine göre çalışır.

Bu tez çalışmamızda büyütülen örneklerin AlInN/AlN/GaN HEMT yapısal özellikleri X-ışını kırınımı (HRXRD) ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Bruker D8 Discover XRD cihazı ile gerçekleştirildi.

Basit XRD cihazı, X-ışını kaynağı ve dedektörden oluşur Şekil 3.4'de görülmektedir. Dedektör, yüksek hassasiyete ($\sim 0.0001^\circ$) sahip numunenin etrafında dönebilmektedir. Sistem 40kV/40 mA'de yüksek güce sahip bakır kaynak ($\text{CuK}\alpha_1 \lambda = 1,540597 \text{ \AA}$) ve hybrid kristal monokromatöre (tek renklilik) sahiptir. Hybrid kristal monokromatör, yüksek yoğunluklu X-ışını ve farklı ışın paralelleştirmek için kullanılır. X-ışını numunenin konumuna göre hareket ederek maksimum kırınımın sağlanması amaçlanır. Maksimum kırınım için X-ışını numuneye yönlendirilir. Numunenin konumuna, dönme rotasyonuna, $\phi(\varphi)$ ve $\psi(\psi)$ 'nin eğim açısına göre x, y, z koordinatlarına göre konum ve açılar ayarlanır.

Kristal numune üzerine X-ışını kaynağından ışın demeti gönderilir. Numune üzerine çarpan x ışını demeti atom düzlemleri tarafından kırınıma uğrar. Kırınıma uğrayan atom düzlemleri kırınım desenini oluşturur. Her kırınım deseni bir örgü noktasına karşılık gelir. Böylece oluşan kristalin örgü parametresi hakkında bilgi verir.



Şekil 3.4. Yüksek çözünürlüklü kırınım ölçerin şematik diyagramı ve dönüş eksenini gösteren örnek referans uzay

Tarama tipleri ve anlamları;

ω : X-ışını kaynağından numuneye gönderilen ışın demetinin açısıdır. Numune ω etrafında döner ve dedektör sabit kalır. Ters örgü uzayında S vektörü orijin merkezli bir yay etrafında yolu takip eder. S vektör uzunluğu değişmez ancak yönü değişir.

2θ : Gelen ışın ile kırınıma uğrayan ışın demeti arasındaki açıyı ifade eder. Numune ve kaynak sabit kalır. Dedektör hareketlidir. S vektörü Ewald küresi etrafında bir yay şeklinde yol takip eder. S vektörü uzunluğu ile yönü değişir.

$2\theta - \omega$: ω açısı kadar döndürülen kaynak veya örnek açisal dönme oranı 1/2 olan dedektör 2θ açısı kadar döner. Ters örgü uzayında saçılma vektörü (S), orijinin dışına yönelir ve uzunluğu değişir. S vektörünün yönü sabit olup, ofsete bağlıdır. $2\theta - \omega$ açısı taramasında x-ekseni 2θ açısındadır. Ofset olmadığı durumda ve $\omega = \theta$ ise bu ters örgü uzayında dik simetrik açısı taraması $\theta - 2\theta$ olup toz kırınım tekniği için uyumludur.

$\omega - 2\theta$: Standart bir $2\theta - \omega$ açısı taraması olup, x eksenini ω açısı değerini gösterir. Küçük açısındaki yansımalar ile yüksek çözünürlüklü çalışmalar için uygundur.

Q : Saçılma vektörü (S) herhangi bir yönde ters örgü uzayında taranır, ondalık ω ve 2θ açısı taramalarında yazılıma ihtiyaç vardır. Böylece istenen her şekildeki ters örgü uzay haritası ters örgü uzayında toplanabilir.

φ (phi) : Numune φ eksenini etrafında döndürülür. S vektör uzunluğu sabit kalır. Saçılma vektörünün yönünün numuneye göre değişmesi için ters örgü merkezi, S vektörü boyunca hareket ettirilir.

χ : Numunenin χ eksenini etrafında döndürülür. Ayrıca φ açısı taraması ile aynı tarama yapılır. Numune yüzeyi gelen ışın demetine göre hareket ettirilir [77].

$\omega / 2\theta$ oranı dedektör numune ile birlikte hareket ettiğinde değişir. ω ve ω - 2θ taramalarının ikisi de dönme eğrileri (rocking curve) olarak isimlendirilir. (Şekil 3.4) [78].

X-ışını kırınımı kristalin yapı analizi ve karakterizasyonu hakkında bilgi veren tekniklerden biri olup 1918 yılında Scherrer tarafından Bragg yansıma genişliğinin sonlu bir kristal boyutundan etkilendiği durum Eş. (3.11) ile gösterilmiştir.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta_B} \quad (3.11)$$

Eşitlikte; D = Boyut parametresi, B = Bragg açısı, K= Sabit, λ = Bir dalga boyu, β = FWHM. XRD kırınım tekniği ile bükülme, zorlanma, tabaka kalınlığı, rahatlama, eğilme gibi yarıiletkenin karakteristik yapısı hakkında bilgi sahibi olunur.

Diğer XRD kırınım tekniği ise ω - 2θ taraması ve ters örgü uzayı (RMS)'dir. Bu iki yöntem III-Nitrür grubunun epitaksiyel tabakalarının özelliklerini belirlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Buradan tabakalar arasındaki düzlem dışı -c örgü sabiti bilgisine ulaşılır. Film tabakasının kısmi rahatlama halinde -c örgü sabitinden bilgi edinmek zorlaşır. Ters örgü uzayı (RMS) ile bu aşılabılır. Ters örgü uzayındaki vektörler a_1, a_2, a_3 ile ilkel vektör fonksiyonları b_1, b_2, b_3 ise Eş. (3.12) ile gösterilir.

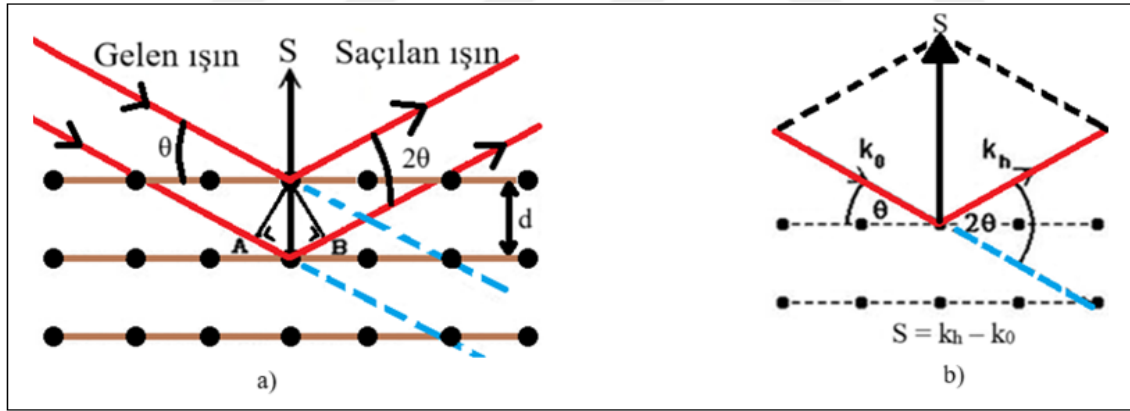
$$b_1 = 2\pi \frac{a_2 \times a_3}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)}, \quad b_2 = 2\pi \frac{a_3 \times a_1}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)}, \quad b_3 = 2\pi \frac{a_1 \times a_2}{a_1 \cdot (a_2 \times a_3)} \quad (3.12)$$

Ters örgü uzayı (RSM)

Ters örgü uzayı bir örnekteki zorlama ve eğim birbirinden ayırmak için kullanılır. Ters örgüyü bulmak için saçılma vektöründen (S) faydalanılır. Ters örgü uzunluğu 2θ açısına

bağlıdır. Saçılma vektörünün yönü ile yörüngesini bulmak için ω açısı taranır. Gelen ışın demeti tarafındaki açı örnek yüzeyi ile kesiştiğinde ω açısı ile θ açısı birbirinden farklı ise düzlemler ile örnek yüzeyi birbirine paralel olmaz. Kristalin yönü ile saçılma vektörünün (S) uzunluğu değiştirilerek $\omega-2\theta$ açı taramaları değişik ω açı değerlerinde taranarak ters örgü uzayının farklı alanları araştırılır. Ve ters örgü uzayında kırınımın yoğunluğu haritalandırılır. Simetrik ve asimetrik düzlemler için bu işlem yapılabilir.

Gerçek uzay ile kristal düzlemleri, ters örgü uzayı ile kırınım desenleri tanımlanır. Kristalde ters örgüyü belirlemek için kristal düzlemi ile ters örgü noktaları çizimi yapılır. İlk olarak başlangıç noktası belirlenir. Belirlenen başlangıç noktasının uzağında kristal düzlemine dik bir vektör çizilir. Vektörün şiddeti $1/d$ 'dir. Düzlemler arası uzaklık 'd' ile ifade edilir. Vektörün sonlandığı yere bir nokta konulur. Periyodik noktalardan oluşan bir diziliş olana kadar her düzlem için yapılan işlem tekrarlanır. Gerçek uzay ve ters örgü uzayında yönelimler değişmez. Ancak mesafeler terstir. Kırınım deseni pozisyonu düzlemler arası mesafeye bağlıdır.

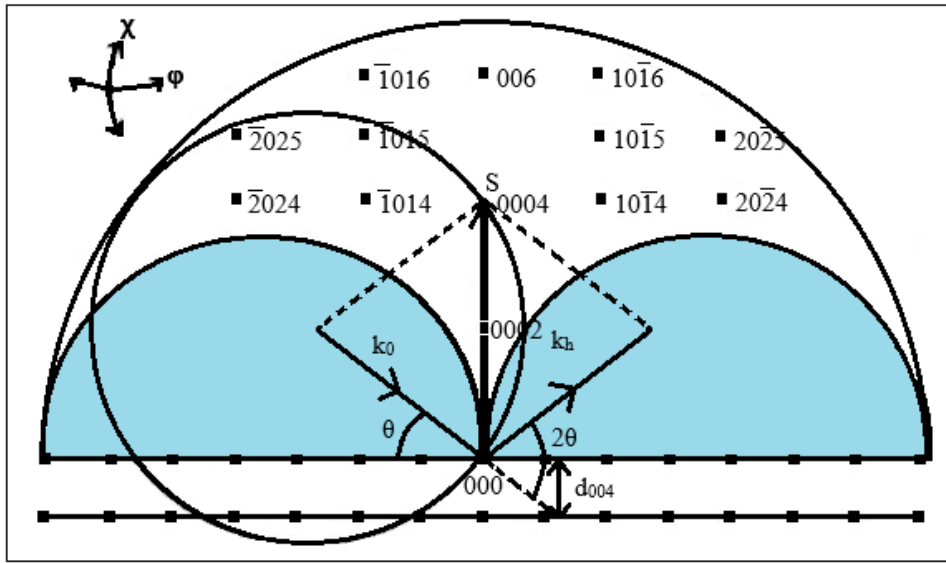


Şekil 3.5. X-Işını kırınım geometrisi; a) Bragg kırınımı b) S vektörü gösterimi

Hekzagonal (Altıgen) kristal yapıdaki sistemler için dörtlü indis (hkil) gösterimi kullanılır [79]. Çizelge 3.1'de indis (notasyon) gösterimleri görülmektedir. Çizelgede örnek olarak (105) düzlemi verilmiştir. (105); (h=1, k=0, l=5) görülmektedir. 'i' inidisi $i = -(h+k)$ 'dir. $i = -(1+0) = (-1)$ 'dir. Buradan (105)=(10-15) yani üç indisli gösterim dört indisli gösterime dönüşmüş olur. Kristal düzlemleri arası mesafenin değişmesi kırınım deseni pozisyonlarının değişmesinde etkilidir.

Çizelge 3.1. X-Işını kırınımında kullanılan parantezler

Açıklama	Üçlü indis gösterim	Dörtlü indis gösterim
1 - Yansıma	105	10-15
2 - Düzlem	(105)	(10-15)
3 - Düzlem ailesi	{105}	{10-15}
4 - Kırınım	[105]	[10-15]
5 - Kırınım ailesi	<105>	<10-15>



Şekil 3.6. Ters uzayda üç boyutlu Bragg Yansıması

Şekil 3.6'da baskılayıcı iç düzlem zorlanması ile GaN'a kristalin Poisson tepkisinden kaynaklı düzlem dışı mesafenin artmasına sebep olur. Örnek ters örgü uzayında (0002) orijine olan mesafesi azalır. Gelen demet (k_0) vektörü ile kırınıma uğrayan demet vektörü (k_h) kristal örnek ile uygun açı oluşuyorsa, Şekil (3.5b)'de görüldüğü gibi $S = k_h - k_0$ ters örgünün bir noktasında sonlanır. Saçılma vektörü S 'nin uzunluğu, 2θ (θ , gelen ışın demetinin atom düzlemiyle yaptığı açı) açısına bağlıdır. Açı değişirse S 'nin değeri de değişir. X-ışını kaynağından örneğe gönderilen ışın demetinin açısı ω 'nın değiştirilmesi S vektörünün yönünü değiştirir. Kristal hareket ettirilerek ters örgü uzayı da hareketlenir. Şekil 3.6'da Ewald küresi oluşumunu ters örgü uzayında ω , 2θ açısını değiştirerek ve saçılma vektörü S 'yi değiştirerek birde kristali hareketini değiştirerek görebiliriz.

Kırınımın oluşumu için; Şekil 3.6’da Çapı $2/\lambda$ olan bir çemberde kristal, $1/\lambda$ yarıçapa sahip çemberin (üç boyutlu küre) merkezine konulmuş gibi düşünülür. Gelen X-ışını demeti (k_0) kristalin içinden geçtikten sonra küreyi terk ettiği nokta kristalin ters örgüsünün başlangıç noktası olarak alınır. Ters örgü vektörünün son noktası küre üzerinde ise kristal merkezi olarak kabul edilen nokta ile ters örgü vektörünün son noktasından arasında saçılma vektörü oluşur. Saçılma vektörünün maksimum değeri gelen (k_0) ışın demetinin iki katı $2/\lambda$ değeri kadar arttığında kırınım oluşması için bir düzleme çarptığı noktada kırınım oluşur.

Kristallerde düşüğe olsa yüksek şiddetli kırınım noktaları görülür. Ancak düşük şiddetli kırınımın görülmesi kırınım pikinde genişlemeye neden olur. Bu genişleme ters örgü uzayında mikroyapısal kusurlara neden olur. Bir başka mikroyapısal kusur (mozaik blokların makroskobik boyut ve şeklindeki bozulması) ise cihazın çözünürlüğünden de kaynaklı olabilir. Uygun olmayan çözünürlük pik genişlemesine neden olur.

Ters örgü uzayında ΔS genişlemeyi ifade edilir. $S = 1/d = 2\sin\theta/\lambda$ eşitliği yazılır. Asıl örnek özellikleri ΔS ile bağlantılıdır. $L = 1/\Delta s$, $\alpha = \Delta s/s$ ve $\varepsilon = \Delta s/2s$, (L)’nin sınırlı büyüklüğünde genişleme orijine olan uzaklık ile değişmez (Saçılma vektörü S ’den bağımsız olduğu durum). Örgü aralığındaki burkulma ve genişleme açısı (α), mikro gerinim ($\varepsilon = \Delta d/d$), bileşik/gerinimin gradyenti, orijine olan uzaklık ile artış gösterir. Yani saçılma vektörü S ile bağlantılıdır [24].

Zorlama - gerilme

Kristal yapıda örgü sabitinin genişleme veya daralmasıdır. III-Nitrür grup tabakaların farklı alttaş tabakalarında büyütülmesi ile örgü uyumsuzluğu oluşur. Zorlama (ε) ve gerilme (σ) oluşumu görülür. Zorlama (ε_{ij}), gerilme (σ_{ij}), elastik sabit (C_{ij}) hekzagonal kristal yapıda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Zorlama, örgü parametresi a_i , j yönünde (denge değerinde) uygulanan gerilmenin değişimi ile hesaplanır. Eş. (3.14) ile ince filmin alttaş üzerinde büyütülmesinde, düzlem içi zorlama ε_{II} bileşenleri ile hesaplanır. Burada örgü sabitleri a_S ve a_L ile ifade edilir.

$$\varepsilon_{II} = \frac{a_S - a_L}{a_L} \quad (3.14)$$

a_S ; alttaşın üstünde büyütülen film örgü sabiti, a_L ; alttaşın düzlem içi örgü sabiti.

Düzlem içi ile düzlem dışı gerilme için $\sigma_{II} = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ ve $\sigma_{\perp} = \sigma_{zz}$ kullanılır. Eş. (3.13) tekrar düzenlenirse;

$$\begin{pmatrix} \sigma_{II} \\ \sigma_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} + C_{12} & C_{13} \\ 2C_{13} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{II} \\ \varepsilon_{\perp} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Eşitlikte $\sigma_{\perp} = 0$ 'dır (düzlem dışı gerilme). Alttaş üzerine büyütülen ince film büyüme yönünde yapı değişikliğine uğrar. Eş. (3.14) ve Eş. (3.15) ile verilen zorlama bileşenleri, Eş. (3.16)'daki gibidir.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{II} \\ \varepsilon_{\perp} \end{pmatrix} = -2 \frac{C_{13}}{C_{33}} \quad (3.16)$$

Büyüme kutupsuz bir düzlem (m düzlemi) üzerinde y eksenine dik $(1\bar{1}00)$ olursa, düzlem içi zorlamada örneğin özellikleri yöne bağlı anizotropiklik gösterir.

Düzlem içi zorlamalar; ε_{xx} , ε_{zz} Düzlem dışı zorlama; ε_{yy} arasında Eş. (3.17) bağlantı yazılabilir.

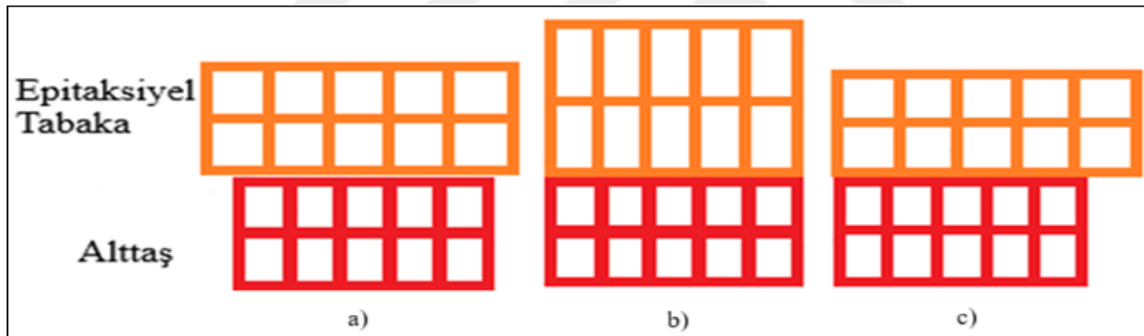
$$\varepsilon_{yy} = \frac{C_{12} \varepsilon_{xx} + C_{13} \varepsilon_{zz}}{C_{11}} \quad (3.17)$$

Çizelge 3.2’de zorlamanın hesaplanması için gerekli elastik sabitleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 GaN ve AlN elastik sabitler

		GaN	AlN
Elastik Sabitler (GaP)	C ₁₁	390	396,0
	C ₁₂	145	137,0
	C ₁₃	106	108,0
	C ₃₃	398	373,0

Büyütme esnasında epitaksiyel tabaka ile alttaş arasında uyumsuzluk var ise alttaş epitaksiyel tabakaya uyum sağlamak için deforma olmaya yatkındır. Epitaksiyel tabaka kalınlığı kritik kalınlığın üzerine ulaştığında epitaksiyel tabaka kuvveti dengeleyemez ve örgü yapısı eski haline geri dönmeye çalışır. Gevşeme meydana gelir. Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. a) Farklı örgü sabitine sahip epitaksiyel tabaka ile alttaş b) Zorlama c) Gevşeme

Gevşeme oluştuğunda örgü sabiti eski değerine gelmeyebilir. Gevşeme “R” ile ifade edilir.

$$R = \frac{a_L - a_S}{a_{L0} - a_S} \quad (3.18)$$

a_{L0} ; Gerilmenin olmadığı serbest durumda epitaksiyel tabaka örgü sabitidir. $a_L = a_{L0}$ ($R=0\%$)’da epitaksiyel tabaka orijinal örgü sabiti durumundadır. $a_L = a_S$ ($R=0\%$)’da epitaksiyel tabaka ile alttaş tabaka gergin durumdadır.

Williamson Hall metodu (W-H)

Kristal kusurlarında, $\varepsilon \approx \beta_s / \tan\theta$ eşitliği tepe genişlemesinin bozulması ile zorlamaya bağlıdır. Eş. (3.11) kırınım açısı θ 'ya bağlıdır. Mikro yapısal küçük kristal boyutu ve zorlama, kristal boyutunun belirlenmesinde kırınım açısı Scherrer eşitliği $1/\cos\theta$ bağlı iken ancak W-H yöntemi $\tan\theta$ bağımlı değildir. Değişik θ açılarında zorlama ve boyut analizi W-H eşitliği ile hesaplanır.

$$\beta_{hkl} = \beta_s + \beta_D \quad (3.19)$$

$$\beta_{hkl} = \left(\frac{k\lambda}{D \cos\theta} \right) + 4\varepsilon \tan\theta \quad (3.20)$$

Eşitliği düzenlenerek Eş (3.21) yazılır.

$$\beta_{hkl} = \left(\frac{k\lambda}{D} \right) + 4\varepsilon \sin\theta \quad (3.21)$$

Dislokasyon

Dislokasyon yani çizgisel kusur; kristal yapılarda atomların dizilişlerinde meydana gelen çizgi boyunca görülen kusur olarak tanımlanır. Burger vektörü “b”, örgü parametresine karşılık geldiğinde mükemmel kristal yapı görülür. Karışık, vida tipi ve kenar tipi dislokasyonlar Kuntz tarafından bulunan Eş. (3.22) ve Eş. (3.23) ile hesaplanır. Dislokasyonlar burger vektörü “b” ile β =FWHM değerlerine bağlı olarak hesaplanır [80].

$$D_{kenar} = \frac{\beta^2}{9 b^2_{kenar}} \quad (3.22)$$

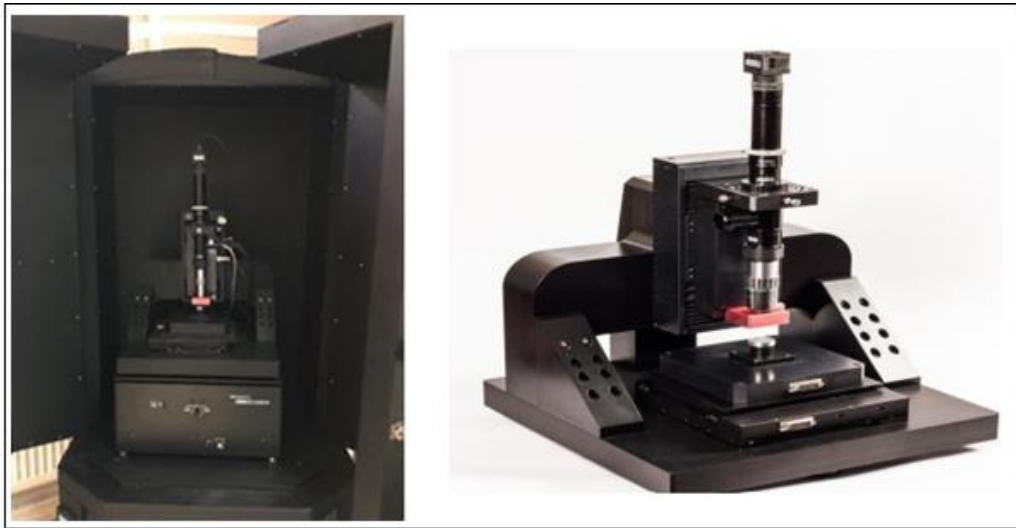
$$D_{vida} = \frac{\beta^2}{9 b^2_{vida}} \quad (3.23)$$

Eşitliklerde kullanılan GaN ve AlN için Burgers vektörü kenar ve vida sabitleri sırası ile GaN; $b_{vida}=0,5185$ nm, $b_{kenar}=0,3189$ nm, AlN ; $b_{vida}=0,49792$ nm, $b_{kenar}=0,31114$ nm olarak verilir.

3.2.3 Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

AFM Yüksek çözünürlüklü, nanometre boyutunda (10^9m) malzeme işleme, görüntüleme ile ölçme özelliğine sahiptir. AFM'nin görüntü çözünürlüğü prob ucunun boyutuna bağlıdır. Esnek bir yaya monte edilmiş (cantiliver) çok ince bir uç, numuneye yaklaştığında uç ile numune yüzeyi arasında atomlar arası etkileşim kuvvetlerini tespit ederek numunenin yüzey morfolojisinin oluşumunu sağlar. Ölçümü yapılan AFM görüntülerinden büyütülen örneğin büyüme modu, yüzey pürüzlülüğü, yüzeyi üzerinde oluşan kusur tipleri ve kusur yoğunlukları bilgisine ulaşılabilir. Buna ek olarak AFM, örneğin bazı fiziksel (şekil, sertlik, cilalama, sürtünme, aşınma, korozyon, kayganlaşma, kaplama vb.), kristal yüzeylerin yapısı, etkileşimi (element veya molekül dizilimleri vb.) ile elektriksel özellikleri hakkında bilgi veren bir tarama tekniğidir.

AFM ölçümlerinde görüntü elde etmek için hareketli olan konsolun ucuna bir prob tutturulur. Tarama esnasında tutturulan uç örneğin yüzeyi ile fiziksel temas kurduğu işlem moduna göre; kontak modülü, itici modül ve hafif dokunma modülü AFM olarak adlandırılır. Tutturulan Prob uç, örneğin yüzeyine yakın bir mesafesine getirilirse, prob uç ile örnek yüzeyi arasında oluşan kuvvetler Hooke yasasına göre konsolda bükülmeye sebep olur. Buradan AFM yüzeyin görüntüsünü elde edilir. Tez çalışmamızda Resim 3.3'te gösterilen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan "Pro AFM" ölçüm cihazı kullanılmıştır.



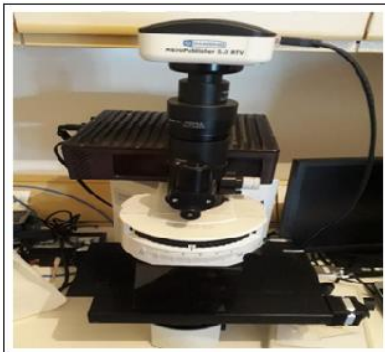
Resim 3.3. "Pro AFM" ölçüm cihazı

3.2.4. Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi ile maddelerin içeriği hakkında bilgi edinilir. Örneği uyarmak için yüzeyine görünür bölgede tek frekanslı elektromanyetik dalga gönderilir ve saçılan ışık incelenir. Örnek ve ışık etkileşimi örnek hakkında bilgi verir.

Raman spektroskopisi analizinde, molekül atomları ile etkileşen ışığın frekans boyu arasındaki fark ile saçılan ışığın frekans boyu arasında oluşan fark ölçülür. Bu fark “*Raman kayması*” olarak isimlendirilir. Raman spektrumu için örnek güçlü bir lazer monokromatik ışın kaynağıyla uyarılır. Örnekten saçılan ışın belirli bir açıdan ölçülür. Saçılan ışın spektrumu bize molekülün simetrisi, bağın uzunluğu, bağ açılarının molekül yapısı hakkında bilgi verir.

Malzemedeki moleküller şiddetli bir monokromatik ışın demeti ile etkileşiminde foton saçılması gerçekleşir. Kırılan ışığın enerjisinin büyük bir kısmı malzeme ile etkilenen ışığın enerjisine eşit ise ($\lambda_{\text{yansıyan}} = \lambda_{\text{lazer}}$) bu tür elastik saçılma olayı Rayleigh saçılmasıdır. Elastik saçılmanın yanında aydınlatma kaynağından gönderilen saçılan ışığın çok az bir kısmı (yaklaşık on milyonda sadece bir foton) uyarılarak ($\lambda_{\text{yansıyan}} > \lambda_{\text{lazer}}$) elastik olmayan saçılım gerçekleşir. Moleküler titreşimlerle fotonların enerji kaybetmesi ya da kazanması olayı “Raman saçılması” adını alır. Enerji alış-verişinde enerji kaybedilmesi stokes, enerji kazanılması anti-stokes olarak isimlendirilir. Raman saçılmasının diğer saçılmalardan farkı, saçılan ışının bir bölümünde frekans değişimi olur. Bu değişimler ile moleküllerdeki titreşim enerji geçişleri ile oluşur. Bu tezde Raman spektroskopi görüntülemesi Gazi Üniversitesi Eczacılık Fakültesi bünyesinde bulunan “Micro Publisher 5.0 RTV” model cihaz ile alınmıştır (Resim 3.4).



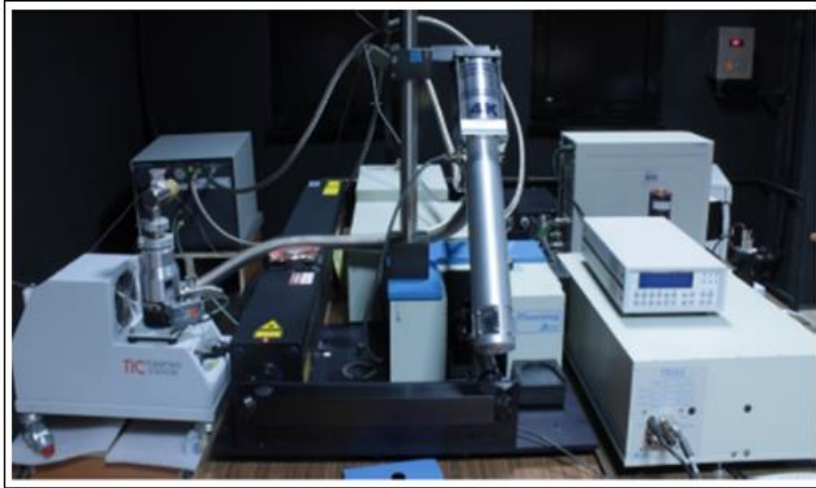
Resim 3.4. Raman spektroskopi cihazı

3.2.5. Fotoluminesans spektroskopisi (PL)

Fotoışma spektroskopisi (fotoluminesans (PL)) ölçümü, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan “Jobin Yvon” marka PL ölçüm sistemi kullanılarak yapıldı. Tez çalışmasında Resim 3.5’deki 55 mW gücünde ($\lambda = 325$ nm) He-Cd lazer ışık kaynaklı cihaz ile ölçümler gerçekleştirildi. Fotoışma spektroskopisi ışıyım spektroskopisi ve uyarım spektrometresi ölçülebilir.

Numuneye zarar vermeyen bir ölçüm tekniğidir. Bu teknik ile maddenin optiksel özellikleri davranışları incelenir. Hızlı sonuç elde edilen bir test tekniğidir. Ayrıca üretilen çok katmanlı yapıların kalitesinin belirlenebilmektedir.

Çalışma prensibi; malzeme yüzeyine lazer ışık kaynağından enerji gönderilir. Malzeme uyarılarak yasak enerji bandından bir üst enerji bandına geçer. Bir üst seviyeye geçen elektronlar kararlı duruma dönmek için foton salınımı gerçekleştirir. Foton salınımının enerjisi malzemenin bant genişliği enerjisi kadardır. Bu olay fotoluminesans olarak adlandırılır.



Resim 3.5. Fotoluminesans spektroskopisi cihazı



4. DENEYSEL BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde yüksek elektron mobiliteli transistör oluşumunda tampon katmanlar olan AlN ve GaN malzemelerin ve HEMT uygulamaları için GaN/AlInN/AlN heteroyapının yapısal analizi, kusur özellikleri, optiksel özellikleri ve morfolojik özelliklerinden bahsedildi.

4.1. GaN/AlInN/AlN Heteroyapılar İçin Tampon Malzemeler

AlGaN/GaN ve AlInN/GaN tabanlı Yüksek Elektron Mobiliteli Transistörler, son yıllarda yüksek frekans ve güç gerektiren uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır. Bu malzemeler; geniş bant aralığı, sürekli piezoelektrik polarizasyon alanı, yüksek pik, yüksek elektron hızı gibi benzersiz özelliklere sahiptir [81,82]. AlGaN/GaN yapısı ile hetero arayüzeyden çıkan elektron gazı (2DEG) üzerinde en çok çalışılan yapılardan biridir. HEMT yapıların büyüme parametreleri optimize edilerek başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, AlGaN/GaN arayüzeyinde, ince bir AlN tabakası oluşturmak, taşıyıcı yoğunluğunu artırırken, 2DEG alaşım saçılımını azaltır ve taşıyıcıların formatını korur. Büyük yüzdelere ayarlanabilen alüminyum içeriği, kanalda yük yoğunluğuna ve taşıyıcı biçimlenmesine neden olan polarizasyonun artmasına yardımcı olur.

AlInN tampon katmanı kullanmanın avantajı, heteroyapı bileşenlerini ayarlayarak iyi bir kafes ve polarizasyon eşleşmesi elde edebilmesidir. In oranı %18 olarak ayarlanırsa GaN örgüsü alttaş tabaka ile iyi uyum sağlar. Oluşan polarizasyon yükü, sürekli polarizasyon olarak tanımlanır. Çünkü yapının piezoelektrik polarizasyonu sıfırdır. AlInN tampon katmanlı HEMT'ler, AlGaN tampon katmanlı HEMT'lere göre daha yüksek taşıyıcı yoğunluğu elde etmek için üretilir.

AlInN tabanlı yapıların epitaksiyel büyütülmesinde zorluklarla karşılaşılır. AlN ile InN yapının büyümesi değişik sıcaklıklar gerekir. AlInN'ın alaşım oranının kontrollü büyümesi kolay değildir. Her geçen gün AlInN ve AlInN/GaN heteroyapıları üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. AlInN HEMT yapılarla ilgili yapılan çalışmalar sonucunda uygulamalar mevcuttur [78]. Bu heteroyapılarının temel avantajı, yüksek arayüz tabakası taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Sürekli ve piezoelektrik polarizasyon ile oluşan levha

taşıyıcı yoğunluğu, AlGaIn/GaN için olası değerle örtüşmektedir. HEMT yapısı, geleneksel alt tabakalar üzerinde büyütülebilir [83,84].

Safir (Al_2O_3) ile GaN ve AlN katmanlarının termal genleşme katsayıları arasındaki fark ve kafes uyumsuzluğu, dislokasyon yoğunluğunun 10^8 - 10^{10}cm^{-2} 'ye kadar çıkmasına neden olur. Oluşan dislokasyonlar AlInN yapıların kusurlarını etkiler. Bu nedenle GaN ve AlN epitaksiyel filmlerin büyütülmesi sıklıkla mozaik bloklar halindedir. Yüksek yoğunluklu tedirgin edici dislokasyonlar, eğim ve bükülme açıları ile ilişkili olarak karakterize edilirler. Kusurlu kristal yapıları cihazların performansını ve dayanıklılığını büyük oranda etkiler [85]. HEMT cihazlar kusurları bakımından GaN ve AlN tampon katmanları içeren yapılar ile benzerlikler göstermektedir. AlN ve GaN tampon katmanlarına sahip HEMT'ler, endüstriyel üretimde büyük potansiyele sahiptir. Birçok araştırmacı kusurlarını en aza indirmek için çalışmalar yapmıştır [85,86]. Örneklerin simetrik ve asimetrik tepe genişlemeleri kullanılarak, kusur analizi, burulma ve eğim açıları, katmanların dislokasyon yoğunluk değerleri belirlenir [87,88]. Genel olarak, simetrik bir düzlem yansımalarının tam genişliğinin yarı maksimumunda FWHM belirlenmesi yeterlidir. AlInN katmanlı HEMT cihazının HRXRD ile kusurlarını araştırmak için büyüme koşullarının optimize edilmesi gerekir. Literatürde deneysel olarak elde edilen eğim ve burulma açılarıyla ilgili birçok çalışma dikkat çekmektedir [88,89].

4.2. Deney

Tez çalışmamızda;

1. GaN/AlInN/AlN yüksek elektron hareketine sahip transistör yapı örnekleri “Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (MOCVD)” kullanılarak Al_2O_3 üzerinde büyütüldü.
2. Büyütülen örneklerin yapısal özellikleri X-ışını kırınımı (HRXRD) ölçümleri “Bruker D8 Discover” XRD cihazı ile gerçekleştirildi.
3. Hesaplamalarda ölçümü yapılan rocking eğrilerine ait pik pozisyonları ile birlikte pik genişlemelerinden yararlanıldı. Kusurlar için HEMT yapının AlN ve GaN katmanlarının kenar-vida tipi dislokasyonları, ortalama eğim-bükülme açıları, yanal-dikey mozaik kristal boyutu karakterizasyonu gerçekleştirildi. Yapının simetrik-asimetrik pik düzlemleri kullanılarak kalitesine bakıldı. Mozaik yapı kusurlarını belirlemek için, Williamson Hall Metodu (W-H) metodundan faydalanıldı. Bu metot ile; eğim-bükülme

açıları, tedirgin edici dislokasyonları (TDs), yanal - düşey kristal boylarına bakıldı. Simetrik (00.l) yansımalar ve sallanma eğrileri faydalanarak eğim açısı tanımlandı. Büküm açısı, asimetrik (hk.l) yansımalar ve w taramaları kullanılarak belirlendi. Indiyum oranına bağlı mozaik yapı kusur analizi (12.1) kristalinin yönelimde gerçekleştirildi.

4. Morfolojik özellikleri atomik kuvvet mikroskobu (AFM) yöntemi kullanıldı.
5. Optik karakteristik özellikleri Raman Spektroskopisi ve Fotoluminesans (PL) ölçme tekniği ile gerçekleştirildi.

4.2.1. MOCVD tekniği ile GaN/AlInN/AlN/Safir HEMT büyütülmesi

GaN/AlInN/AlN heteroyapı MOCVD yöntemi ile (00.l) c-yönelimli safir alttaş üzerinde büyütüldü. In, Ga, Al ve N kaynakları ile birlikte Trimetilgalyum (TMGa), Trimetilindiyum (TMIn), Trimetilaliminyum (TMAI) ve amonyak (NH_3) organik sıvı gazlar kullanıldı. Bu gazlar H_2 ile taşındı. İstenilen malzemenin alttaş üzerinde tabakalar halinde kristallenmesi sağlandı. Büyütme işleminden önce safir alttaş yüzey temizliği A örneği 1060°C , B örneği 1080°C , C örneği 1070°C sıcaklıkta Hidrojen gaz akışı altında 10 dakika, 100 mbar basınçta ısıtılma işlemi tabi tutuldu. GaN/AlInN/AlN heteroyapı sırasıyla A, B ve C örneği olarak isimlendirildi. Her üç örnek için GaN tampon tabaka ile AlInN bariyer tabaka arasında ince AlN ara tabaka bulunmaktadır. Örneklerin şematik diyagramı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Büyütme adımları;

1. Safir alttaş üzerinde örnekler 740°C ile 840°C arasında sıcaklıkta Al çekirdeklenme tabakası üzerinde büyütülür.
2. Reaktör 1100°C ile 1140°C sıcaklığa ayarlanarak AlN tampon tabakası büyütülür.
3. Üç örnekte GaN tabakayı büyütülmesi için uygun büyütme şartlarını oluşturmak için 2 (iki) dakika büyütme durduruldu. Sıcaklık 1040°C ile 1050°C aralığına gelmesi beklendi.
4. AlN ara tabaka 800°C büyütüldü.
5. AlInN üçlü bariyer tabaka ve GaN kapak tabaka 800°C sıcaklıkta ve 50 mbar basınç ile büyütme tamamlandı.

Çizelge 4.1. A, B ve C örneklerinin büyütülme şeması

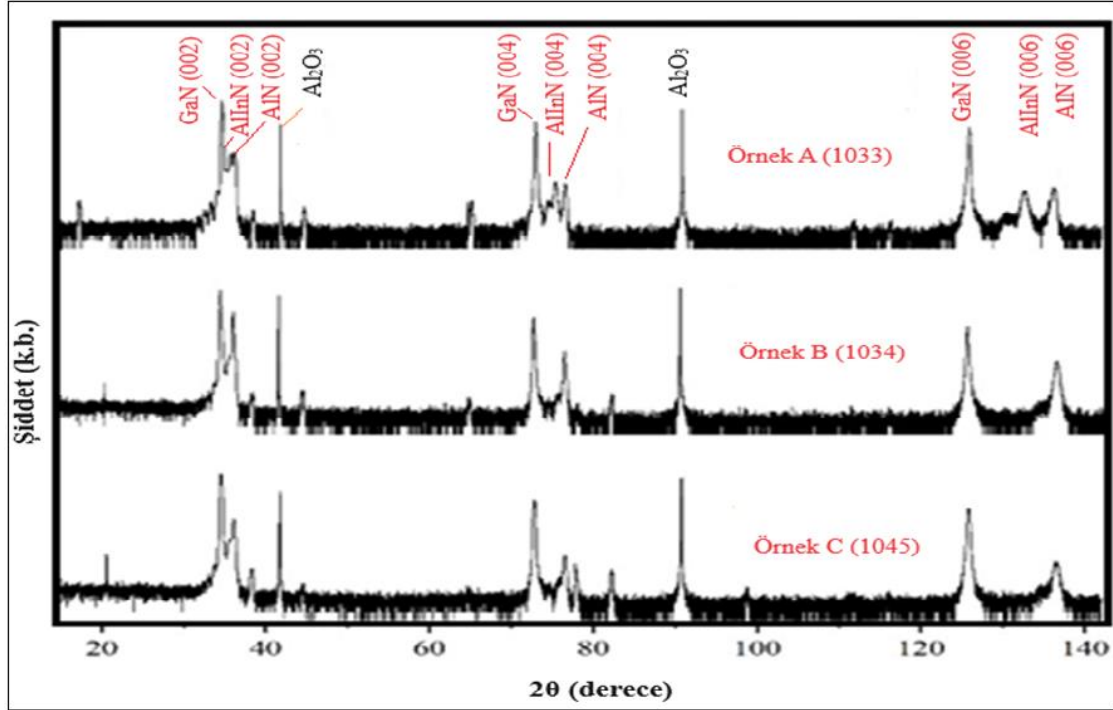
Büyütme Katmanları	Örnek A	Örnek B	Örnek C
GaN Kapak Tabaka	~ 2 nm	~ 4 nm	~ 4 nm
AlInN Ara Tabaka	~8 nm	~ 14 nm	~ 14 nm
AlN Ara Tabaka	~ 1 nm	~ 1 nm	~ 1 nm
Ud-GaN Tabaka (5)	~ 90 nm	~ 90 nm	~ 90 nm
Ud-GaN Tabaka (4)	~ 180 nm	~ 180 nm	~ 180 nm
Ud-GaN Tabaka (3)	~90 nm	~ 90 nm	~ 90 nm
Ud-GaN Tabaka (2)	~ 600 nm	~ 600 nm	~ 600 nm
Ud-GaN Tabaka (1)	~ 200 nm	~ 200 nm	~ 200 nm
HT- AlN Tampon Tabaka	~ 320 nm	~ 320 nm	~ 320 nm
AlN Çekirdek Tabaka	~ 15-20 nm	~ 15-20 nm	~ 15-20 nm
Safir (Al ₂ O ₃) (Alttaş)	330 µm	330 µm	330 µm

4.2.2. XRD analizi

Büyütülen örneklerin yapısal analizleri X-ışını kırınım tekniği ile (Bruker D8-Discovery yüksek çözünürlüklü (goebel aynasına ve 1.540 Å dalga boyunda radyasyona sahip Ge (220) simetrik monokromatörlü) difraktrometre) gerçekleştirildi. Hybrid kristal monokromatörlü (tek renklilik), yüksek çözünürlüklü tek dalgaboylu pikler kullanıldı. Kaynak olarak yüksek hassasiyetli CuK α_1 tüpü kullanıldı. Simetrik ve asimetrik düzlemlerde maksimum kırınımın şartlarının sağlanması için θ ve 2θ eksenleri dışında phi (ϕ) ve psi (ψ) açısına bağlı x, y, z koordinatları kullanıldı.

A, B, C örneklerinin θ - 2θ XRD taramasına yapıldı ve 2θ -şiddet grafiği Şekil 4.1'de görülmektedir. İncelenen örneklerde piklerin keskin ve dar genişliği ile piklerin tam olarak ayrışıp ayrışmadığı bölgelerin ayrımı yapılarak kristal kalitesi hakkında değerlendirme yapılabilir [90]. Simetrik (002) düzleminde GaN tampon katmanı, AlInN bariyer katmanı ve AlN tampon katmanı için Bragg yansımaları izlenmiştir. (002) düzleminde GaN tepe pikinin sağında AlInN piki ile AlN piklerinin tam olarak ayrışmadığı, (004) düzlemi ile (006) düzlemlerinde ise piklerin birbirlerinden daha belirgin olarak ayrıldığı açıkça görülebilir. Piklerin keskin ve dar genişlikte olmaları, örneklerin epitaksiyel tabakaların kristal kalitesini verir. (002), (004) ve (006) düzlemleri için GaN, AlInN ve AlN tabakaların kırınım pik

değerleri Çizelge 4.2’de görülmektedir. Piklerin kristal kalitesinin katmanlar arasındaki pürüzlülükle alakalı olduğu değerlendirilebilir. GaN, AlInN ve AlN birbirleri ile uyumlu olduğu pik değerlerinden görülmekte olup kristalografik yapının hekzagonal kristal sistemi ile uyumlu olduğu değerlendirilebilir.



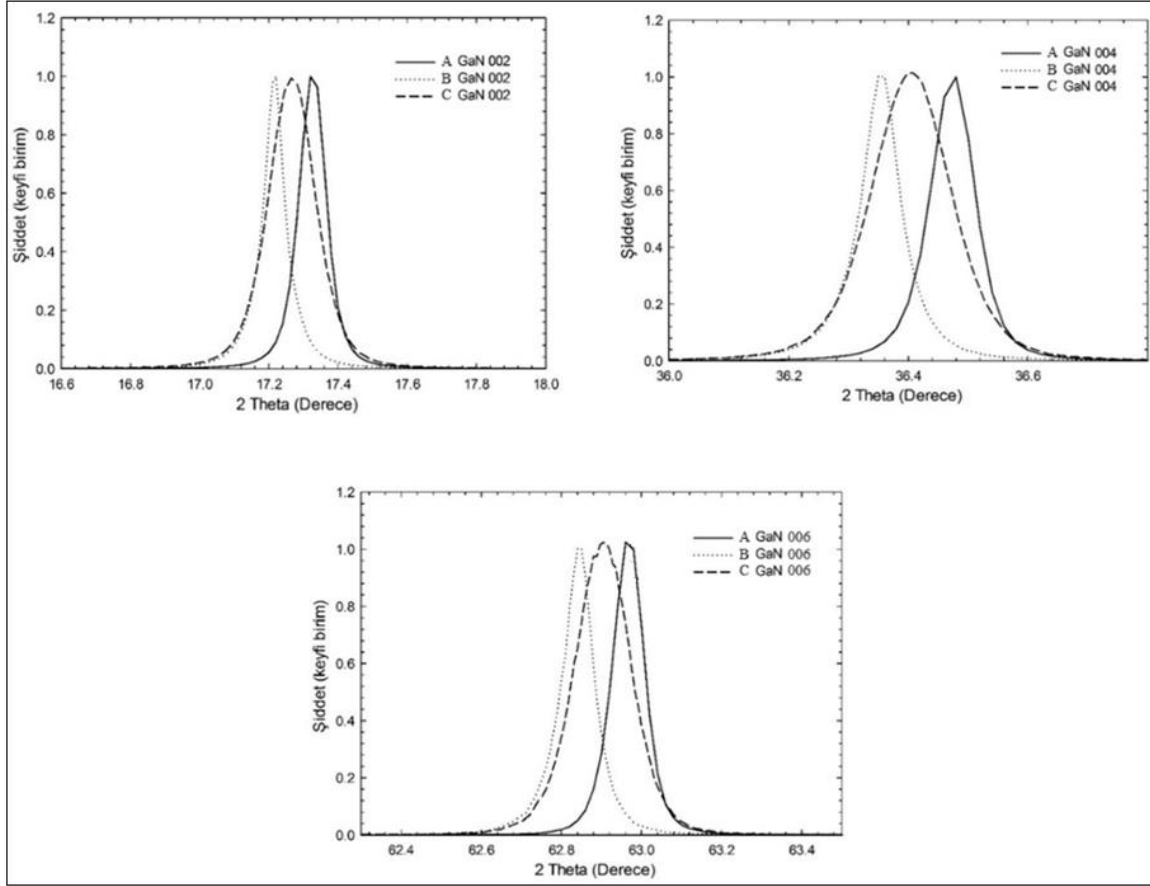
Şekil 4.1. A, B ve C örneklerinin θ -2 θ XRD taraması

AlN, GaN ve AlInN tabakalarına ait (002) düzlemindeki HRXRD piklerinin tam olarak ayrıışmaması, (004) düzlemindeki AlN, GaN ve AlInN tabakalarına ait piklerde ise (002) düzlemine göre daha iyi ayrıştığı ancak tam olarak ayrıışmamış pik pozisyonları, bu tabakadaki mikroyapısal kusurlar olarak değerlendirilir [91,92]. (006) düzleminde ise AlN, GaN ve AlInN tabakalarına ait piklerin diğer düzlemlere göre daha iyi ayrıışmış olması bu düzlemdeki tabakalar arası mikroyapısal kusurların daha az olduğu ve kristal kalitesinin diğer düzlemlere göre daha iyi olduğu gösterir [93,94].

Şekil 4.2 - 4.9’da pik pozisyon kaymaları görülmektedir.

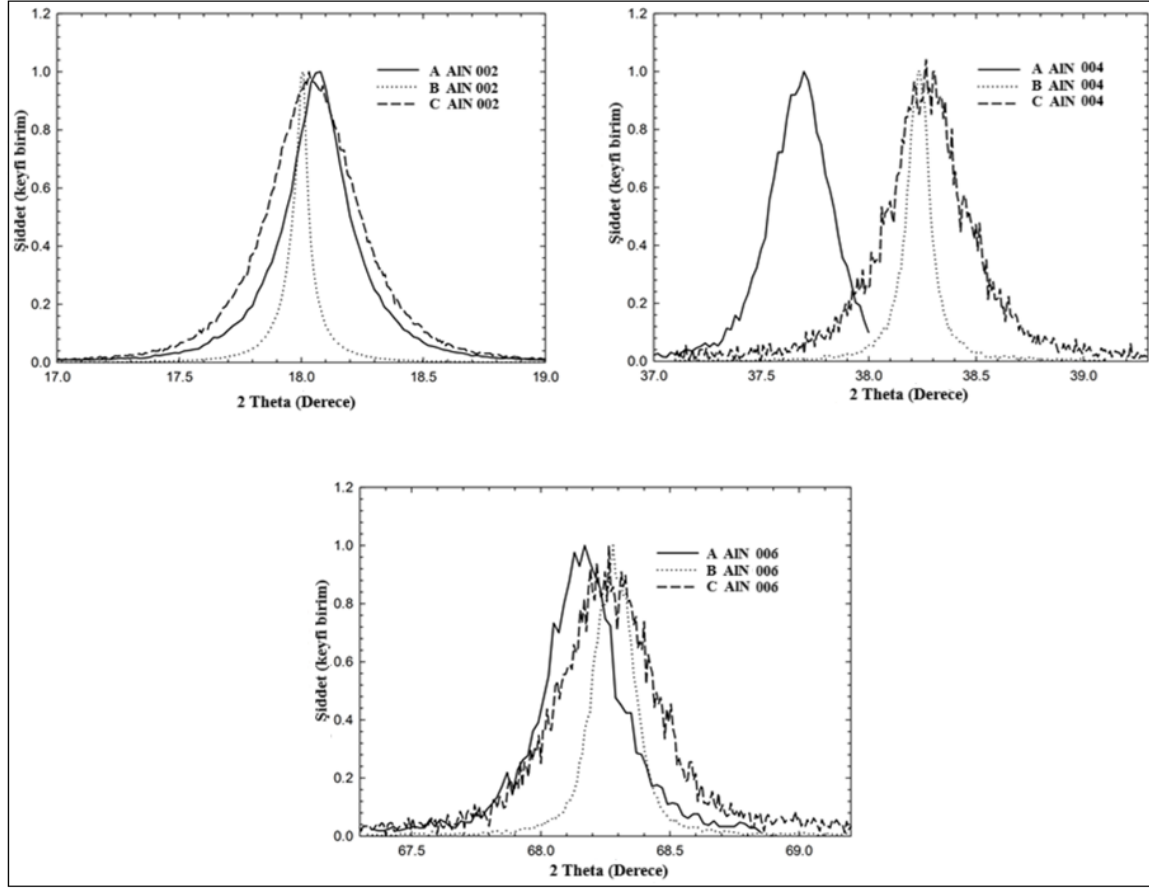
Çizelge 4.2. GaN, AlInN ve AlN için kırınım piklerin pozisyonları

	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C
GaN	(002)	34,6621	34,4359	34,5289
	(004)	72,9550	72,7160	72,8080
	(006)	125,9364	125,6980	125,8062
	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C
AlInN	(002)	35,6800	35,5111	35,5698
	(004)	75,4002	75,8638	76,6080
	(006)	132,6080	135,0086	134,7606
	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C
AlN	(002)	36,1680	36,0094	36,0948
	(004)	76,5120	76,4979	77,8043
	(006)	136,1920	136,6640	136,4728



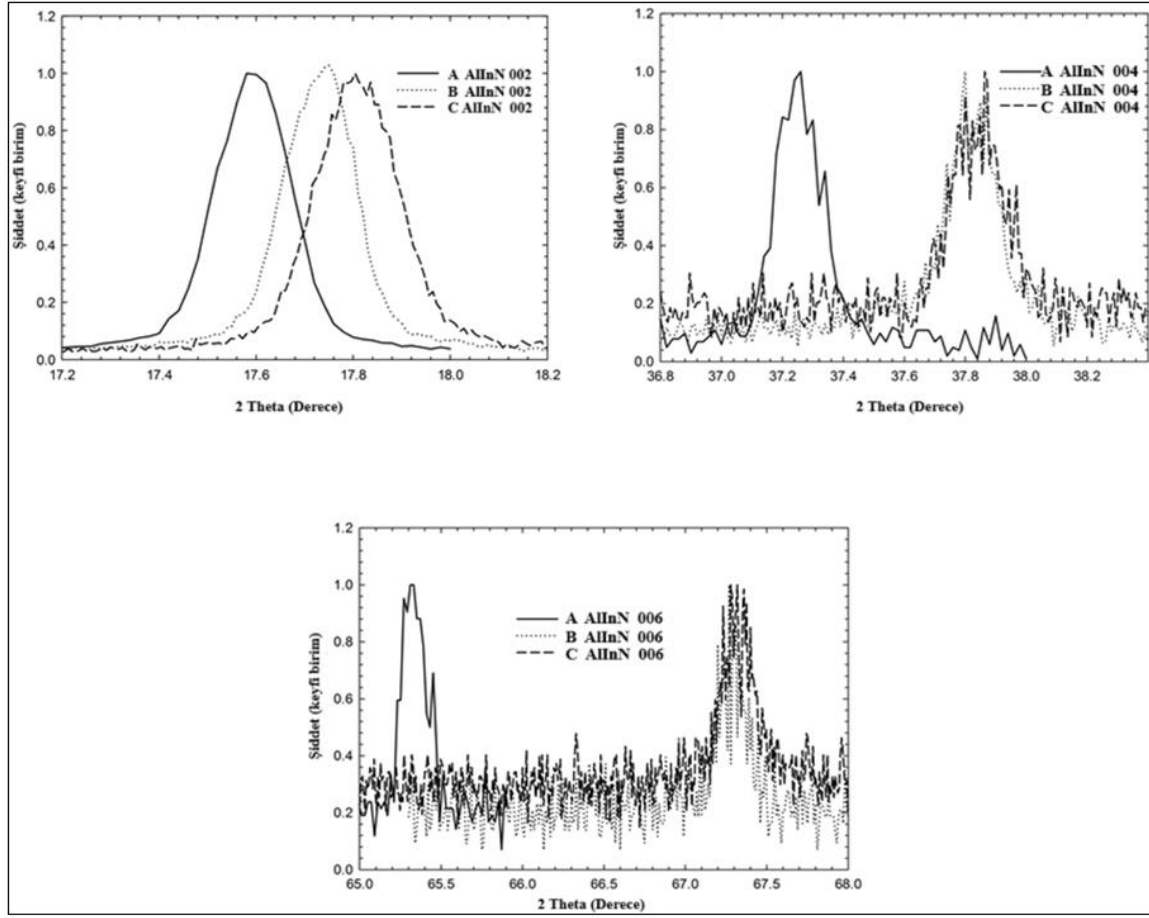
Şekil 4.2. A, B, C örneklerinin GaN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.2’de GaN tabakanın A, B ve C örnekleri için (002), (004) ve (006) simetrik düzlemde dönme eğrileri verilmiştir. Her örnek için dönme (rocking) eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.3’de görülmektedir. Çizelge 4.3 incelendiğinde A, B ve C örneği için GaN tabakanın (002), (004), (006) düzleminde FWHM değerlerinde B örneği değerlerinin birbirine yakın olduğu daha keskin ve daha dar pik yapısına sahip olduğu ve diğer A ve C örneklerinde (002) ve (006) düzleminde pik değerlerinin yakın olduğunu görmekteyiz. Bu durumda B örneğinin A ve C örneğine göre kristalitesinin daha iyi ve yüksek In oranına sahip olduğu sonucunu göstermektedir [95].



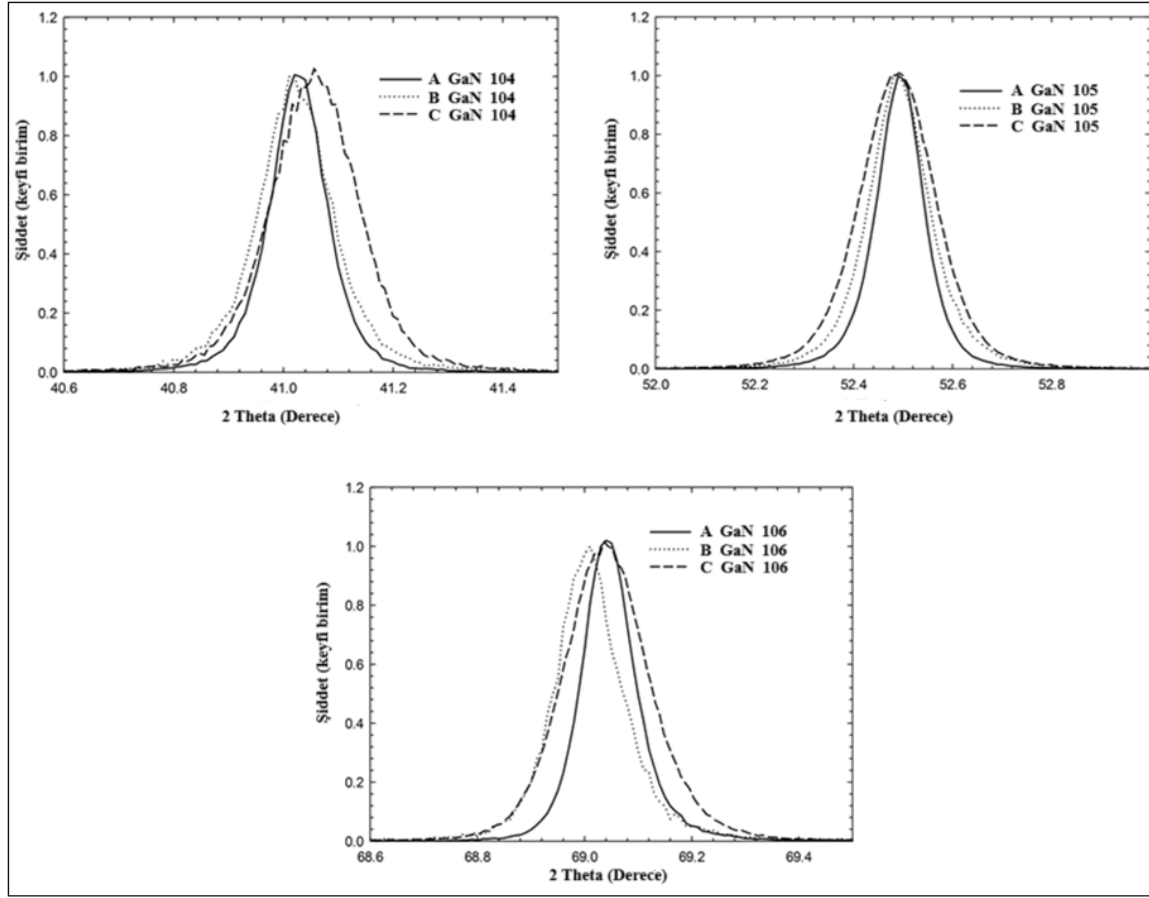
Şekil 4.3. A, B, C örneklerinin AlN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.3’de AlN tabakanın A, B ve C örnekleri için (002), (004) ve (006) simetrik düzlemde dönme eğrileri verilmiştir. Her örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.3’de görülmektedir. AlN tabakanın tüm düzlemlerinde B örneğinin daha keskin ve daha dar pik yapısına sahip olduğu ve diğer A ve C örneklerine göre daha iyi kristal yapısına sahip olduğu görüldü. Zor gözlemlenen pikler geniş φ taraması yapılarak gerçekleştirildi. Kristalografik sapma nedeni ile piklerde kaymalar olmaktadır. Öyle ki pik yarı genişliği FWHM değerleri ile miller düzlemlerinin kalitesi daha iyi analiz edilir.



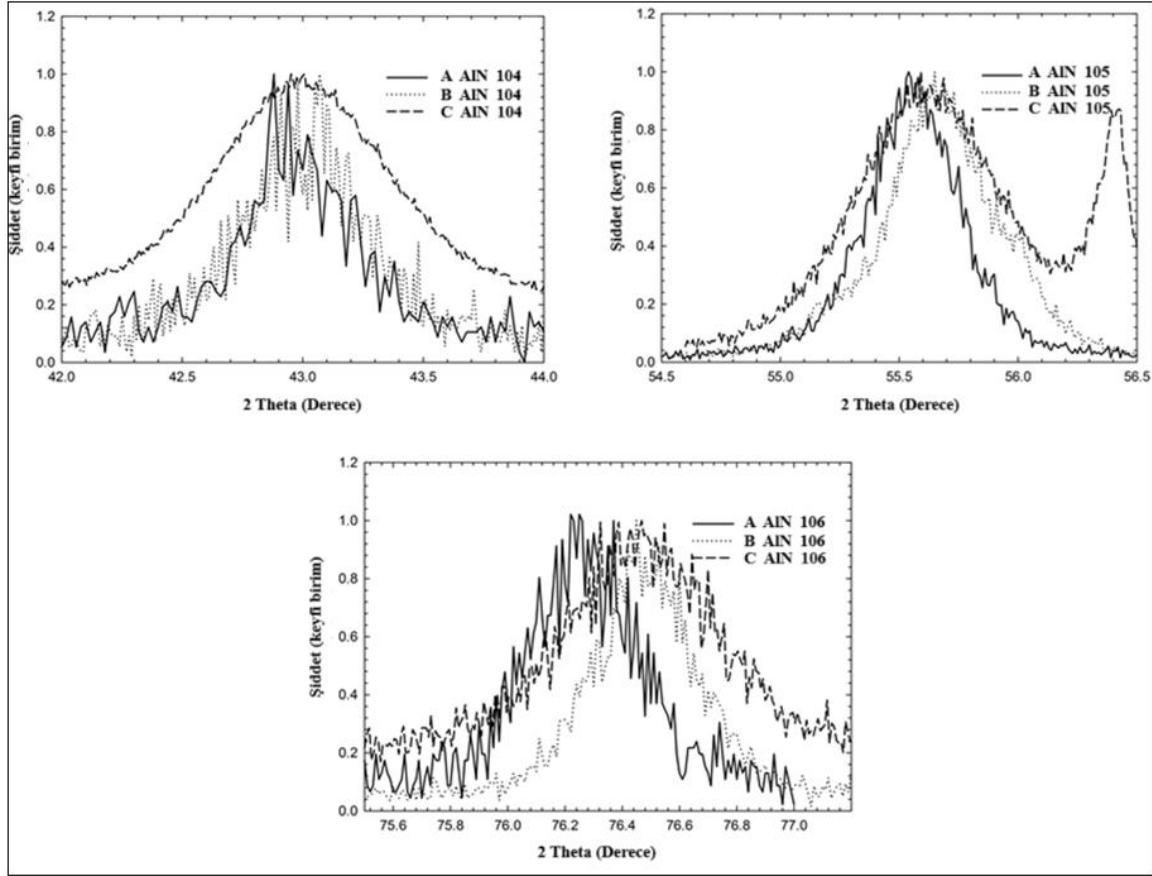
Şekil 4.4. A, B, C'nin örneklerinin AlInN tabakada simetrik (002), (004), (006) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.4'de AlInN tabakanın A, B ve C örnekleri için (002), (004) ve (006) dönme eğrileri verilmiştir. Her örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.3'de görülmektedir. AlInN tabakasına ait pik genişlikleri incelendiğinde oldukça geniş olduğu görülmektedir. B örneğinin daha keskin pik yapısına sahip olduğu, A ve C örneklerine göre daha iyi kristal yapısına sahip olduğu öngörüldü. Düzlemlerde görülen pikler arası kaymalar In oranından kaynaklanmaktadır. Piklerdeki kayma kristalografik düzlemlerden dolayı hassas ϕ taraması ile yapılan ölçümlere bağlıdır. Al yapısının büyütmedeki zorluğu ve ara tabaka AlInN yapısının zor çözünmesinden kaynaklı olduğu öngörülmektedir.



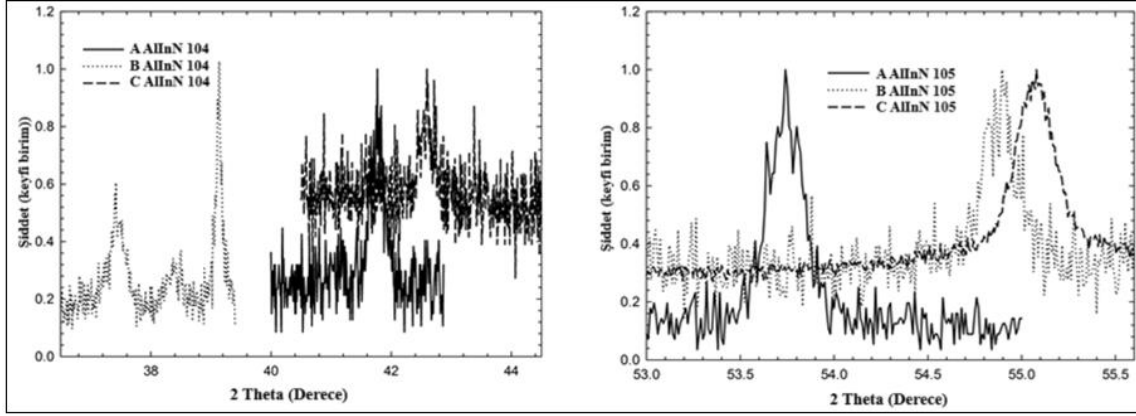
Şekil 4.5. A, B, C örneklerinin GaN tabakada asimetric (104), (105), (106) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.5’de GaN tabakanın A, B ve C örnekleri için (104), (105) ve (106) asimetric düzlemdeki dönme eğrileri verilmiştir. Üç örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.4’de görülmektedir. FWHM değerlerinden B örneğinin daha keskin ve dar pik yapısına sahip olduğu ve diğer A ve C örneklerine göre daha iyi kristal yapısına sahip olduğu örneklerin pik yarı genişliklerinin FWHM değerlerinden anlaşılmaktadır.



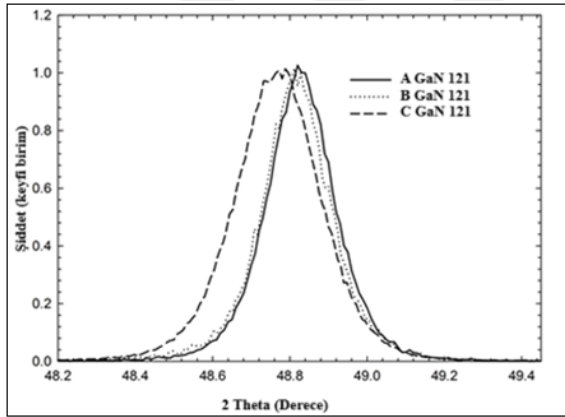
Şekil 4.6. A, B, C örneklerinin AlN tabakada asimetrik (104), (105), (106) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.6'de AlN tabakanın A, B ve C örnekleri için (104), (105) ve (106) asimetrik düzlemdeki dönme eğrileri verilmiştir. Üç örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.4'te görülmektedir. B örneğinin daha keskin ve dar pik yapısının olduğu ve diğer A ve C örneklerine göre daha iyi kristal yapısına sahip olduğu Hekzagonal yapıda (105) düzleminde görülen ikinci pik, yapının eğiminden kaynaklı farklı yörüngelenmesine bağlıdır.



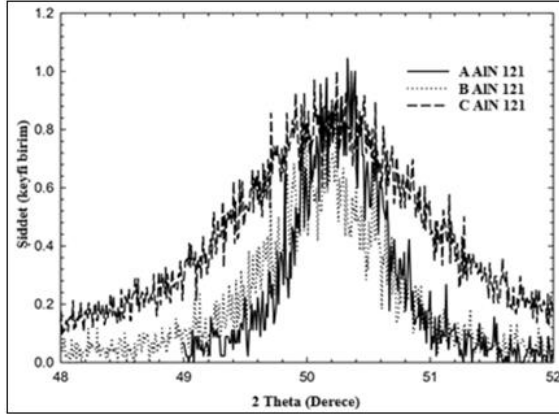
Şekil 4.7. A, B, C örneklerinin AlInN tabakada asimetrik (104), (105) düzlemlerine ait dönme eğrileri

Şekil 4.7’de AlInN tabakanın A, B ve C örnekleri için (104) ve (105) asimetrik düzlemdeki dönme eğrileri verilmiştir. Üç örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.4’de görülmektedir. Kristal yapının kusurundan kaynaklı (106) düzleminde pik elde edilememiştir. Piklerdeki kayma kristalografik yapı bozukluğuna bağlıdır.



Şekil 4.8. A, B, C örneklerinin GaN tabakada asimetrik (121) düzlemi dönme eğrisi

Şekil 4.8’de GaN tabakanın A, B ve C örnekleri için (121) asimetrik düzlemdeki dönme eğrileri verilmiştir. Üç örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.5’de görülmektedir. B örneği, A ve C örneklerinin pik değerlerine yakın, daha keskin ve dar pik yapısına sahip olduğundan daha iyi kristal yapısına sahiptir.



Şekil 4.9. A, B, C örneklerinin AlN tabakada asimetric (121) düzlemi dönme eğrisi

Şekil 4.9’de AlN tabakanın A, B ve C örnekleri için (121) asimetric düzlemdeki dönme eğrileri verilmiştir. Üç örnek için dönme eğrisinin pik yüksekliği yarı genişliği (FWHM) değerleri Çizelge 4.5’de görülmektedir. Ayrıca piklerin birbirlerinden belirgin şekilde ayrılmadığı görülmüştür. B örneği daha keskin ve dar pik yapısına sahip olduğu, A ve C örneklerine göre daha iyi kristal yapısına sahiptir.

Kristalografik yapı bozukluğundan (121) düzleminde AlInN yapısının ölçümleri yapılamamıştır.

Çizelge 4.3. GaN, AlN ve AlInN tabakanın simetrik düzlem FWHM değerleri

	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C
GaN	002	0,0936	0,0712	0,1549
	004	0,0881	0,0753	0,1517
	006	0,0932	0,0898	0,1593
AlN	002	0,2647	0,0663	0,3507
	004	0,2557	0,109	0,3318
	006	0,2660	0,1753	0,3657
AlInN	002	0,1839	0,1736	0,1947
	004	0,1822	0,1633	0,1411
	006	0,1839	0,0804	0,1198

Çizelge 4.4. GaN, AlN ve AlInN tabakanın asimetric düzlem FWHM değerleri

	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C
GaN	104	0,1174	0,1414	0,1729
	105	0,1082	0,1345	0,1744
	106	0,1089	0,0844	0,1762
AlN	104	0,3359	0,2091	0,6879
	105	0,4177	0,4463	0,5301
	106	0,4375	0,274	0,3852
AlInN	104	0,1644	0,0817	0,1780
	105	0,2203	0,1135	0,2157

Çizelge 4.5. GaN, AlN tabakanın asimetric düzlem FWHM değerleri

	Düzlem (hkl)	Örnek A	Örnek B	Örnek C)
GaN	121	0,1904	0,1894	0,2501
AlN	121	0,692	0,2225	0,8777

Şekillerde pik pozisyonlarındaki kaymalara karşılık gelmekte olup 20'ya karşı şiddet grafikleri görülmektedir. Pik pozisyonları elde edilirken (hkl) indislerinden “hk” sabit tutulur “l” yönlü düzlem seçilir. A, B ve C örneklerinin simetrik ve asimetric düzlemlerinde AlInN tabakasından dolayı bazı tabakalarda pik genişlemesi ile AlN ve GaN'da pik yarı genişlemeleri görülmektedir. In oranı değiştikçe, pik tepe noktalarının aralığı değişir. Şekil 4.1'de düzlemlerdeki pik tepe noktaları görülmektedir. Daha iyi ayrışmış tabakalara ait piklerde indiyum oranı daha yüksek iken kalınlık değeri daha küçük olduğu değerlendirilir. Hekzagonal yapının düzlem kalitesi ve kusur özellikleri, w-20 taramasıyla elde edilen tepelerin tam genişlikte yarı maksimum (FWHM) değerleri ile elde edildi [96]. Ayrıca Al içeren alaşımların optimizasyonu kolay olmadığı bu nedenle literatürde söz konusu alaşımlı yapı düzlemlerinden yansıyan piklerin yarı genişliklerinin düşük olduğu değerlendirilebilir [97].

Simetrik ve asimetric düzlemlerin dönme eğrilerinin FWHM değerlerinin büyümesi ve pik pozisyonlardaki farklılık, ısısal genleşme, tabakadaki dislokasyona bağlı olduğu ancak asimetric düzlemde FWHM değerinin yüksekliği tüm dislokasyonlardan kaynaklı

olabilirken, simetrik düzlemde vida tipi dislokasyonun katkı sağladığı değerlendirilir [98,99]. Kusurlar büyütme esnasında meydana gelmiş olabilir. Pik pozisyonları örgü parametresinin Eş. (4.2) ve Eş. (4.3) ile yapılmaktadır.

AlInN katmanlarının kalınlığı, yarı deneysel X-ışını dalga boyu denklemi kullanılarak AlInN ve GaN arasındaki girişim tepe açılarından belirlenir. Hesaplanan kalınlık değerleri sırasıyla 8,87, 6,5 ve 10,76 nm'dir. Üç örnekte de AlN ve GaN pik genişlikleri ayırt edilip edilememeleri ideal olmayan büyümeden kaynaklı olabilir [100].

Katmanların FWHM ve pik konumları Çizelge 4.6'de verilmiştir. Pik pozisyonlarından AlN, GaN ve AlInN yapının uyumlu olduğu ve kristalografik olarak yapıların hekzagonal kristal yapı ile benzer özellik gösterdiği değerlendirilebilir [101]. Bu değerler karşılaştırıldığında epitaksiyel katmanların kristal kalitesinin GaN ara katmanı içeren B, A ve C örneklerine göre sırasıyla azaldığı görülmektedir. AlN ara katmanı içeren numunelerin FWHM değerleri karşılaştırıldığında epitaksiyel katmanların kristal kalitesinin B, A ve C numuneleri sırasıyla azaldığı görülmektedir.

Üç örneğin kristal kalitesi de yaklaşık olarak aynı değişim eğiliminde bulunmaktadır. Örneklerin In ve Al oranı bileşimleri yazılım ile hesaplanır. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi simetrik ve asimetrik (hkl) düzlemlerinde pik konumları ve katmanların FWHM değerleri simetrik (002), (004), (006) düzlemlerindeki artan açı değeri ile FWHM değerlerindeki değişim kristal kalitesini göstermektedir.

Çizelge 4.6. GaN, AlN ve AlInN için A, B, C örnekleri tepe konumları ve FWHM değerleri

Düzlem (hkl)	Örnek A		Örnek B		Örnek C	
GaN	2θ	FWHM	2θ	FWHM	2θ	FWHM
(00.2)	17,32	0,093	17,21	0,071	17,26	0,154
(00.4)	34,47	0,088	36,35	0,075	36,40	0,151
(00.6)	62,96	0,093	62,84	0,089	62,90	0,159
(10.4)	41,02	0,117	41,02	0,141	41,05	0,172
(10.5)	52,49	0,108	52,49	0,134	52,48	0,174
(10.6)	69,04	0,108	62,84	0,084	68,03	0,172
(12.1)	48,82	0,190	48,81	0,189	48,78	0,250

Düzlem (hkl)	Örnek A		Örnek B		Örnek C	
AlN	2θ	FWHM	2θ	FWHM	2θ	FWHM
(00.2)	18,06	0,264	18,00	0,066	18,04	0,350
(00.4)	37,68	0,291	38,23	0,109	38,27	0,331
(00.6)	66,35	0,304	68,28	0,175	68,26	0,365
(10.4)	42,41	0,342	43,06	0,209	49,95	0,687
(10.5)	54,60	0,373	55,66	0,446	55,59	0,530
(10.6)	73,72	0,292	76,44	0,274	77,47	0,385
(12.1)	50,33	0,692	50,23	0,222	50,23	0,877

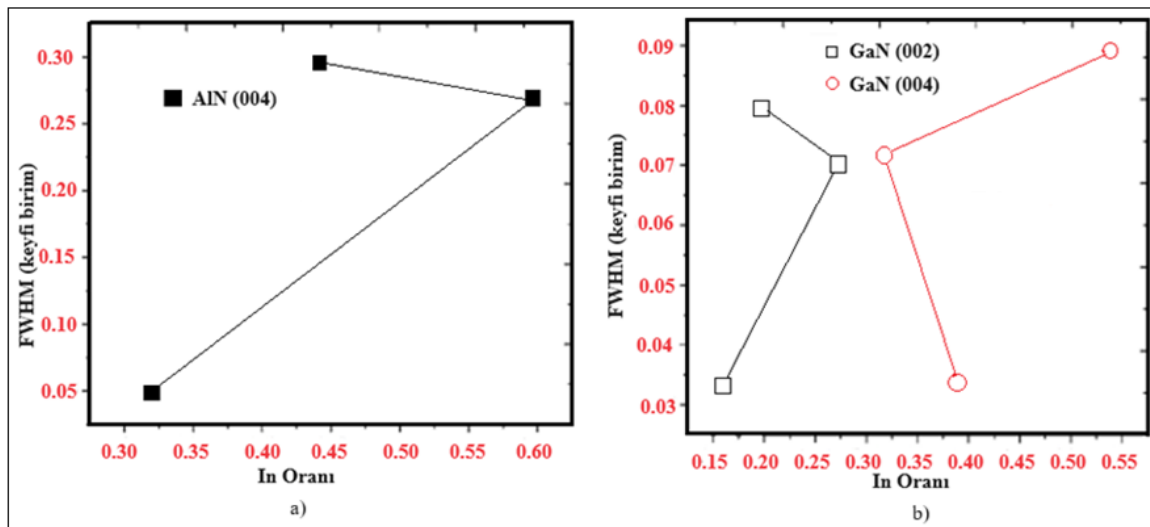
Düzlem (hkl)	Örnek A		Örnek B		Örnek C	
AlInN	2θ	FWHM	2θ	FWHM	2θ	FWHM
(00.2)	17,59	0,183	17,73	0,173	17,80	0,194
(00.4)	37,24	0,182	37,79	0,163	37,86	0,141
(00.6)	65,32	0,189	67,26	0,080	67,28	0,119
(10.4)	41,76	0,164	39,26	0,081	42,59	0,178
(10.5)	53,74	0,220	54,90	0,113	55,06	0,215
(10.6)	-	-	-	-	-	-
(12.1)	-	-	49,21	0,263	-	-

Asimetrik düzlemlerde ise pik konumlarının değişimi artan açı değerleriyle FWHM değerleri azalmaktadır. Bu durum pik genişliği olarak değerlendirilir. FWHM küçük değerleri yüksek kristalite ve düşük dislokasyon yoğunluğu ile yapının düzgünlüğünü göstermektedir. Örneklerimizde pik pozisyonlarına bağlı FWHM değerleri simetrik ve asimetrik düzlemlerde azalan ve artan durumlar göstermiştir.

A, B ve C numunelerindeki In oranına göre değişimi Şekil 4.10'da gösterilmektedir. HRXRD yöntemi ile ölçümü yapılan örgü parametrelerine bağlı zorlanma ile In oranı etkileri Kübik denklem yöntemi ayrıştırılabilir. Vegard yasası ile AlN ve InN pik pozisyonuna bağlı AlInN tabakasındaki In alaşım oranı (x) hesaplanır. AlN ve InN'a ait piklerin normalden farklı yüzdelik sapması örgülerde zorlanmanın göstergesi olabilir. AlInN alaşımındaki In (x) değeri de Vegard yasası ile hesaplanır Eş. (4.1). Eşitlikteki c-hesaplanmış örgü parametresi, c_0 evrensel örgü parametresini ifade eder.

$$x = \frac{c(\text{AlInN}) - c_0(\text{AlN})}{c_0(\text{InN}) - c_0(\text{AlN})} \quad (4.1)$$

AlInN için hesaplanan 2θ ve dönme In % oranları örnekler için hesaplanan In oranları Çizelge 4.7'de görülmektedir. Sabit büyüme sıcaklığında In % değeri azalan davranış sergilemiştir.



Şekil 4.10. GaN ve AlN tabakaların simetrik (002), (004) düzlemlerinde FWHM'nin In oranı gösterimi

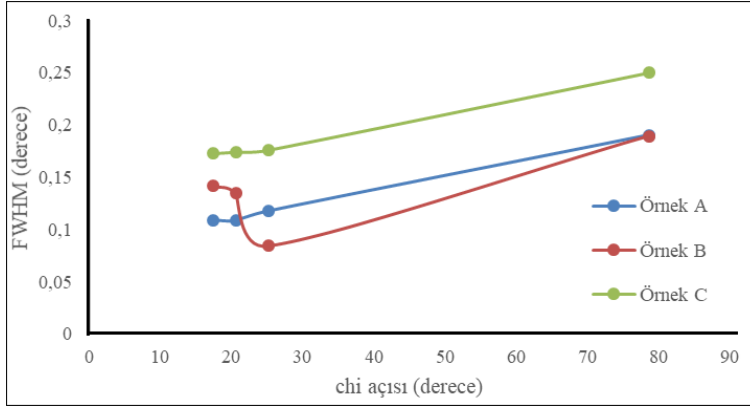
Çizelge 4.7. A, B ve C örneklerin % In oranları

Örnek	2θ	Dönme
A (1033)	15,18013	15,44739
B (1034)	6,074395	6,362169
C (1045)	4,920768	5,210197

A, B ve C örneklerinin Al bileşimleri Vegard yasası kullanılarak sırasıyla %87,4, %86,6 ve %86,4 olarak hesaplanmıştır. $(x = c_{AlInN} - c_{InN}) / (c_{AlN} - c_{InN})$. HEMT yapılarında GaN, AlN ve AlInN gibi nitrür alaşımları altıgen yapılara sahiptir. Simetrik ve asimetrik tepe noktalarının genişlemesi ile HEMT yapılarının kalitesi ölçülür. GaN ve AlN katmanlarında simetrik ve asimetrik sallanma eğrilerinin genişlemesi, plaka yüzeyine paralel eğim, bükülme açıları ve mozaik uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.10'da In oranına karşı tampon ve aktif katmanlar için simetrik (002) ve (004) kırınım tepe noktalarının FWHM'leri görülebilir. Artan In oran değerlerinde GaN katmanlarının FWHM'si (002) ve (004) düzlemlerinde birbirine benzer. Daha büyük FWHM'ler için AlN (004) ve GaN benzerlik gösterir. AlN'ın (002), (004) düzlemleri ile GaN'ın (002), (004) düzlemlerine göre zıt davranış gösterir. AlN (004) için FWHM değeri, artan In oranında azalan davranış gösterir. FWHM değerlerinin In oranına karşı bağımlılığı Şekil 4.10'da açıkça görülmektedir.

Φ 'nin FWHM değerleri χ artışıyla azalır, ancak w taramalarının FWHM değerleri ile artırır. Böylece, 78,6°'de asimetrik (121) χ ' de tüm taramaların yansıması daha iyi FWHM'ler verir. Yansıma düzlemi numune yüzeyine dik olduğunda 90°'ye ulaşır. Bu sonuçlar, daha büyük χ açıları için bükülme açılarına, sallanma eğrilerinin genişliği kadardır. Φ 'nin FWHM'si, eğim açısı değişimine sahip w açısı taramalarından büyüktür. Yani 78,6° 'de w ve Φ taramaları için burulma açısı ortalama FWHM değerleri olmalıdır. A, B ve C örneklerinin GaN katmanları burulma açısı değerleri sırasıyla 0,23°, 0,16° ve 0,14° olarak bulunmuştur. Şekil 4.11'de görülmektedir.

Oran arttıkça burulma açıları azalır. Bunlara benzer şekilde AlN katmanları için burulma açısı değerleri (12.1) χ veya ϕ tarama FWHM'lerinden hesaplanır. A, B ve C örnekleri için 0,28°, 0,33° ve 0,16° olarak belirlenmiştir. Küçük FWHM değeri yüksek kristallik, düşük mozaik kusurları ve pürüzsüz bir yapı anlamına gelir.



Şekil 4.11. Asimetrik düzlem GaN katmanları burulma açıları

4.2.3. Örgü parametreleri

Yüksek çözünürlüklü HRXRD tekniği ile yapısal özellikleri incelenen örneklerin (hkl) düzlemlerine göre a- ve c- örgü parametreleri karşılaştırılarak hata oranlarına bakıldı. Büyütme koşullarına bağlı kristal kaliteleri gözlemlendi ve farklılar olduğu görüldü. HRXRD tekniğinde paralel demette bulunan $k_{\alpha 1}$ ve $k_{\alpha 2}$ piklerinin birbirinden ayrılması ve $k_{\alpha 2}$ 'nin ortadan kaldırılması için Goebel ayna ve Ge 022 (+,-,-,+) monokromatör kullanıldı. Simetrik ve asimetrik yansımaların ölçümleri yapılarak (θ) Bragg açısı, (τ) örgü eğim açısı; $\theta = (\theta_+ + \theta_-)/2$ ve $\tau = (\theta_+ - \theta_-)/2$ eşitlikleri kullanılarak hesaplanır [102]. Hekzagonal AlInN birim hücrenin örgü parametreleri (a- ve c-), (hkl)'nin yansıma açıları ile bulunur.

Örgü parametresinin hesaplanmasında kullanılan Vegard yasasından; AlInN için yapılan hesaplamada InN örgü parametresi (x) ve AlN'in (1-x) kadar evrensel örgü parametresi toplamı kullanılır. Örnekteki In içeriği (x)'dir. Vegard yasası ile a- ve c- örgü parametreleri;

$$a_{\text{AlInN}} = (x)a_{\text{InN}} + (1 - x)a_{\text{AlN}} \quad (4.2)$$

$$c_{\text{AlInN}} = (x)c_{\text{InN}} + (1 - x)c_{\text{AlN}} \quad (4.3)$$

Eş. (4.2) ve Eş. (4.3) ile deneysel değerlere ulaşabiliriz. Literatürdeki gerçek değerler kullanılırsa kesin sonuçlar elde edilir. Bulunan sonuçlardan hata hesabı yapılır. Örneklerin In oranları Çizelge 4.7'de görülmektedir.

Ayrıca AlN yapının örgü parametresini hesaplamak için kullanılan diğer yöntemde ise kübik sistem referans alınır. $\sin\theta$ ve $\cos\tau$ Eş. (4.4) elde edilir. AlInN için (x) değerinden meydana gelen gerilme kaynaklı katkı Eş. (4.5)'deki kübik denklem ile hesaplanır.

$$c = \frac{\lambda l}{2\sin\theta \cos\tau}, \quad a = \frac{\lambda\sqrt{4/3\sqrt{h^2+hk+k^2}}}{2\sin\theta \sin\tau} \quad (4.4)$$

$$Px^3+Qx^2+Rx+S=0 \quad (4.5)$$

Eşitlikte 'P, Q, R ve S' sabitleri; Poisson oranı, InN ve AlN' a ait a-, c- örgü parametresidir. Vegard yasası ve Poisson denklemlerindeki (x) değerinden gerilme bulunur.

Vegard Yasası, bragg yasası ve kübik denklem yöntemi ile örneklerin AlInN tabakası için 800°C'de hesaplanan a- ve c- örgü parametreleri Çizelge 4.8'de görülmektedir. İncelenen üç örneğin (hkl) düzlemlerinde a- ve c- örgü parametreleri birbirine yakın olduğu gözlemlendi. Büyütme koşullarına bağlı kristal kalitelerindeki farklılıklar üç numunede de görüldü.

Çizelge 4.8. AlInN tabakanın sabit büyütme sıcaklığındaki örgü parametreleri

AlInN	T	C _{vegard}	C _{bragg}	C _{kübik}	a _{vegard}	a _{bragg}	a _{kübik}
Örnek/Birim	(°C)	nm	nm	nm	nm	nm	nm
A	800	0,5091	0,5091	0,5091	0,3186	0,3136	0,3137
B	800	0,5027	0,5026	0,5027	0,3094	0,3096	0,3092
C	800	0,5019	0,5017	0,5019	0,3078	0,3090	0,3086

4.3. AlN/GaN/AlInN Yapının Mozaik Kusurları

Bu kısımda yanal-dikey mozaik boyut, düzlem eğilme açısı, kenar-vida dislokasyonları ele alınmıştır.

4.3.1. Williamson Hall grafiği yanal - dikey mozaik boyut ve düzlem eğilme açısı

Bragg yansıma genişlemelerine, radyal yönde taranan simetrik yansımaların neden olduğu, genişlemenin alt tabakaya dik dikey kristal boyut ile c-eksenli heterojen gerilme kaynaklı

olduğu değerlendirilmektedir. z- ekseninde, gelen ve yansıyan dalga vektörü bulur. Bu dalga vektörü ile örneklerin simetrik ve asimetrik taramaları yapılır.

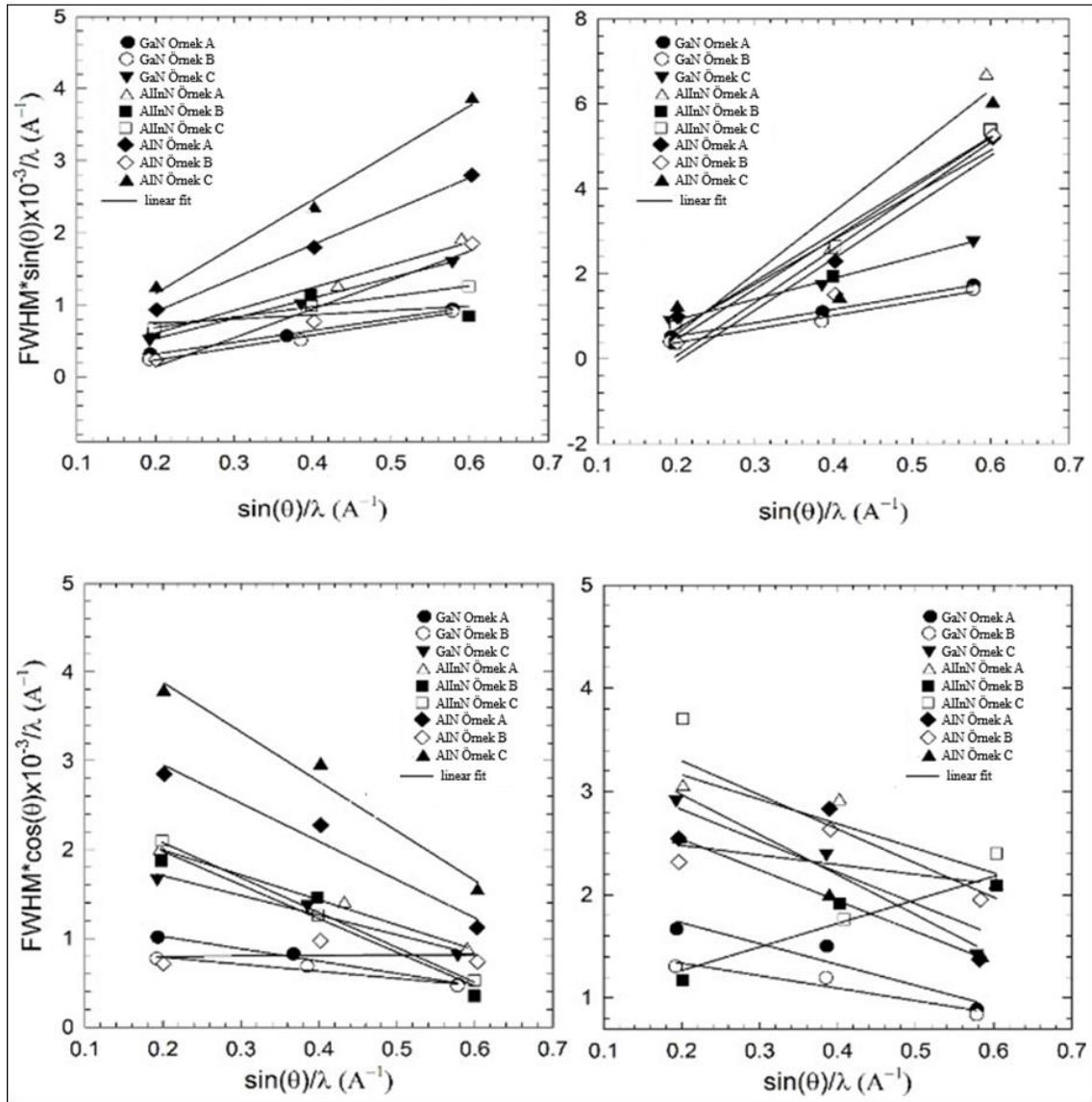
Simetrik kırınımlar yanal kristal boyut ve mozaik blokların eğimi ile bulunur. Bu kırınımlara z- eksenine dik XRD dönme pik eğrilerindeki genişleme sebep olur [94]. Yansıma düzleminin genişlemesi ile bu iki etki arasında bağımlılık görülür. Williamson-Hall grafiğinden faydalanılarak her iki etki ayırt edilebilir. Bu grafik FWHM yansıma açıları ile çizilen doğrusal bir grafikdir. Yansıma açıları dönme taraması (rocking) eğrilerinden elde edilir. Bu FWHM $\sin(\theta)/\lambda - \cos(\theta)/\lambda$ fonksiyonlarının $\sin(\theta)/\lambda$ 'ya karşı grafiğidir [103,104].

Bu çalışmada, AlN tabakasının burulma açısı değerleri In oranının artmasıyla önce artar, daha sonra azalır. Ayrıca (121) düzleminin HRXRD tepe nokta pikleri bozulmadığından AlInN katmanı için burulma açıları belirlenmemiştir. HEMT yapısının simetrik kırınım geometrisi, yanal uzunlukları ve eğim açısı dönme eğrilerinin genişlemesine neden olur. Bu iki etkinin katkısı yansıma derecesinde genişleyerek doğrusal bağımlılığa neden olur. Buna bağlı olarak iki etkiyi birbirinden ayırmak için Williamson-Hall grafiği kullanılabilir. Ortaya çıkan grafiğin doğrusal bir grafik olduğu görülür. Yansıma derecesinin fonksiyonu Şekil 4.12'de FWHM $\sin(\theta)/\lambda$ ve $\cos(\theta)/\lambda$ 'ya karşı $\sin(\theta)/\lambda$ çizilmiştir. FWHM, ölçülen tepe noktasının yarı maksimumdaki genişliğidir. X-ışınının dalga boyu ile geliş açıları λ ve θ ile ifade edilir. Williamson-Hall grafiğinin eğiminden faydalanılarak ve bu grafiğin y eksenini kesiştiği noktanın tersi ile yanal mozaik boyut uzunluğundan düzlemin eğim açısı bulunur. Eğim açısı ve yanal mozaik kristal uzunluk değerleri Çizelge 4.9'da sunulmaktadır. GaN için In içerik eğim açısı değerlerinin artmasıyla birlikte önce azalır, sonra artar. AlN katmanları için aynı değer, azalan ve artan bir davranış göstermektedir. Yanal mozaik uzunlukları bize GaN ve AlN katmanı için azalan ve artan davranış gösterir. Tabaka boyutlarındaki farklılık hızlı soğumadan olabileceği değerlendirilebilir.

Çizelge 4.9. A, B, C örneklerinin mozaik özellikleri

GaN/AlInN/AlN	Yanal Boyut ($\times 10^3$)	Dikey Boyut ($\times 10^3$)	Eğim ($\times 10^{-3}$)
Örnek/Birim	nm	nm	derece
A	40,1/116/14,9	346/172/174	1,6/3,2/4,6
B	3,89/0,72/0,67	475/164/572	1,7/0,6/4
C	12,2/1,14/3	209/157/89	2,8/1,4/6,5

Şekil 4.12’de katmanların dikey mozaik blokları için hesaplanan Williamson-Hall grafiği eğrileri görülmektedir. $L^{-1}=0.9/2y_0$ ’da doğrusal grafiğin y eksenini ile kesişme noktası kullanılmıştır. Gerinim doğrudan bu çizgilerin eğimi ile belirlenir. Dikey mozaik uzunlukları ve heterojen gerinim değerleri Çizelge 4.9’de sunulmaktadır. GaN ve AlN’in dikey mozaik uzunlukları önce artan sonra azalan davranış görülmüştür. Ayrıca GaN ve AlN katmanı için dikey mozaik boyut uzunluk değeri, yanıl mozaik boyut uzunluğu ile zıt bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu farklılık büyümeden kaynaklıdır.



Şekil 4.12. A, B, C örnekleri için Williamson Hall grafikleri

4.3.2. Kenar ve vida dislokasyonlar

Al_2O_3 , SiC ve Si gibi kafes uyumsuzluğuna sahip levhaların GaN ve AlN gibi altıgen katmanlarla kullanımı yüksek dislokasyon yoğunluğu sundukları için zordur. 10^8 - 10^{12} cm^{-2} aralığındaki dislokasyonlar tedirgin edici (TD) dislokasyonlar olarak kabul edilir [105-108]. Bu çalışmada, AlInN/GaN/AlN epikatmanları safir üzerinde büyütülerek yüksek dislokasyon yoğunluğu elde edilmiştir. Kristal seviyesinden ve mozaik blok yapısından kaynaklanan kusurları görebilmek için ilk yöntem D_{kenar} ve D_{vida} tipi dislokasyon yoğunlukları Eş. (4.6) ve Eş. (4.7) ile hesaplanır [109,110].

$$D_{\text{kenar}} = \frac{\beta^2}{9 b^2_{\text{kenar}}} \quad (4.6)$$

$$D_{\text{vida}} = \frac{\beta^2}{9 b^2_{\text{vida}}} \quad (4.7)$$

Eşitlikte β , FWHM değerini ifade etmektedir. HRXRD dönme eğrileri ile ölçülür ve örneklerin kristallik durumunu belirler. “b”, Burgers vektörünün uzunluğudur. (Burgers vektörü GaN; $b_{\text{vida}}=0,5185\text{nm}$, $b_{\text{kenar}}=0,3189\text{nm}$ ve AlN; $b_{\text{vida}}=0,49792\text{nm}$, $b_{\text{kenar}}=0,31114\text{nm}$). AlInN epikatmanı ve GaN katmanları için karışık tip dislokasyon yoğunluğu Eş. (4.8) ile hesaplanır.

$$D_{\text{mix.}} = D_{\text{kenar}} + D_{\text{vida}} \quad (4.8)$$

Çizelge 4.10’da kenar ve vida tipi dislokasyon yoğunluklarını gösterilmektedir. GaN katmanında vida ve kenar tipi dislokasyon yoğunlukları önce artmakta, sonra azalmaktadır. AlN katmanında vida tipi dislokasyon yoğunluğu azalan ve artan kenar tipi dislokasyon yoğunluğu artan ve azalan bir davranış sergilemektedir. İkinci yöntem ile kenar - vida tipi dislokasyon yoğunlukları, burgers vektörüne, eğim açısına, yanal mozaik boyut uzunluğa bağlıdır.

Dislokasyon türleri, yanal mozaik uzunluğuna, eğime açısına ve bükülme açısına bağlıdır. Metzger ve arkadaşları tarafından rapor edildiği gibi [111,112] GaN (002) yönelimli epitaksiyel filmler için ortalama burkulma açısı ($b=1/3(11.0)$) burgers vektörü, dislokasyon yoğunluğu ile ilişkilidir. Ayrıca ortalama eğim açısı vida tipi dislokasyon yoğunluğu,

$b=(001)$ burgers vektörü ile ilişkilidir. Vida tipi dislokasyon yoğunluğu Eş. (4.9) ile hesaplanabilir. Eş. (4.9)'da $\alpha_{eğim}$ bir mozik kusur eğim açısı, b_{vida} burgers vektör uzunluğudur.

Çizelge 4.10 GaN ve AlN için dislokasyon yoğunlukları (birinci ve ikinci metod)

Dislokasyon Tipi	Birim	Örnek A	Örnek B	Örnek C
Vida DL (GaN)x10 ⁸	(cm ⁻²)	0,69/1,11	0,77/0,63	0,2/0,3
Vida DL (AlN)x10 ⁸	(cm ⁻²)	0,61/9,57	0,45/0,60	1,19/1,68
Kenar DL (GaN)x10 ⁹	(cm ⁻²)	4,05/0,39	5,42/0,6	2,11/1,02
Kenar DL (AlN)x10 ⁹	(cm ⁻²)	3,19/4,87	44,1/6,96	31,9/9,82

$$N_{vida} = \frac{\alpha^2_{(eğim)}}{4.35|b_{vida}^2|} \quad (4.9)$$

Kenar tipi dislokasyon, burgers vektörü ($b=1/3(11.0)$) kristalin yüzeyinin normalı çevresinde azimutual dönüşü ile bir araya gelir. Kenar tipi dislokasyon yoğunluğu ile burkulma açısı hesaplanabilir [113,114]. Dislokasyonlar küçük parçacık boyutu sınırında toplanmış ise kenar tipi dislokasyon yoğunluk hesabı Eş. (4.10) ile yapılır. Denklemden; α_ϕ asimetrik düzlemlerin pik genişlemesi ve b_{kenar} burgers vektör uzunluğudur.

$$N_{kenar} = \frac{\alpha_\phi}{2.1|b_{kenar}|L|} \quad (4.10)$$

Asimetrik düzlem tepe genişlemeleri, burgers vektörünün uzunluğu ile yanal mozaik boyutun uzunluğuna bağlıdır. Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi kenar tipi dislokasyon yoğunluğu ile vida tipi dislokasyon yoğunlukları arasında fark vardır. Dislokasyondaki bu hareket plastik deformasyonuna neden olur. Kenar tipi dislokasyonda, atomların yarı düzleminin ucu boyunca lokalize kafes bozulması mevcuttur. Kenar tipi dislokasyonlar kayma gerilimi ile birlikte hareket ettiğinden vida tipi dislokasyon hareketi kayma gerilimi ve kayma deformasyonu ile sonuçlanır. Kristallerin büyük açılarda tane sınırlarının karakteristik özelliği, ince amorf bir bölge ile bozulur. Kayma düzlemindeki süreksizliğe tane sınırdaki atom dislokasyonu neden olur. Bu dislokasyon tane sınırınca durdurulursa istiflenmeler meydana gelir. Parçacık boyutu daha küçükse dislokasyonlar daha sık toplanır. Her üç örnekte de AlN katmanı için dislokasyon yoğunluğunun değişimi, GaN katmanına

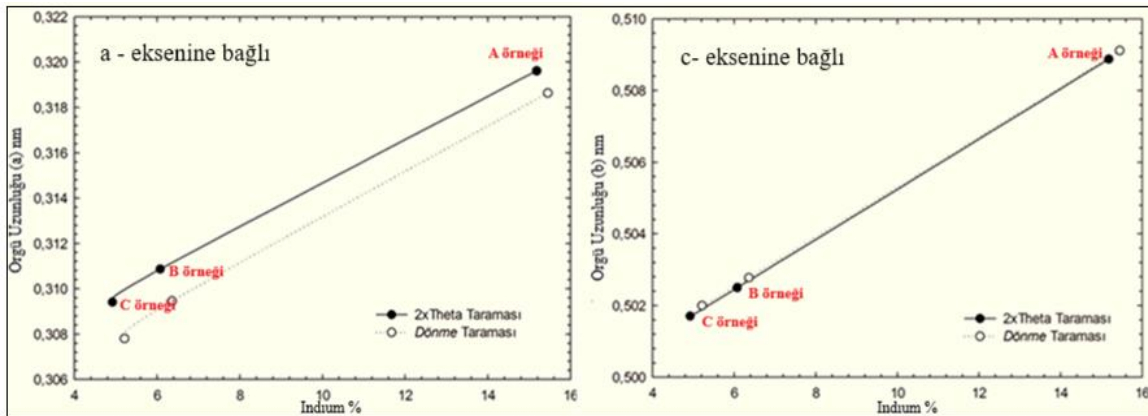
benzer ancak AlN katmanları genel olarak daha büyük dislokasyon yoğunluklarına sahiptir.

4.4. AlN/GaN/AlInN Yapının Nokta Kusurları

Bu bölümde örgü uzunluğu, örgü rahatlaması, a- ve c- örgü zorlaması, a- ve c- iki eksenli örgü zorlaması ve üç boyutlu hidrostatik basınç faktörlerine yer verilmiştir.

4.4.1. Örgü uzunluğu

AlInN tabakasının In oranına bağlı a- ve c- örgü uzunluğuna ait çizilen grafik Şekil 4.13’de verilmiştir. Yapılan ölçümde simetrik ve asimetrik yansımalara bağlı c-ekseninin, a-eksenine göre daha tutarlı olduğu görülmektedir. Yani a-eksenindeki örgü parametresinin daha az hassasiyette olduğu değerlendirilmektedir. Örgü parametresinde öncelikli olarak c-ekseni bulunduğundan a-ekseni c-eksenine bağlıdır. Örgü parametrelerinde In oranına bağlı belirgin bir değişim görülmemektedir. Kalibrasyonun iyi yapılmış olması, difraktometre ile numune sıcaklıklarının bilinen ve sabit bir değerde tutulmasına bağlıdır.



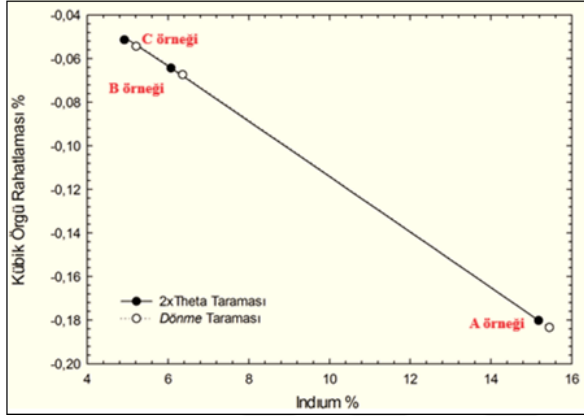
Şekil 4.13. AlInN tabakasının In oranına bağlı a- ve c- örgü uzunluğuna ait çizilen grafik

4.4.2. Örgü rahatlaması

Safir alttaşın üzerine büyütülen tabakaların aralarında meydana gelen örgü rahatlaması Eş. (4.11) ile heseplanır [115].

$$R_{\%} = \frac{a_{||}^{L(ortalama)} - a_{||}^{S(ortalama)}}{a_{||}^{L(0)} - a_{||}^{S(0)}} \times 100 \quad (4.11)$$

Eşitlikte rahatlamış örgü uzunluğu farkı ile rahatlamamış örgü uzunluk farklarının birbirine oranının yüzdesel hesaplanmasıdır.

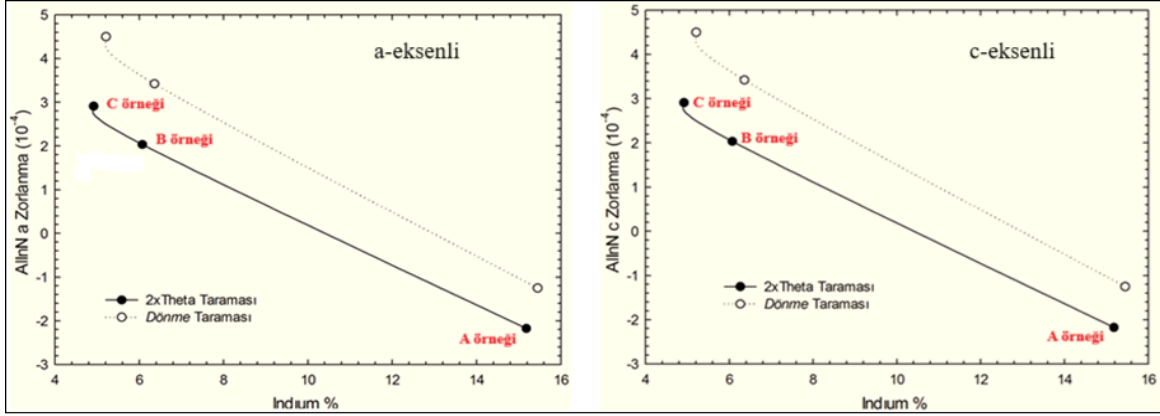


Şekil 4.14 AlInN tabakanın In oranına bağlı örgü rahatlaması

AlInN tabakasının In oranına bağlı rahatlaması Şekil 4.14’de verilmiştir. Kalibrasyon ayarının iyi ayarlanmış olması örgü uzunluğunda olduğu gibi difraktometre ile numune sıcaklıklarının sabit tutulması ile ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca ölçümlerde örgü parametresinin hassas olduğu olduğu, eksenlerin birbirleri ile tutarlı davrandığı değerlendirilmektedir.

4.4.3. Örgü zorlanması (a- ve c-)

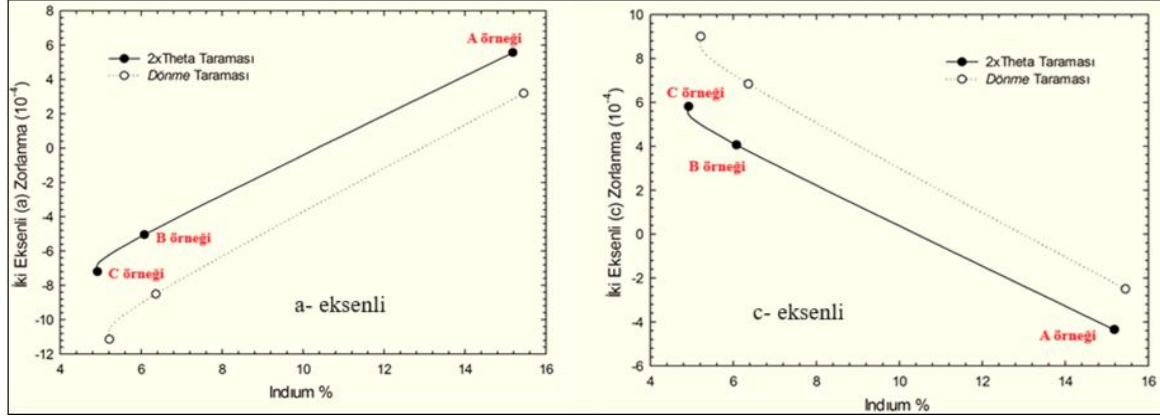
AlInN’ın In oranına bağlı zorlanma grafiği Şekil 4.15’te görülmektedir. Sabit sıcaklıkta büyütme sürecinde meydana gelen örgü parametlerindeki uyumsuzluk alttaş, film ve ısısal genişlemeye bağlı oluşmaktadır. Tabakalar arası sıkışmaya bağlıdır. İkinci ve üçüncü örnekteki zorlanma, birinci örneğe göre negatif yönde olmuştur. Zorlanma büyüklükleri farklılıklar göstermektedir. AlInN tabakanın Al, In, N atomlarının kovalent yarıçaplarında meydana gelen farklılık sebep olmaktadır. Üç örnekte farklı yapıya sahip olduğu ve yapıların düzensizliğine bağlı olabilir. a- ve c- zorlanma Şekil 4.15’te de görüldüğü gibi tutarlı davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.15. AlInN tabakanının In oranına bağlı (a- ve c-) zorlanma

4.4.4. İki eksenli örgü zorlanma (a- ve c-)

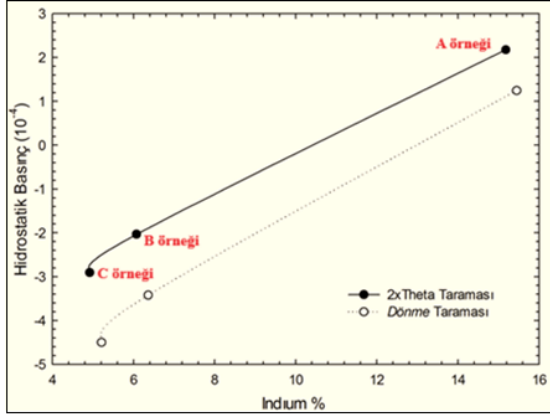
In oranına bağlı iki eksenli a- ve c- örgü zorlanması Şekil 4.16’da görülmektedir. İki eksenli zorlanmada örneklerin aynı yönlü davranışlar sergilediği birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Parametreler arasında belirgin bir değişim görülmemektedir.



Şekil 4.16. In oranına bağlı iki eksenli (a- ve c-) zorlanma

4.4.5. Hidrostatik basınç

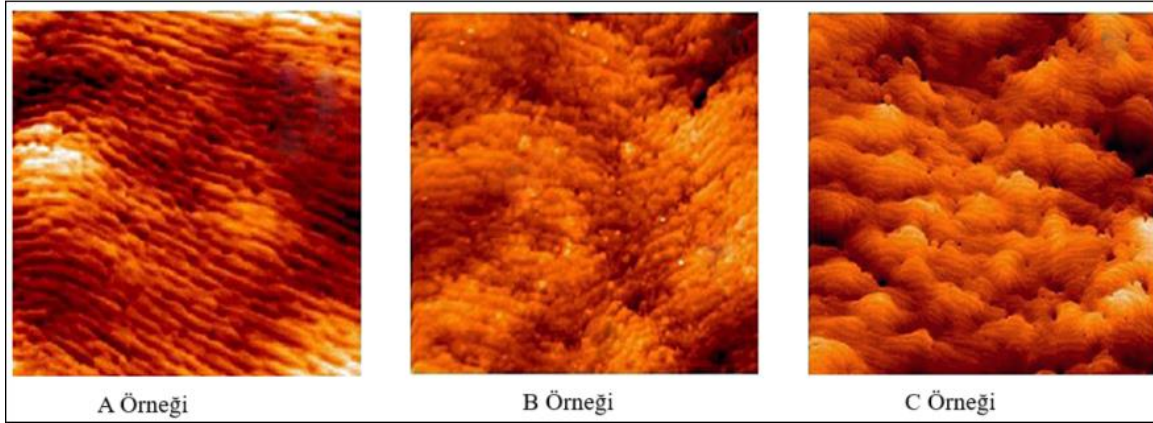
Örneklerin In oranına bağlı Hidrostatik basınç grafiği Şekil 4.17’de görülmektedir. Hidrostatik basınç büyütme esnasında oluşan nokta kusurlarına bağlı olduğu değerlendirilebilir. A ve B örneklerinde aynı hidrostatik basınç görülürken, C örneğindeki basınç değişkenlik göstermiştir.



Şekil 4.17. In oranına bağlı hidrostatik basınç

4.5. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

A, B ve C örneklerinin Şekil 4.18’de GaN yüzeyinden alınan $4 \times 4 \text{ } \mu\text{m}^2$ tarama alanına ait AFM görüntüleri görülmektedir. Her üç örnekte de yüzeyler üzerinde siyah noktalar ile birlikte rastgele yönlü teraslar (doğrusal ve birbirine paralel) görüntülendi. Buradan örneklerin üst üste büyüdüğü gözlemlenebilir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi A ve B örnekleri benzer yüzey morfolojisine sahiptir, her ikisi de basamak ve teraslara sahiptir. C örneğinde, yaygın olarak kullanılan temiz atom adımlarının aksine koyu noktalar vardır [116,117]. A, B ve C örneklerinin yüzey pürüzlülüğü değerlendirmede RMS parametresi kullanılır. $4 \times 4 \text{ } \mu\text{m}^2$ tarama alanında 0,46, 0,28 ve 0,56 nm olarak belirlendi. Yüzeyde oluşan pürüzlülük, yüzeydeki katman genişlikleri ile alakalıdır [118]. Örneklerin farklı yüzey morfolojileri, AlInN katmanı ve GaN başlık katmanının kalınlığı ile ilişkilidir. Sonuçlar, GaN katmanlarının katman genişliğinin RMS değerlerine iyi uyum sağladığını göstermektedir. C örneğinin RMS değerleri diğer iki örneğe göre daha yüksek olup, A ve B örneği katmanlı yapı yönelimi göstermiş olup, C örneğinde farklı çapta adacıklarla farklı yönelen polikristal yapının olduğu değerlendirilir. Bu durum yüzeydeki basamakların dar olmasından ve koyu nokta farkından kaynaklanıyor olabilir. C örneğindeki görüntüde koyu renkli noktaların çoğu katman yapısından kaynaklı ada benzeri yapı özelliği göstermiştir. Sonlu vida veya karışık tip dislokasyonlara bağlıdır [114,119]. C örneğinde $4 \times 4 \text{ } \mu\text{m}^2$ tarama alanındaki siyah nokta yoğunluğu yaklaşık $1.06 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. AFM görüntüsünde, üç örneğin yüzey morfolojilerinden örneklerin aktif katmanlarının In içeriğine bağlı olduğunu gözlemlendi.



Şekil 4.18. HEMT yapıdaki örneklerin AFM görüntüsü

4.6. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi ile AlInN/GaN/AlN yapının içeriği hakkında bilgi sahibi olunur. Al, N, In ve safir için pik oluşum noktası, pik yüksekliği, pik genişliği gözlemlenebilir. XRD ile yapılan çalışmalara eş olarak malzeme kristal kalitesi, örneklerin spektrum değişiminden stress ve kompozisyon bulunabilir.

Safir alttaş üzerinde büyütülen yapı için, örnekler 785 nm dalga boyuna sahip lazer ile 50 saniye taranmıştır. Örneklerin Raman spektrumları Şekil 4.19-4.21’ de görülmektedir. Örnekler farklı Al bileşimleri ile büyütülmüştür. Vegard yasası ile %87,4, %86,6 ve %86,4 olarak hesaplanan Al bileşimleri için Raman kayması değerleri yaklaşık 557 cm^{-1} değerinde keskin pike ulaşmıştır. Bu keskin pik yüksek kalitede GaN’a aittir. Bu tepeler, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN ince filmlerinin E_2 (yüksek) optik fonon modunun titreşimiyle ilişkilidir [120]. Bu değer, literatürde bulunan değerlerden daha küçüktür [121]. Raman yoğunluğu A ve B örnekleri için daha yüksektir. Bu sonuç, Al bileşimlerinin GaN ince filmlerinin optik fonon modları üzerindeki etkisini göstermektedir. Özetle, farklı Al bileşimleri farklı Raman yoğunluğuna ancak aynı Raman kayması değerlerine neden olur. Bu sonuç, Al bileşimlerini değiştirerek optik fonon modlarının kontrol edilebileceği anlamına gelir.

Büyüyen örneklerin mekanik özellikleri kırılgenlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu özelliklerin incelenmesi, cihaz uygulamalarında oldukça önemli hale gelir. Raman spektrumları, kalıntı stres gibi örneklerin önemli mekanik özellikleri hakkında önemli veriler

sağlar. GaN ince filmi için, literatürde E_2 (yüksek) optik fonon moduna ait gerilimsiz Raman kayması tepe değeri $567,2 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir [122]. GaN ince filminin E_2 (yüksek) optik fonon moduna ait Raman kayması değeri bu değerden büyükse, yani daha büyük dalga sayısı ise, mavi bölge kayması anlamına gelir. Bu durumda, GaN ince filmi basınç gerilmesine sahiptir. Malzeme belirtilen değerden daha az Raman kayması değerine sahipse, bu duruma kırmızı bölge kayması denir. Bu durumda malzemede çekme gerilmesi vardır.

GaN ince filmlerinin kalıntı gerilimi, Wang ve arkadaşları tarafından bulunan denklem Eş. (4.12) ile hesaplanabilir [123].

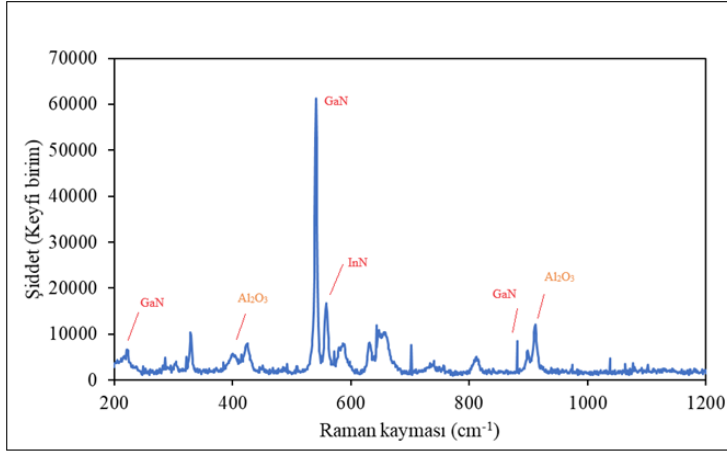
$$\sigma = \Delta w / k \quad (4.12)$$

Burada, σ kalıntı gerilimdir. Δw , Raman kayması tepe değerinin gerilimsiz tepe değerinden sapması ve k Raman gerilim katsayısıdır ($4,3 \text{ cm}^{-1} (\text{GPa})^{-1}$). Safir alt tabaka üzerinde yetiştirilen örnekler için kalıntı gerilim değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

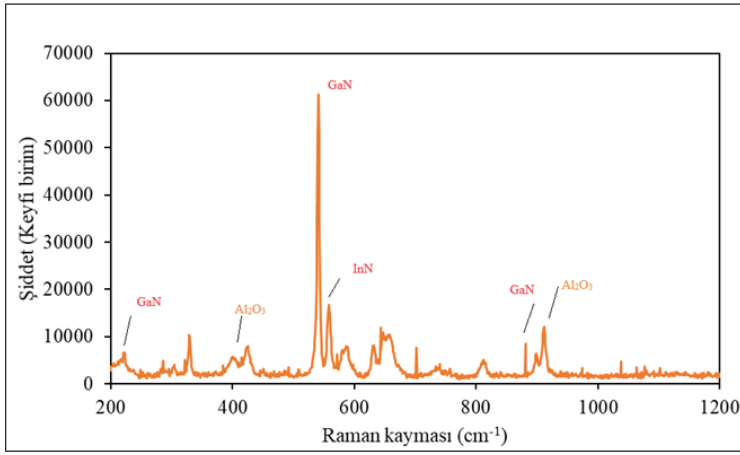
Farklı Al kompozisyonlarında GaN ince filmleri için Raman kayması değerleri A, B ve C örnekleri için kırmızı bölgeye kaymaktadır. Bu çalışmanın sonucunda GaN ince filmleri çekme gerilimi özelliği göstermektedir. Raman kayması değerleri A, B ve C örnekleri için sırasıyla $557,549$, $557,676$ ve $557,752 \text{ cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Raman yoğunluklarında da fark vardır. Bu, örneklerdeki GaN moleküllerinin polarizasyonlarından kaynaklanıyor olabilir. Al değeri azaldığında gerilim değerinin azaldığı görülmüştür. Raman titreşim spektrumundan kristaliteyi yakalamak mümkündür [124].

Çizelge 4.11. A, B ve C örneklerine ait Raman ve XRD analiz sonuçları

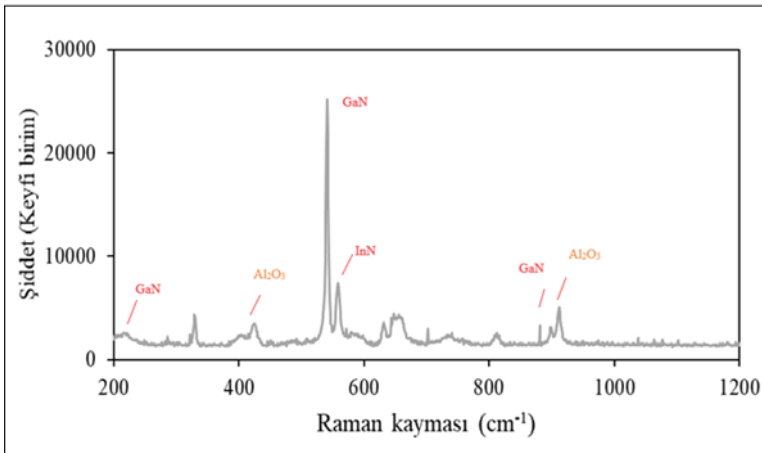
Al Oranı	Zorlanma (XRD)	Stress (XRD)	Strees (Raman)	Stress Türü
% 86,6	-0,023	3,0854	2,2148	Çekme
% 87,4	-0,015	2,6137	2,2442	Çekme
% 86,4	-0,017	2,0860	2,1972	Çekme



Şekil 4.19. A örneği Raman spektrumu



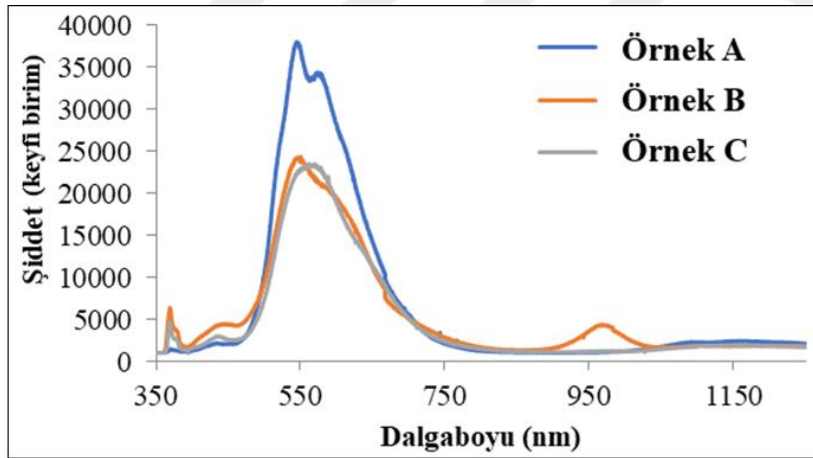
Şekil 4.20. B örneği Raman spektrumu



Şekil 4.21. C örneği Raman spektrumu

4.7. Fotoluminesans (PL)

Örneklerin temel özellikleri ve kalitesinin belirlenmesi için kullanılan foto ışınım tekniğidir. Şekil 4.22’de örneklerin PL pik pozisyonlarının 545-550-565 nm olduğu yapılan ölçümlerde görülmektedir. 545 nm dalga boyuna sahip örnek geniş bir pik olup, yeşil lüminesans bant, 550 nm dalga boyuna sahip örnek geniş bir pik olup, yeşil-sarı lüminesans bant ve 565 nm dalga boyuna sahip örnek geniş piktir ve sarı lüminesans bandı olarak adlandırılır. Örneklerin ışınım şiddetlerine bakıldığında birbirlerine yakın olduğu görülmektedir [125]. Üç örnekte de yerel kusurların olduğu söylenebilir [114]. Bu durum örneklerin birbirlerine yakın kalite olduğunu gösterir. Işınım şiddetindeki kırmızı bölgeye doğru kayma In katkısından kaynaklanıyor olabilir [96]. Dalga boyunun yasak enerji bant aralığı $E = h \cdot c / \lambda$ denklemi ile hesaplanır. FWHM değerleri kristal kalitesini göstermektedir. A örneği B ve C örneğine göre daha kalitelidir. A örneği diğer örneklere göre daha şiddetli ve FWHM değeri daha düşüktür. Örneklerin AlInN PL analizine göre, yasak enerji bant aralığı ve FWHM değerleri Çizelge 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.22. AlInN tabakasının PL ölçüm grafiği

Çizelge 4.12. AlInN PL ölçümlerinin yasak enerji bant aralığı ile FWHM değerleri

Örnek	Yasak Enerji Bant Aralığı (nm) - (eV)	FWHM (nm)
A	545 – (2,27)	160,0936
B	550 – (2,25)	179,1286
C	565 – (2,19)	175,2641

5. SONUÇLAR

Bu çalışmamızda, GaN/AlInN/AlN “Yüksek Elektron Hareketine Sahip Transistör (HEMT)” yapı örnekleri “Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (MOCVD)” kullanılarak Al₂O₃ üzerinde büyütüldü. Büyütülen örnekler “Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım (HRXRD)” cihazı ile AlN ve GaN katmanlar için mozaik yapı değişkenleri (yanal/düşey mozaik boyut uzunlukları, eğim ve büküm açısı ile heterojen zorlanma), dislokasyon yoğunlukları (kenar ve vida tipi kusurlar) incelendi. Ayrıca örneklerin karakteristik (yapısal, optiksel, morfolojik) ve yüzey (sınırlı parçacık boyutları, siyah nokta yoğunlukları, pürüzlülük) özellikleri Raman Spektroskopisi, PL ve AFM cihazı kullanılarak belirlendi.

Yüksek kalitede AlInN/AlN/GaN heteroyapılı malzemeler elde etmek için tampon katmanlar AlN ile GaN’ın birbirleri ile etkilerine bakıldı. Büyümenin katmanlı olduğu ve RMS pürüzlülüğü gözlemlendi. AlN’in GaN tampon katmana göre daha iyi ve yüksek kristal kalitesinde olduğu gözlemlendi.

Yapısal karakterizasyon için farklı düzlemlerde 2θ ölçümleri gerçekleştirildi. GaN, AlInN ve AlN tabakalarına ait düzlemlerin FWHM, örgü parametre değerleri, parçacık boyutları ile zorlama, gerilmeleri bulundu. Bu sırada büyütmede cihazlarının kalibrasyon hataları göz önünde bulunduruldu. Aktif katmanların büyütme sıcaklığının In ve Al içeriğini etkilediği yapısal, optiksel ve morfolojik sonuçlardan gözlemlendi. AFM sonuçlarından yüzey morfolojilerinden örneklerin In alaşım oranlarına bağımlı olduğu, PL değerlendirilmesinde In oranının bağımlılığı literatür ile uyumlu olduğu, AlInN’in yasak enerji bant aralığının mavi bölgeden yeşil bölgeye kaydığı gözlemlendi.

Örnekler arasındaki farklardan biri de Al içeriğidir. Ayrıca gerilim türü Raman kaymasından belirlenmiştir. Raman kaymasından hesaplanan gerilimin Al içeriği ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ancak HRXRD sonuçlarından elde edilen gerilim değerleri için bu durumun geçerli olduğu söylenemez. Bunlar Al içeriği ile orantılı değildir. Bunun nedeni gerilimin hesaplanmasında kullanılan FWHM değerleri olabilir.

HRXRD hesaplarından a-, c- örgü parametreleri üç örnek için incelenen (hkl) düzlemlerinde farklılıklar görülmüştür. Bu farklılık büyütme koşullarına bağlıdır. Bu çalışmada incelenen örnekler için seçilen sıcaklık aralığı FWHM değerlerine göre belirlenmiştir. HRXRD hesaplarından edilen ω piklerinin FWHM değerleri AlN ve AlInN için karşılaştırılmıştır. AlN tabakada ölçülen FWHM değerleri her üç örnek için birbirine benzerlik göstermiştir. B örneğinin AlInN tabakasının daha iyi bir kristal kalitesine sahip olduğu gözlenmiştir.

“Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (MOCVD)” büyütülen AlInN/GaN/AlN/Al₂O₃ Hemt temelli yapıya ait sonuçların literatür ile uyum içinde olduğu gözlemlendi. In_xGa_{1-x}N ve AlInN heteroyapıda In(x) içeriğinin etkisi belirlendi. Deneysel bulgular In içeriği, AlN yapısını etkilediği tespit edildi. Büyütme şartları ve kalibrasyon ne kadar iyi olursa yüksek kalitede AlInN/AlN/GaN heteroyapı elde edilebileceği belirlendi. Kaliteli bir HEMT yapısı için In oranı ve AlN yapısının önemli bir etken olduğu kanaatine varıldı.

KAYNAKLAR

1. Bardeen, J., Brattain, W. H. (1948). The Transistor, A Semi-Conductor Triode. *Physical Review*, 74(2), 230.
2. Manasevit, H. M. (1968). Single-Crystal Gallium Arsenide on Insulating Substrates. *Applied Physics Letters*, 12(4), 156-159.
3. Manasevit, H. M., Erdmann, F. M., ve Simpson, W. I. (1971). The Use of Metalorganics in the Preparation of Semiconductor Materials: IV. The Nitrides of Aluminum and Gallium. *Journal of Electrochemical Society*, 118(11), 1864-1868.
4. Nakamura, S. (1991). GaN Growth Using Gan Buffer Layer. *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters*, 30 (10A), L1705-L1707.
5. Kınacı, B., Özen, Y., Kızılkaya, K. Asar, T., Çetin, S.Ş., Boyalı, E., Öztürk, M.K., Memmedli, T., ve Özçelik, S. (2013). Effect of Alloy Composition On Structural, Optical and Morphological Properties and Electrical Characteristics of $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ structure., *Journal of Matterrials. Science: Materials in Electronics*, 24,1375-1381.
6. Vurgaftman, I., Meyer, J. R. (2003). Band Parameters For Nitrogen-Containing Semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 94(6), 3675-3696.
7. Aleksan, R., Bolognese, T., Equer, B., Karar, A., ve Reymond, J. M. (1991). Observation of Single Minimum Ionizing Particles with Amorphous-Silicon Diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators Spectrometer, Detectors and Associated Equipment*, 305(3), 512-516.
8. Li, Y., Xiang, J., Qian, F., Gradecak, S., Wu, Y., Yan, H., Blom, D. A., ve Lieber, C. M. (2006). Dopant-Free GaN/AlN/AlGaIn Radial Nanowire Heterostructures as High Electron Mobility Transistors. *Nano Letters*, 6(7), 1468-1473.
9. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., ve Toyoda, Y. (1986). Metalorganic Vapor Phase Epitaxial Growth Of A High Quality GaN Film Using an AlN Buffer Layer. *Applied Physics Letters*, 48(5), 353-355.
10. Gonchorek, M., Carlin, J. F., Feltin, E., Py, M. A., ve Grandjean, N. (2006). Hihg electron mobility lattice-matched AlInN/GaN field-effect transistor heterostructures. *Applied Physics Letters*, 89(6), 062106.
11. Mimura, T. (2002). The Early History of The HEMT. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 780-782.
12. Tayrani, R., Gerber, J. E., Daniel, T., Pengelly, R. S., ve Rhode, U.L. (1993). A new and reliable direct parasitic extraction method for MESFETs and HEMTs. European Microwave Conference, Madrid, Spain, 451-453.
13. Leong, C. C. J., Shen, Z., ve Tay, L. C. (2001). Small-Signal Modeling of a PHEMT up to 110 GHz Based on The Genetic Algorithm. *Microwave and Optical Technology Letters*, 29(6), 367-373.

14. Xing, H., Dora, Y., Chini, A., Heikman, S., Keller, S., ve Mishra, U. K. (2004). High breakdown voltage AlGaIn-GaN HEMTs achieved by multiple field plates. *IEEE Electron Device Letters*, 25(4), 161-163.
15. Kuzmík, J. (2001). Power electronics on InAlN/(In) GaN: Prospect for a record performance. *IEEE Electron Device Letters*, 22(11), 510-512.
16. Yurdagül, Ü. (2005). *LEC Tekniği ile Büyütülen Te Katkılı n-tipi InSb Yarıiletkeninde Sıcaklık Bağımlı Manyetik ve Elektron İletim Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-52.
17. Kittel, C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*. (Çev.B. Karaoğlu). İstanbul: Güven Yayınevi 304.
18. Bulun, G. (2010). *3D-Geçiş Metali Ni Katkılı $Zn_{1-x}Ni_xO$ ve 4f Lântanit Gd Katkılı $Zn_{1-x}Gd_xO$ Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri*. Doktora Tezi Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 52-59.
19. Tasi, C. T., Wang, W. K., Tsai, T. Y., Huang, S. Y., Horng, R. H., ve Wu, D. S. (2017). Reduction of Defects in AlGaIn Grown on Nanoscale-Patterned Sapphire Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy. *Materials*, 10(6), 605.
20. Losego, M. D., Craft, H. S., Mita, S., Rice, T., Collazo, R., Sitar, Z., ve Maria, J. P. (2008). *TF004-Interfacing Complex Oxides to Gallium Nitride*. 17th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics. Santa Re, NM, ABD 442-443.
21. Manasreh, O. (2000). *III Nitrides Semiconductors: Electrical, Structural and Defects Properties*, Amsterdam/Holland: Elsevier Science BV, 4-13, 51-73.
22. İnternet: Ozan, S.. Fiziksel Metalurji. slideshare. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.slideshare.net%2Fhiyaka71%2Fkristal-yapda-noktasal-ve-izgisel-hatalar&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
23. Hull, D., Bacon, D. J. (Editörler). (2001). *Intruduction to Dislocations*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 11, 12, 14, 15, 17.
24. Moram, M. A., Kappers, M. J., Zhang, Y., Barber, Z. H., ve Humphreys, C. J. (2008). Very low dislocation density, resistive GaN films obtained using transition metal nitride interlayers. *Physica Status Solidi (a)*, 205(5), 1064-1066.
25. Nakamura, S. (1995). A bright future for blue/green LED's. *IEEE Circuits and Devices*, 11(3), 19-23.
26. Çetin, S. Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaIn/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik Ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-42.
27. Selvaraj, S. L., Suzue, T., ve Egawa, T. (2009). Breakdown Enhancement of AlGaIn/GaN HEMTs on 4-in Silicon by Improving the GaN Quality on Thick Buffer Layers. *IEEE Electron Device Letters*, 30(6), 587-589.

28. Liou, B. T., Yen, S. H., ve Kuo, Y. K. (2005). Vegard's law deviation in band gap and bowing parameter of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$. *Applied Physics a-Materials Science and Processing*, 81(3), 651-655.
29. Bayrak, S. T. (2011). *InGaN/GaN Çoklu Kuantum Kuyulu Işık Saçan Diyotlar*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 7-11, 21-23, 31, 32.
30. Mishra, U. K., Parikh, P., ve Wu, Y. F. (2002). AlGaIn/GaN HEMTs - An overview of device operation and applications. *Proceedings of The IEEE*, 90(6), 1022-1031.
31. Tansley, T. L., Egan R.J. (1993). Defects, optical absorption and electron mobility in indium and gallium nitrides. *Physica B: Condensed Matter*, 185(1-4), 190-198.
32. Morkoç, H., Strite, S., Gao, G.B., Lin, M. E., Sverdlov, B., ve Burns, M. (1994). Largeband-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device Technologies. *Journal of Applied Physics*, 76(3), 1363-1398.
33. Razeghi, M., Henini, M. (2004). *Optoelectronic devices: III-Nitrides*. London Elsevier Ltd., 1-8.
34. Butcher, K. S. A., Wintrebert-Fouquet, M., Chen, P. P. T., Timmers, H., ve Shrestha, S. K. (2003). Detailed analysis of absorption data for indium nitride. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 6(5-6), 351-354.
35. Matsuoka, T., Okamoto, H., Nakao, M., Harima, H., ve Kurimoto, E., (2002). Optical Bandgap Energy of Wurtzite InN. *Applied Physics Letters*, 81(7), 1246-1248.
36. Trautman, P., Pakula, K., Witowski, A. M., ve Baranowski, J. M. (2005). An Estimate of the Energy Gap of InN from Measurements of the Fundamental Absorption Edge. *Acta Physica Polonica A*, 108(5), 903-908.
37. Van de Walle, C. G., McCluskey, M. D., Master, C. P., Romano, L. T., ve Johnson, N. M. (1999). Large and composition-dependent band bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys. *Materials Science and Engineering B*, 59(1-3), 274-278.
38. Bernardini, F., Fiorentini, V. ve Vanderbilt, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56(16), 24-27.
39. Morthier, G., Vankwikelberge, P. (1997). *Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes*. (2st ed). Boston: London Artech House, 6-10.
40. Sze, S.M. (2012). *Semiconductor Devices, Physics and Technology*. (3st ed).USA Danvers: John Wiley and Sons, 85-127, 288-294.
41. Razeghi, M. (2002). *Fundamentals of Solid State Engineering*. (1st ed). USA New York: Kluwer Academic Publishers, 305-360.
42. Hansson, C., Rachavula, K. K. (2006). (Halmstad University School of Information Science, Computer and Electrical Engineering). Sweden: Comparative Study of Infrared Photodetectors Based on Quantum Wells(QWIPS) and Quantum Dots(QDIPS). *Technical Report*. Hamstad. 11-12.

43. Denizli, T. (2006). *GaInP/GaAs Kuantum Kuyulu Yapılarda Alaşım Düzensizliği Ve Arayüzey Pürüzlülüğü Saçılması*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 5-10.
44. Ambacher, O., Dimitrov, R., Stutzmann, M., Foutz, B. E., Murphy, M. J., Smart, J. A., Shealy, J. R., Weimann N. G., Chu, K., Chumbes, M., Green B., Sierakowski A. J., Schaff W. J., ve Eastman, L. F. (1999). Role of spontaneous and piezoelectric polarization induced effects in Group-III nitride based heterostructures and devices. *Physica Status Solidi (b)*, 216(1), 381-389.
45. Ibbetson, J. P., Fini, P. T., Ness, K. D., DenBaars, S. P., Speck, J. S., ve Mishra, U. K. (2000). Polarization effects, surface states and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 77(2), 250-252.
46. Ridley, B. K. (2000). Polarization-induced electron populations. *Applied Physics Letters*, 77(7), 990-992.
47. Bernardini, F., Fiorentini, V. (1999). Spontaneous versus Piezoelectric Polarization in III-V Nitrides: Conceptual Aspects and Practical Consequences. *Physica Status Solidi (b)*, 216(1), 391-398.
48. Appaswamy, A. (2005). *Simulation of short channel AlGaIn/GaN HEMTs*. Yüksek Lisans Tezi, University of Cincinnati, Engineering: Electrical Engineering, Ohio, USA., 32-33.
49. Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N. G., Chu, K., Murphy, M., Schaff, W. J., Eastman, L. F., Dimitrow, R., Wittmer, L., Stutzmann, M., Rieger, W., ve Hilsenbeck, J. (1999). Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 85(6), 3222-3233.
50. Lee, J. (2006). *Processing and characterization of advanced AlGaIn/GaN heterojunction field effect transistors*. Doktora Tezi, Graduate School of The Ohio State University, Ohio, 23-27.
51. Mimura, T., Hiyamizu, S., Fujii, T., ve Nanbu, K. (1980). A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions. *Japanese. Journal of Applied Physics*, 19(5), L225-L227.
52. Selvaraj, S. L., Watanabe, A., Wakejima, A., ve Egawa, T. (2012). 1.4-kV Breakdown Voltage for AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on Silicon Substrate. *IEEE Electron Device Letters*, 33(10), 1375-1377.
53. Huang, W. C., Chu, C. M., Wong, Y. Y., Chen, K. W., Lin, Y. K., Wu, C. H., Lee, W. I. ve Chang, E. Y. (2016). Investigations of GaN growth on the sapphire substrate by MOCVD method with different AlN buffer deposition temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 45, 1-8.
54. Sheppard, S. T., Doverspike, K., Pribble, W. L., Allen, S. T., Palmour, J. W., Kehias, L. T., ve Jenkins, T. J. (1999). High-power microwave GaN/AlGaIn HEMT's on semiinsulating silicon carbide substrates. *IEEE Electron Device Letters*, 20(4), 161-163.

55. Kruszewski, P., Prystawko, P., Kasalynas, I., Nowakowska-Siwinska, A., Krysko, M., Plesiewicz, J., Smalc-Koziorowska, J., Dwilinski, R., Zajac, M., Kucharski, R., ve Leszczynski, M. (2014). AlGaIn/GaN HEMT structures on ammono bulk GaN substrate. *Semiconductor Science and Technology*, 29(7), 075004.
56. Gurnett, K. ve Adams, T. (2006). Native substrates for GaN: the plot thickens. *III-Vs Review*, 19(9), 39-41.
57. Ambacher, O. (1998). Growth and applications of Group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(20) 2653-2710.
58. Liu, L. ve Edgar, J. H. (2002). Substrates for Gallium Nitride Epitaxy. *Materials Science and Engineering: R Reports*, 37(30), 61-127.
59. Kocan, M. (2003). *AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between surface- interface and Device-Properties*. Doktora Tezi, RWTH Aachen University, Aachen, 34-35.
60. Lee, W.E., Lagerlof, K. P. D. (1985). Structural and Electron-Diffraction Data for Sapphire (α -Al₂O₃). *Journal of Electron Microscopy Technique*, 2(3), 247-258.
61. Nakamura, S. (2015). Background Story Of The Invention of Efficient Blue Ingan Light Emitting Diodes. *International Journal of Modern Physics B*, 29(32), 1530016.
62. Toprak, A. (2014). *Gate Uzunluğunun GaN HEMT Aygıtlarda Güç Performansına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-18.
63. Van Nostrand, J.E., Solomon, J., Saxler, A., Xie, Q. H., Reynolds, D. C., ve Look, D. C. (2000). Dissociation of Al₂O₃(0001) substrates and the roles of silicon and oxygen in n-type GaN thin solid films grown by gas-source molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 87(12), 8766-8772.
64. Stutzmann, M., Ambacher, O., Eickhoff, M., Karrer, U., Pimenta, A. L., Neuberger, R., Schalwig, J., Dimitrov, R., Schuck, P. J., ve Grober, R. D. (2001). *Playing with polarity*. *Physica Status Solidi*, 228(2), 505-512.
65. SeelmannEggebert, M., Weyher, J. L., Obloh, H., Zimmermann, H., Rar, A., ve Porowski, S. (1997). Polarity of (00.1) GaN epilayers grown on a (00.1) sapphire. *Applied Physics Letters*, 71(18), 2635-2637.
66. Sumiya, M., Yoshimura, K., Ito, T., Ohtsuka, K., Fuke, S., Mizuno, K., Yoshimoto, M., Koinuma, H., Ohtomo, A., ve Kawasaki, M. (2000). Growth mode and surface morphology of a GaN film deposited along the N-face polar direction on c-plane sapphire substrate. *Journal of Applied Physics*, 88(2), 1158-1165.
67. Shen, L., Heikman, S., Moran, B., Coffie, R., Zhang, N. Q., Buttari, D., Smorchkova, I. P., Keller, S., DenBaars, S. P., ve Mishra, U. (2001). AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT. *IEEE Electron Device Letters*, 22(10), 457-459.

68. Asgari, A., Kalafi, M. (2006). The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGa_N/Ga_N heterostructures with Schottky gate. *Materials Science and Engineering C*, 26(5-7), 898-901.
69. Javorka, P. (2004) *Fabrication and Characterization of AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors*. Doktora Tezi, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rhienisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Juelich, Deutschland, 51.
70. Faracclas, E.W. (2006). *Modelling and simulation of Ga_N-based high electron mobility transistors*, Doktora Tezi, M.S.E.E., University of Connecticut, Storrs, USA, 20-29.
71. Akpınar, Ö. (2018). *MOCVD Yöntemiyle Safır Alttaşı Üzerine Büyütülen Al_xGa_{1-x}N/Ga_N Hemt Yapısının Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22.
72. Dahmani, S. (2012). *Large-Size AlGa_N/Ga_N HEMT Large-Signal Electrothermal Characterization and Modeling for Wireless Digital Communications*. Doktora Tezi, Universität Kassel Institut für Elektrotechnik und Informatik, Hessen, Deutschland, 21.
73. Boyd, A. R., Heuken, M. (2004) Basics of MOCVD. *Aixtron MOCVD Training Notes*, Aachen, 10-11.
74. Kelekci, Ö. (2011). *Ga_N Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (Hemt) Tasarımı, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 44-47
75. Durlu, T.N. (1992). *Katıhal Fiziğine Giriş*. (3. Baskı) Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilim Yayınları, Ankara, 24-25.
76. Kırış, S. (2005). *Saf ve Çinko Katkılı Alüminyumun X-Işını Kırınımı Yöntemi İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 24-38.
77. Heinke, H., Kirchner, V., Einfeldt, S., ve Hommel, D. (2000). X-ray diffraction analysis of the defect structure in epitaxial Ga_N. *Applied Physics Letters*, 77(14), 2145-2147.
78. Baş, Y. (2014). *In_xGa_{1-x}N (x=0,075; 0,090; 0,100) Mavi Led'lerin Mikroyapısal Kusurlarının Ters Örgü Uzak Haritası İle İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 54-55.
79. Frank, F. C. (1965). On Miller-Bravais indices and four-dimensional vectors. *Acta Crystallographica*, 18(5), 862-866.
80. Gay, P., Hirsch, P. B. ve Kelly, A. (1953). The estimation of dislocation densities in metals from X-ray data. *Acta Metallurgica*, 1(3), 315-319.
81. Datta, R., Kappers, M. J., Vickers, M. E., Barnard, J. S., ve Humphreys, C. J. (2004). Growth and characterisation of Ga_N with reduced dislocation density. *Superlattices and Microstructures*, 36(4-6), 393-401.

82. Awual, R. M., Asiri, A. M., Rahman, M. M., ve Alharthi, N. H. (2010). Assessment of enhanced nitrite removal and monitoring using ligand modified stable conjugate materials. *Chemical Engineering Journal*, 363, 64-72.
83. Zheng, H., Chen, H., Yan, Z. B., Han, Y. J., Yu, H. B., Li, D. S., Huang, Q., ve Zhou, J. M. (2003). Determination of twist angle of in-plane mosaic spread of GaN films by high-resolution X-ray diffraction. *Journal of Crystal Growth*, 255(1-2), 63-67.
84. Xing, H., Keller, S., Wu, Y. F., McCarthy, L., Smorchkova, I. P., Buttari, D., Coffie, R., Green, D. S., Parish, G., Heikman, S., Shen, L., Zhang, N., Xu, J. J., Keller, B. P., DenBaars, S. P., ve Mishra, U. K. (2001). Gallium nitride based transistors. *Journal of Physics Condensed. Matter*, 13(32) 7139.
85. Dunn, C. G., Koch, E. F. (1957). Comparison of dislocation densities of primary and secondary recrystallization grains of Si-Fe. *Acta Metallurgica*, 5(10), 548-554.
86. Heikman S., Keller S., Wu Y., Speck J., DenBaars P., ve Mishra K. (2009). Polarization effects in AlGaIn/GaN and GaN/AlGaIn/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 93(12), 10114-10118.
87. Luong, T. T., Tran, B. T., Ho, Y. T., Ha, M. T. H., Hsiao, Y. L., Liu, S. C., ve Chang, E. Y. (2015). Performance improvements of AlGaIn/GaN HEMTs by strain modification and unintentional carbon incorporation. *Electronic Materials Letters*, 11, 217-224.
88. Gong, J. R., Liao, W. T., Hsieh, S. L., Lin, P. H., ve Tsai, Y. L. (2003). Strain-induced effect on the Al incorporation in AlGaIn films and the properties of AlGaIn/GaN heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 249(1-2), 28-36.
89. Lundin, V. V., Sakharov, A. V., Zavarin, E. E., Zakgeim, D. A., Nikolaev, A. E. E., Brunkov, P. N., ve Tsatsul'nikov, A. F. (2018). The effect of the method by which a high-resistivity GaN buffer layer is formed on properties of InAlN/GaN and AlGaIn/GaN heterostructures with 2D electron gas. *Technical Physics Letters*, 44, 577-580.
90. Yu, H. B., Çaliskan, D., ve Özbay, E. (2006). Growth of high crystalline quality semi-insulating GaN layers for high electron mobility transistor applications. *Journal of Applied Physics*, 100(3) 033501 (1-4).
91. Williamson, G. K., Hall, W. H. (1953). X-Ray Line Broadening From Filed Aluminium And Wolfram. *Acta Metallurgica*, 1(1), 22-31.
92. Arslan, E., Öztürk, M. K., Duygulu, Ö., Kaya, A. A., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2009). The influence of nitridation time on the structural properties of GaN grown on Si (111) Substrate. *Applied Physics A*, 94(1), 73-82.
93. Dinç, Y. (2007). AlGaIn ince filminin ısıtılma işlemi sonrası yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 27-60

94. Qu, B., Zheng, X. H., Wang, Y. T., Feng, Z. H., Liu, S. A., Lin, S. M., Yang, H., ve Liang, J. W. (2001). X-ray diffraction determination of the fractions of hexagonal and twinned phases in cubic GaN layers. *Thin Solid Films*, 392, 29-36.
95. Kars Durukan, İ., Öztürk, M. K., Çörekçi, S., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2018). InGaN/GaN LED Yapıların Mozaik Yapı Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 14, 123-126.
96. Kars Durukan, İ., Öztürk, M. K., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2017). Analyzing The InGaN LED Structures for White LED Applications. *Politeknik Dergisi*, 20(3), 531-536.
97. Yu, H. B., Öztürk, M. K., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2006). A study of semi insulating GaN grown on AlN buffer/sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 293(2), 273-277.
98. Bai, J., Wang, T., Parbrook, P. J., Lee, K. B., ve Cullis, A. G. (2005). A study of dislocations in AlN and GaN films grown on sapphire substrates. *Journal of Crystal Growth*, 282(3-4), 290-296.
99. Wilkens, M. (1970). The determination and density of dislocations in deformed single crystals from broadened x-ray diffraction profiles. *Physica Status Solidi (a)*, 2(2), 359-370
100. Miyoshi, M., Egawa, T., Ishikawa, H., Asai, K. I., Shibita, T., Tanaka, M., ve Oda, O. (2005). Nanostructural characterization and two-dimensional electron-gas properties in high-mobility AlGaIn/GaN heterostructures grown on epitaxial AlN/sapphire templates. *Journal of Applied Physics*, 98, 1-5.
101. Kars Durukan, İ., Öztürk, M. K., Çörekçi, S., Tamer, M., Baş, Y., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2017). Microstructural Analysis with Graded and Non-Graded Indium in InGaIn Solar Cell. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 12(2), 109-117.
102. Vickers, M. E., Kappers, M. J., Datta, R., McAleese, C., Smeeton, T. M., Rayment F. D. G., ve Humphreys, C. J. (2005). In-plane imperfections in GaN studied by x-ray diffraction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(A10), A99-A104.
103. Bilgili, A. K. (2019). *Nitrit Tabanlı III-V Grubu Yarıiletkenlerle Oluşturulan Çoklu Kuantum Kuyularının Yapısal, Morfolojik ve Bazı Optik Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 118-120.
104. Öztürk, M. K., Yu, H., Sarıkavak, B., Korçak, S., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2010). Structural analysis of an InGaIn/GaN based light emitting diode by X-ray diffraction. *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*, 21(2), 185-191.
105. Öztürk, M. K., Altuntaş, H., Çörekçi, S., Hongbo, Y., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2011). Strain-Stress analysis of AlGaIn/GaN heterostructures with and without an AlN suffer and Interlayer. *Strain*, 47(2), 19-27.

- 106.Öztürk, M. K., Çörekçi, S., Tamer, M., Çetin, S. Ş., Özçelik, S., ve Özbay E. (2014). Microstructural properties of InGaN/GaN light-emitting diode structures with different In content grown by MOCVD. *Applied Physics A-Materials Science and Processing*, 114(4), 1215-1221.
- 107.Öztürk, M. K., Arslan, E., Kars, İ., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2013). Strain analysis of the GaN epitaxial layers grown on nitridated Si(111) substrate by metal organic chemical vapor deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(1), 83-88.
- 108.Çörekçi, S. Öztürk, M. K., Bengi, A., Çakmak, M., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2011). Characterization of an AlN buffer layer and a thick-GaN layer grown on sapphire substrate by MOCVD. *Journal of Materials Science*, 46, 1606-1612.
- 109.Çörekçi, S., Usanmaz, D., Tekeli, Z., Çakmak, M., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2008). Surface Morphology of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al₂O₃- High Electron Mobility Transistor Structure. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 8(2), 640-644.
- 110.Metzger, T., Höpler, R., Born, E., Ambacher, O., Stutzmann M., Stömmer, R., Schuster, M., Gobe, H., Christiansen, S., Albrecht, M., ve Strun, H. P. (1998). Defect structure of epitaxial GaN films determined by transmission electron microscopy and triple-axis X-ray diffractometry. *Philosophical Magazine A*, 77(4), 1013-1025.
- 111.Çetin, S., Sağlam, S., Özçelik, S., ve Özbay, E. (2014). The effect of growth conditions on the optical and structural properties of InGaN/GaN MQW LED structures grown by MOCVD. *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1105-1110.
- 112.Çörekçi S., Öztürk M. K., Akaoğlu B., Çakmak M., Özçelik, S., ve Özbay E. (2007). Structural, morphological, and optical properties of AlGaIn/GaN heterostructures with AlN buffer and interlayer. *Journal of Applied Physics*. 101(12), 3502.
- 113.Ungár, T. (2004). Microstructural parameters from X-ray diffraction peak broadening. *Scripta Materialia*, 51(8), 777-781.
- 114.Moram, M. A., Vickers, M. E. (2009). X-ray diffraction of III-nitrides. *Reports on Progress in Physics*, 72(3), 036502-036541.
- 115.Nakamura N., Furuta K., Shen X. Q., Kitamura T., Nakamura K., ve Okumura H. (2007). Electrical properties of MBE-grown AlGaIn/GaN HEMT structures by using 4H-SiC (0001) vicinal substrates. *Journal of Crystal Growth*, 301-302, 452-456.
- 116.Mahanty S., Hao M., Sugahara T., Fareed R. Q. S., Morishima Y., Naoi Y., Wang T., ve Sakai S. (1999). V-shaped defects in InGaIn/GaN multiquantum wells. *Materials Letters*, 41(2), 67-71.
- 117.Torabi, A., Ericson, P., Yarranton, E. J., ve Hoke, W. E. (2002). Surface and interface characterization of GaN/AlGaIn high electron mobility transistor structures by x-ray and atomic force microscopy. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 20(3), 1234-1237.

- 118.Kapolnek, D., Wu, X., Heying, B., Keller, S., Mishra, U., DenBaars, S., ve Speck J. (1995). Structural evolution in epitaxial metalorganic chemical vapor deposition grown GaN films on sapphire. *Applied Physics Letters*, 67(11), 1541-1543.
- 119.Harima, H. Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering. *Journal of Physics:Condensed Matter*, 14(38), R967.
- 120.Chen, W., Inagawa, Y., Omatsu, T., Tateda, M., Takeuchi, N., ve Usuki, Y.(2001). Diode-pumped, self-stimulating, passively Q-switched Nd³⁺: PbWO₄ Raman laser. *Optics Communications*, 194(4-6), 401-407.
- 121.Lee, C. M., Kafle, K., Belias, D. W., Park, Y. B., Glick, R. E., Haigler, C. H., ve Kim, S. H. (2015). Comprehensive analysis of cellulose content, crystallinity, and lateral packing in *Gossypium hirsutum* and *Gossypium barbadense* cotton fibers using sum frequency generation, infrared and Raman spectroscopy, and X-ray diffraction. *Cellulose*, 22, 971-989.
- 122.Jiang, Y. C., Gao, J., ve Wang, L. (2016) Raman fingerprint for semi-metal WTe₂ evolving from bulk to monolayer. *Scientific Reports*, 6(1), 19624.
- 123.Bilgili, A. K., Akpınar, Ö., Özçelik, S., ve Öztürk, M. K. (2022), A Different Approach to Absorption Coefficient and Thickness. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 643-646.
- 124.Çörekçi, S., (2008). *AFM Surface Characterization In Group III-V Compound Semiconductors*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 70-75.
- 125.Poust, B., Heying, B., Hayashi, S., Ho, R., Matney, K., Sandhu, R., Woctowicz, M., ve Goorsky, M. (2005). Scans Along arbitrary directions in reciprocal space and the analysis of GaN films on SiC. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (10A), A93.



Gazili olmak ayrıcalıktır