



**AIN TAMPON TABAKALARIN KALINTI GERİLMELERİNİN HR-XRD
İLE ANALİZİ**

Celal AVAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Celal AVAR tarafından hazırlanan “AIN TAMPON TABAKALARIN KALINTI GERİLMELERİNİN HR-XRD İLE ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi FİZİK Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: : Prof. Dr. Metin ÖZER

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Tefik Raci SERTBAKAN

Fizik Ana Bilim Dalı, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

.....
Celal AVAR
21/06/2019

AlN TAMPON TABAKALARIN KALINTI GERİLMELERİNİN HRXRD İLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Celal AVAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Bu tezde, metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tarafından safir alttaşılar üzerinde biriktirilmiş farklı kalınlıkta AlN tamponlu iki, yüksek elektronlu mobilite transistör yapısı (HEMT) üretildi. AlN tampon tabakası cihazın performansı için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle mozaik model kullanılarak analiz edilen gerilmelerin etkisi gözlemlendi. AlGaIn / AlN / GaN hetero-yapıları, X-Ray difraksiyonu (XRD) ve Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile incelendi. Yapılarda GaN, AlGaIn, AlN katmanlarının mozaikliğini değerlendirmek için mozaik modeli de kullanıldı. Yanal ve düşey kristal büyüklüğü, çıkık, eğim ve leke tabakaları, HR-XRD cihazı ile Vegard ve William Hall (WH) yarı deneysel yöntemleriyle incelenmiştir. XRD sonuçlarına göre; Tampon tabakası kalınlığı azaldıkça, simetrik (002) ve asimetrik zirvelerin (105) pik yükseklik yarı genişliği (FWHM) değerleri artmaktadır. Daha kalın tampon katmanı yapıyı daha fazla kristalize eder. AFM sonuçlarına göre düşük kalınlıkta AlN tamponu daha sık çukurlara ve tepeciklere sahiptir ve daha pürüzlüdür. Sonuç olarak, 520 nm kalınlığında AlN tampon tabakası daha iyi bir yapısal performans göstermiştir.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : HR-XRD, AlN tampon tabakalar, artık gerilme
Sayfa Adedi : 60
Danışman : Prof. Dr. Metin ÖZER

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES OF AlN BUFFER LAYERS BY HR-XRD

(M. Sc. Thesis)

Celal AVAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

In this thesis, two high-electron mobility transistor structures (HEMTs) with different thicknesses of AlN buffer deposited in sapphire substrates by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) were produced. The AlN buffer layer is of great importance for the performance of the device, so the effect of the wrinkles analyzed using the mosaic model was investigated by AlGa_N / AlN / GaN hetero-structures, X-Ray Diffraction (XRD) and Atomic Force Microscopy (AFM). Mosaic model was also used to evaluate the mosaicity of GaN, AlGa_N, AlN layers in the structures. Lateral and vertical crystal size, dislocation, slope and stain layers were examined with HR-XRD device and Vegard and William Hall (WH) semi-experimental methods. According to XRD results; as the thickness of the buffer layer decreased, symmetrical (002) and asymmetrical peaks (105) were found to increase FWHM values. The thicker buffer layer the further crystallizes the structure. According to the AFM results, the fine AlN buffer has more frequent pits and strokes and is more rough. Finally, the 520 nm thick AlN buffer layer showed better structural performance.

Science Code : 20227

Key Words : HR-XRD, AlN buffer layers, residual stresses

Page Number : 60

Supervisor : Prof. Dr. Metin ÖZER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince, sadece bilimsel değil her türlü konuda bilgilerini, görüşlerini ve fikirlerini, bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen ve benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Metin ÖZER'e, Prof.Dr. M. Kemal ÖZTÜRK'e ve Prof. Dr. Selim ACAR'a bana kattıkları her şey için teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarım boyunca her türlü yardımları ve destekleri için Doktora öğrencisi Ömer AKPINAR'a, Öğretim elemanı Polat NARİN'e ve Doktora öğrencisi Ece KUTLU'ya teşekkür ederim. Bu zamana kadar verdikleri maddi ve manevi destekleri hiçbir zaman esirgemeyen ve gösterdikleri sabırdan dolayı babam Mehmet AVAR, annem Mehlika AVAR, kardeşlerim Cihan AVAR, Ceren AKAR ve Cüneyt AKAR'a, ayrıca bana bu süreçte destekleriyle, yardımlarıyla ve bana olan inancıyla hep yanımda olan Burcu YILMAZ'a emeklerinin küçük bir karşılığı bile olamayacağını belirterek bu çalışmayı ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	5
2.1 Kristal Yapılar	5
2.2. Epitaksi.....	6
2.2.1. Azotlu yapı büyütmede kullanılan alttaş malzemeler	6
2.2.2. Safir alttaş.....	7
2.3. Yarıiletkenler.....	8
2.3.1 Nitrit yarıiletken malzemeler	11
2.3.2 Fiziksel özellikler	11
2.3.3. Heteroyapı	12
2.4. Doğrudan ve Dolaylı Band Yapıları	13
2.4.1. Doğrudan band aralıklı yarıiletken.....	13
2.4.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletken.....	14
2.5. p-n Eklem	14
2.6. Azotlu Yarıiletken Malzemeler	15

Sayfa

2.6.1. III-V azot bileşiklerinin kristal yapısı	16
2.6.2. III-V azot bileşiklerinin mekanik özellikleri.....	17
2.6.3. III-V azot bileşiklerinin elektriksel özellikleri	18
2.6.4. III-V azot bileşiklerinin polarizasyonu	18
2.6.5. III-V azot bileşiklerinin termal özellikleri	19
2.6.6. III-V azot bileşiklerinin optik özellikleri	19
3. YÜKSEK ELEKTRON MOBİLİTELİ TRANSİSTÖRLER	23
3.1. Alan Etkili Transistörler (FET)	23
3.2. Yüksek Elektron Mobiliteli Transistörler (HEMT)	25
3.3. AlGaIn/GaN Çoklu Kristal Yapısı	26
3.3.1. GaN temelli çoklu yapılarda kutuplanma	27
3.3.2. GaN HEMT çalışma prensibi.....	29
4. DENEYSEL YÖNTEM VE ANALİZ SİSTEMLERİ	32
4.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi Yöntemi (MOCVD)	33
4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım Tekniği (HRXRD)	35
4.3 Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı	36
4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	40
4.5. Fotoluminesans (PL)	42
4.6. Fourier Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)	44
5. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇ	45
5.2. DENEY VE SONUÇ	46
5.3. SONUÇ	51
KAYNAKLAR.....	53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Bazı yarı iletken malzemeler için elektronik ve mekanik parametreler	3
Çizelge 2.1. GaN ve azotlu epitakside kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri	7
Çizelge 2.2. Wurtzite yapıda olan nitrit bileşik yarıiletkenlerle alakalı bazı parametreler [26]	12
Çizelge 2.3. AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler	17
Çizelge 2.4. Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler	20
Çizelge 5.1: Örneklerin FWHM değerleri	48
Çizelge 5.2: Eğim, tutarlılık uzunlukları, dislokasyon örnekleri için gerilme değerleri.....	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. GaN uygulama alanları	2
Şekil 2.1. (a) Kristal yapı (b) Amorf yapının molekül deseni	5
Şekil 2.2. Farklı yarıiletkenler için yasak bant boşluğunun örgü sabitine göre değişimi	10
Şekil 2.3. Wurtzite yapıda birim hücre (a ve c örgü sabitleri) [33]	12
Şekil 2.4. (a) Doğrudan band aralığı (b) Dolaylı band aralığı	14
Şekil 2.5. p-n eklemde yeniden birleşme	15
Şekil 2.6. (a) Altıgen (b) çinko karışımı ve (c) NaCl kristal yapıların şematize hali	17
Şekil 2.7 Ga ve N polarlık.....	19
Şekil 3.1. Alan etkili transistör yapısı gösterimi.....	23
Şekil 3.2. Alan etkili transistör devresi.....	24
Şekil 3.3. AlGaIn/GaN yapısı ve 2DEG oluşumu [31,32]	25
Şekil 3.4. HEMT kanal yapısı.....	26
Şekil 3.5. AlGaIn/GaN bant yapısı.....	27
Şekil 3.6. Hekzagonal GaN da doğal kutuplanma vektörü [41]	28
Şekil 3.7. GaN ve AlGaIn için doğal kutuplanma vektörleri	28
Şekil 3.8. Ga-yüzlü AlGaIn/GaN yapıda piezoelektrik ve toplam kutuplanma	29
Şekil 3.9. AlGaIn/GaN HEMT kapı voltaj band yapıları [42]	30
Şekil 4.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi	34
Şekil 4.2. İnce film büyütme sırasındaki temel fiziksel olaylar.....	34
Şekil 4.3.Yüksek çözünürlüklü XRD cihazının şematik gösterimi	37
Şekil 4.4.Bragg yasası.....	37
Şekil 4.5. AFM'nin çalışma prensibi	40

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Fotoluminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematize edilmiş hali	43
Şekil 5.1 HEMT numunelerinin katman yapısının şematik gösterimi.....	46
Şekil 5.2. (002) Bragg yansımasının XRD salınım eğrileri	47
Şekil 5.3. (105) Bragg yansımasının XRD salınım eğrileri	47
Şekil 5.4. W-H a) GaN b) AlGaN c) AlN yanıl tutarlılık uzunluğunun GaN eğrileri	49
Şekil 5.5 W-H eğrileri için a) GaN b) AlGaN c) AlN dikey uyum uzunluğu	49
Şekil 5.6. HEMT yapılarının 3 µm x 3 µm tarama alanına sahip AFM görüntüleri	51

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1.MOCVD cihazının görünümü	35
Resim 4.2.Bruker D8 Discover HR-XRD cihazının genel görünümü.....	39
Resim 4.3. Yüksek Performanslı AFM / MFM	41
Resim 4.4 Fotolüminesans sistemin genel görünümü.....	43
Resim 4.5.Bruker Vertex 80 spektrometresi	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
CH₃	Metil
CH₄	Metan
CP	Kritik nokta
Cp₂Mg	Bis (siklopentadienil) Magnezyum
C_{xy}	Elastik sabiti
d	Düzlemler arası mesafe
D	Vida tipi dislokasyon
E	Toplam enerji
E_A	Alıcı enerji düzeyi
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_D	Verici enerji düzeyi
E_{ds}	Elektronik deformasyon potansiyel
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
Ga	Galyum
GaAlAs	Galyum Alüminyum Arsenit
GaAlAsP	Galyum Alüminyum Arsenik Fosfit
GaAs	Galyum Arsenit
GaAsN	Galyum Arsenik Nitrür
GaAsP	Galyum Arsenik Fosfit
GaN	Galyum Nitrür
GaP	Galyum Fosfit
GaSb	Galyum Antimonit
Ge	Germanyum
H	Hamilton operatörü

Simgeler	Açıklamalar
h,k,l	Miller indisleri
H₂	Hidrojen gazı
He	Helyum
In	İndiyum
InAs	İndiyum Arsenik
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
InGaN	İndiyum Galyum Nitrür
InN	İndiyum Nitrür
InP	İndiyum Fosfit
InSb	İndiyum Antimonit
K	Kelvin
k	Dalga vektörü, Termal iletkenlik
K_{α2}, K_β	Enerji seviyeleri arası geçişler
L	Yanalmozaik boyut uzunluğu
L_b	Bariyer genişliği
L_z	Kuantum kuyusunun genişliği
m*	Elektronun etkin kütlesi
M_f	Eksenli modül
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum Oksit
MgS	Magnezyum Sülfid
MgSe	Magnezyum Selenit
N	Azot
N	Kenar tipi dislokasyon
n	Kırılma indisi
n, p	Katkılama tipi
N₂	Azot gazı
NaCl	Kaya tuzu
NH₃	Amonyak
Ni	Nikel
P	Fosfor
p	Penetrasyon derinliği

Simgeler	Açıklamalar
P	Momentum işlemcisi
R	Örgü rahatlaması
s	Saçılma vektörü
S	Kükürt
Sb	Antimon
Si	Silisyum
Si_2H_6	Dislane
SiC	Silisyum karbür
SiH_4	Silane
T	Kinetik enerji
T_g	Alttaş büyüme sıcaklığı
Ti	Titanyum
V	Kuantum kuyusunun yüksekliği
x	Alaşım kompozisyonu
x, y, z, Φ, ξ, χ	Ölçüm eksenleri
ZnS	Çinko Sülfid
$ZnSe$	Çinko Selenit
α	Burkulma açısı
α, β	Atomlar arası açılar
β	Burgers vektör uzunluğu
δ	Gelen ışın demetinin ıraksaklığı
$\Delta a/a, \Delta c/c$	Termal genleşme katsayıları
ΔH	Oluşum ısısı
ϵ	Örgü uyumsuzluğu, örgü zorlaması, dielektrik sabiti
θ	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
λ	Dalgaboyu
ρ	Öz direnç
σ	İki eksenli gerilme
τ	Örgü eğilme açısı
ν	Poisson oranı
Ψ	Dalga fonksiyonu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
CD	Kompakt disk
CIE	Renk oluşumu
cps	Sayım/saniye
CRI	Renksel geri verim
CVD	Kimyasal buhar birikimi
DF	Dielektrik fonksiyonu
DNA	Deoksiribo nükleik asit
DVD	Yazılabilir kompakt disk
eV	Elektron volt
FTIR	Fourierkızılötesispektroskopisi
FWHM	Yarı maksimumdaki tam genişlik
GB	Giga bayt
hcp	Sıkı paketlenmiş altıgen
HEMT	Yüksek hızlı elektron mobiliteli tranzistör
HR-XRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı
Hz	Hertz
I-V	Akım-Voltaj
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
LO	Boyuna optik fonon enerjisi,
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar birikimi
MP	Mega piksel
MQW	Çoklu kuantum kuyusu
NANOTAM	Nanoteknoloji araştırma merkezi
P,Q,R,S	Sabit katsayılar
PL	Fotoluminesans
QW	Kuantum kuyusu
RF	Radyo frekansı

Kısaltmalar**Açıklamalar****RGB**

Kırmızı yeşil mavi

RLU

Ters uzunluk brimi

RMS

Kuadratik ortalama

SL

Uydu piki

TD

Tedirgin edici dislokasyon

TMAI

Trimetilalüminyum

TMGa

Trimetilgalyum

TMI_n

Trimetilindiyum

UHV

Çok yüksek vakum

UV

Mor ötesi

W-H

Williamson-Hall

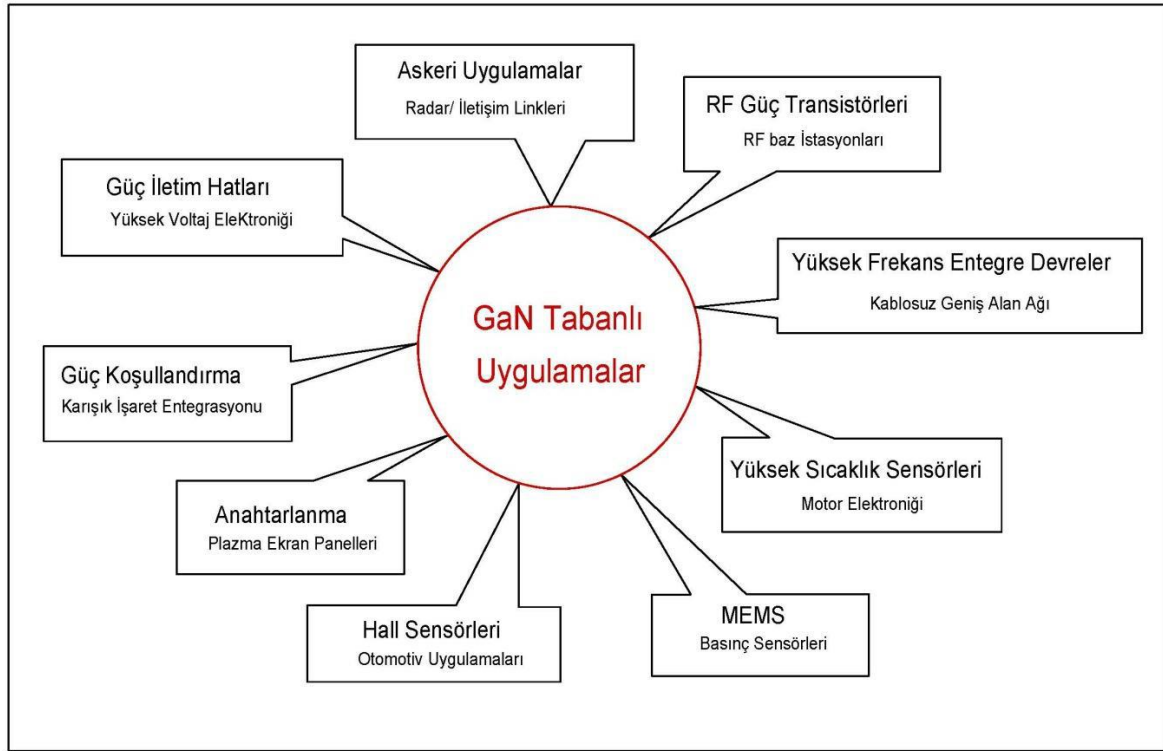
1. GİRİŞ

Bell laboratuvarlarında 1947'de William Shockley, Walter Brattain ve John Bardeen tarafından ilk katı hal silikon (Si) bazlı transistör yapısının icadı, modern elektroniğin ilerlemesinde çok önemli bir rol üstlendi [1]. Günümüzde, transistör kullanılan tüm cihazların tüm elektronik devrelerinde temel bir eleman olarak kullanılmaktadır. Bu önemli buluştan sonra, transistörlerin kapasitelerini ve üretim hacmini arttırmak için önemli çalışmalar yapılmıştır. Daha hızlı, daha güvenilir, daha güçlü ve daha küçük transistör geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir.

Bu gelişmeleri yapmak için geleneksel teknoloji ve malzemeleri kullanmak yerine, yeni tür malzeme ve teknolojiler ortaya çıkmıştır ve çalışmalar bu yönde ilerlemektedir.

Yarı iletken cihazlarla ilgili araştırmalar, Germanyum (Si), Silisyum (Si), Silisyum Germanyum (SiGe) ve Gallium Arsenide (GaAs) yarı iletken malzemelerin kullanımıyla yeni bir döneme geçiş yaptı. Bu bağlamdaki en büyük devrim, 1979'da GaAs'ların yüksek elektron mobilite transistörünün Fujitsu laboratuvarlarında Takashi Mimura tarafından icat edilmesidir. Bu buluş, elektron iletimi üzerine çalışan yarı iletken teknolojisine açılan bir kapı olmuştur ve bu yeni teknoloji standart transistör teknolojisini geliştirmiştir [2]. Bu çalışma ile çok yüksek hareketlilik değerleri ve taşıyıcı yoğunlukları elde etmek mümkün olmuştur. 20. yüzyılda kullanılan transistör teknolojisinde elektronları yarı iletken üzerinde hareket ettirmek için temel prensip, yapının p-tipi veya n-tipi ilavesiyle serbest elektronlar oluşturmaktır. Bu teknolojiye, elektronlar serbest elektron oluşumu için katkılarla çarpışmalar ve elektronlar hızlarını kaybederler. Bu durum cihaz performansını azaltır. Bununla birlikte, bu teknoloji birçok yarı iletken cihazın üretiminde kullanılmaya devam etmektedir. HEMT teknolojisinde temel prensip, bu malzemelerin orta bölgesinde iki farklı malzemenin amplifikasyonu yoluyla kuantum kuyularının üretilmesidir. Bu kuyu sayesinde, 2 boyutlu bir elektron gazı (2DEG) oluşur, ilave atomlar bu bölgede herhangi bir çarpışmaya veya saçılmaya uğramaz. Bu etkiler en aza indirildiğinde, cihaz performansı iyileştirilir. Bu teknoloji AlGaAs / GaAs'ın hetero-eklem yapısı ile ortaya çıkmıştır. Bu ortak yapıda ki yüksek performans, diğer malzeme türlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Özellikle III-nitrat içeriğine sahip yarı iletkenler, yüksek bant aralığı enerjisi, yüksek ısı iletkenliği, yüksek kırılma stresi ve yüksek elektron doyuma hızı nedeniyle ön plana çıkmış ve yarı iletken

araştırmalarında en önemli malzemeler haline gelmiştir. Optoelektronik ve elektronik teknolojisinde birçok kullanımları vardır [3]. Nitrat gruplarının doğrudan band aralığı ile AlGa_N, InGa_N, InAl_N ve AlGaIn_N gibi birçok bileşiğin üretilmesine izin veren nitratların en önemli özelliklerinden biridir. Bu çalışmalarda GaN malzemesi öne çıkmıştır. Hiroshi Amano ve arkadaşlarının GaN ince filmlerinin kalitesi 1986'da Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemiyle AlN tampon katmanlarını kullanarak; morfolojik, kristal ve optik özellikler açısından geliştirmiştir [4]. 1994 yılında, Asif Khan ve ekibi tarafından GaN-tabanlı HEMT'den sonra üretilen ilk GaN / AlGa_N hetero-alan etkili transistörler çok önemliydi [5]. GaN malzemesinin bazı uygulama alanları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. GaN uygulama alanları

İyi yarı iletken performansı için, malzemelerin iki önemli parametre değeri genellikle göz önünde bulundurulur. Bunlar, Johnson değer katsayısını en aza indirmek için gerekli parametreler ve cihazın güç frekansı ürününü tanımlayan sızıntıları içeren Baliga değer katsayısıdır. GaN'nin diğer yarı iletkenlerle karşılaştırılması, Çizelge 1.1'de verilmiştir. Yüksek ısı iletkenliği, yüksek bant aralığı, yüksek kırılma elektrik alan ve düşük dielektrik

sabiti yarı iletkende istenen malzeme özellikleridir. SiC ve GaN, geleneksel yarı iletkenlerden daha üstün özelliklere sahiptir ve bu nedenle çalışmalar, GaN'a odaklanmıştır.

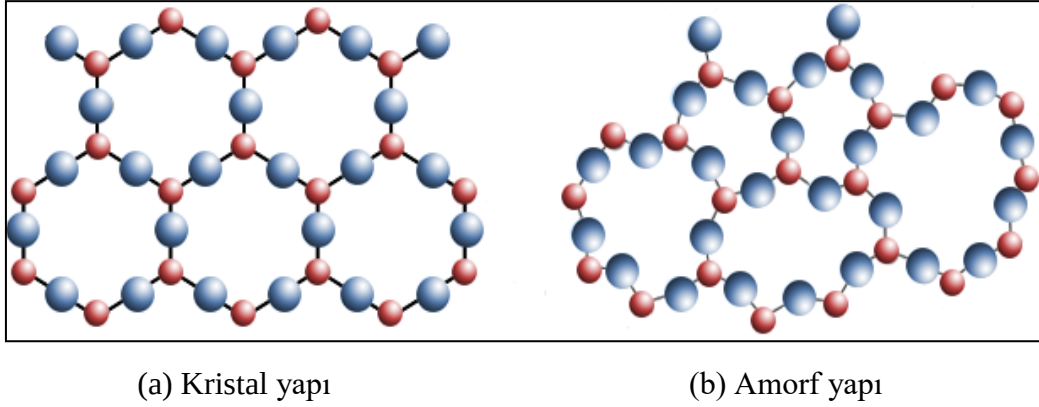
Çizelge 1.1. Bazı yarı iletken malzemeler için elektronik ve mekanik parametreler

	Si	InP	GaAs	4H-SiC	GaN
Bant Geniğiği E_g (eV)	1,12	1,34	1,43	3,25	3,44
Elektron Mobilitesi μ_n (cm ² /V.s)	1350	5000	8500	1000	1500
Hole Mobilitesi μ_p (cm ² /V.s)	600	100	400	115	200
Elektron Sürüklenme Hızı v_d (10 ⁷ cm/s)	1	1,5	1	2	2,5
Kırılma Elektrik Alanı E _{br} (mV/cm)	0,3	0,45	0,4	2,2	2
Isıl iletkenlik (W/cm.K)	1,5	0,7	0,5	4,9	1,5
Johnson değer katsayısı [(E _{br} · v_{sat})/ π] ²	1	3	1,8	215,1	215,1
Baliga değer katsayısı [$\epsilon_r \cdot \mu_n \cdot E_{cr}^3$]	1	5,7	14,8	223,1	186,7
Yoğunluk (g/cm ³)	2,33	4,79	5,32	3,21	6,15
Erime Noktası, (K)	1415	1070	1238	3103	2791

2. TEMEL BİLGİLER

2.1 Kristal Yapılar

Katı yapılar, kristaller ve amorf yapılar olarak iki gruba ayrılabilir. Kristal katılarda moleküller ve atomlar belirli bir geometrik düzene ve şekle göre hizalanırlar. Amorf katıları ise kauçuğa benzetebiliriz yani özel bir düzenleri yoktur. Polikristaller ise küçük kristal grupların kombinasyonu ile oluşmuş kristaller topluluğudur. Kristal ve amorf yapının molekül desenleri arasındaki fark Şekil 2.1’de verilmiştir [6].



Şekil 2.1. (a) Kristal yapı (b) Amorf yapının molekül deseni

1832'de ilk kez, William Hallowses Miller, kristallerin belirli bir yönde yerleştirildiğini keşfetti ve bu keşif birçok kaynağa dahil edildi. Bu keşiften sonra Miller, kendisini birim hücre olarak tekrarlayan en küçük üç boyutlu yapıyı adlandırdı. 1850'de katı kristallerin Miller Auguste Bravais'in eserlerinde yayınlanan altıgen, kübik, dörtgen, tetragonal, rombohedral, monoklinik, ortorombik ve triklinik olmak üzere yedi temel birim hücresi olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca birim hücreler; Dört basit Bravis örgüsüne sahiptir. Basit kübik, yüzey merkezli, hacim merkezli ve taban merkezli hücrelerdir. Bu yedi birim hücre ve dört dokuma yapı, tekrarlanan kombinasyonlar yok edildiğinde dört temel Bravis hücresi oluşturulur [7]. Basit kübik sistemde, birim hücrenin köşelerinde sadece bir atom vardır. Her bir köşedeki atom, kendisine bitişik 8 hücreye bölündüğünde, birim hücre başına $1/8$ atom düşer, sekiz köşeden gelen katkılarla, toplamda her birim hücrede bir atom bulunur. Bir Hacim Merkezli Kübik sistem, birim hücresinin köşelerinde ve merkezde tek bir atom içerir. Basit kübik sistemdekine benzer şekilde, birim hücrede köşelerden gelen bir atom ve merkezdeki bireysel atom olmak üzere iki atom vardır. Yüzey merkezli kübik sistem, her

birim hücrenin köşelerinde ve yüzeyinde bir atom içerir. Köşelerden yapılan katkı basit bir kübik sistemde olduğu gibi bir atomdur. Bir yüzey atomunu iki birim hücre ile paylaşmanın katkısı $1/2$ atomdur ve altı yüzeyden toplam üç atom elde edilir, böylece yüzey merkezli birim hücrenin toplam dört atomu olur. [7].

2.2. Epitaksi

Epitaksi, tek bir kristal alttaşı üzerine yönlendirilen bir kristal büyüme sürecidir. Büyütme işlemi; aynı malzeme türünde homoepitaksi, farklı malzeme türlerinde ise heteroepitaksi denir[8,9]. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (MOCVD) ile üretilen yapılar heterosiseptif sınıfına dahil edilebilir.

Maksimum ağ uyumluluğu olan MOCVD ürünlerinin kaliteli cihaz üretimi için çok önemli olduğu iyi bilinmektedir. Örgü uyumunda ilk göze çarpan unsur elbette kullanılacak olan alttaşın seçimidir. GaN, son yıllarda yaygın olarak kullanılan ve bir alttaş olarak kullanılan önemli bir III-V grubu bileşik yarı iletkenidir. Yüksek kalitede bir GaN kristali elde etmek için yüksek bir büyüme sıcaklığı ve yüksek basınç gerekir. Bu nedenle, GaN alt tabanına alternatif olarak silisyum karbür (SiC) ve safir alttaşların kullanılması önerildi ancak GaN ile kullanılan bu malzemeler arasındaki ağ uyumsuzluğu düşük kaliteli filmlerin üretilmesine yol açtı [10]. Ek olarak, termal genleşme katsayısındaki farklılıklar, filmlerde gerilme ve dislokasyonlara neden olmaktadır. Bu dislokasyonları ve gerilmeleri azaltmak için bir tampon tabakası kullanılması önerilmiştir. Bu öneriye göre, öncelikle AlN veya GaN katmanı, alttaşı üzerinde büyütülür[10]. Bu tezde, büyüttüğümüz malzemenin (AlGaIn) özellikleri nedeniyle, GaN tampon tabaka olarak tercih edildi. Bu tabaka önce şekilsiz olarak büyümeye başlar ve daha sonra tek bir kristal yapı oluşturur. Önerilen bu düşük sıcaklık tampon katmanının kullanılması, daha yüksek kalitede GaN filmlerin üretimine izin verir.

2.2.1. Azotlu yapı büyütmede kullanılan alttaş malzemeler

Azot amplifikasyonu için alttaş olarak bir malzeme seçiminde en önemli nokta örgü uyumluluğudur. Ayrıca, kristal yapı, reaktivite, yüzey kalitesi, bileşim, kimyasal, termal ve elektriksel özellikler göz ardı edilmemelidir.

Safir, GaN, silisyum, silisyum karbür ve AlGaIn, malzemelerin büyüme aşamasında en yaygın kullanılan alttaştır. Bu grupta silisyum karbür ve safir daha çok kullanılan iki malzemedir [11]. Son zamanlarda, silikon alttaşı ile ilgili çalışmalarda kayda değer bir artış

olmuştur [12,13]. Çizelge 2.1’de GaN ve azotlu epitaksiyel tabakalar için yaygın olarak kullanılan alttaşların bazı özellikleri verilmiştir [14].

Çizelge 2.1. GaN ve azotlu epitaksiste kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri

Alttaş	a (Å)	c (Å)	Termal Genleşme $\Delta a/a$ (K ⁻¹) (x10 ⁶)	Termal Genleşme $\Delta c/c$ (K ⁻¹) (x10 ⁶)	Termal İletkenlik W/cmK	Erime Noktası °C
Safir	4,765	10,298	7,5	8,5	0,4	2303
Si (Kübik)	5,4301	-	3,99	-	1,56	1412
6H-SiC	3,0806	15,1173	4,46	4,16	3,8	3102
GaN	3,199	5,184	5,59	3,17	2,3	2791

2.2.2. Safir alttaş

Bu tez çalışmasında, alttaşların özellikleriyle ilgili bazı detaylar verilmiştir. Safir alttaş üzerine büyütmüş olduğumuz AlGaN HEMT yapıları için kullanılan malzemeler aşağıda verilmiştir.

Safir alttaşı ilk kez 1969'da Tietjen ve Maruska tarafından GaN'ı büyütme için kullanılmıştır. Hala azotlu malzemenin büyümesinde kullanılan en yaygın malzemedir [15]. Bir malzemenin kullanılmasında ki en önemli avantajlar, gelişmiş teknoloji, düşük maliyet, yüksek sıcaklık kararlılığı ve kolay temizleme olarak sıralanabilir [10]. En büyük dezavantajlardan biri, düşük ısı iletkenliğidir. Bu durum, diğer yüzeylere göre daha zayıf bir ısı dağılımı oluşturduğundan yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmaması nedeniyledir. Diğer bir dezavantaj, ölçüm için alınacak kontakların yalıtkan olmaları nedeniyle cihazın önünde olmasıdır. Bu durumda, cihazın aktif kullanımı azalır ve daha karmaşık bir cihaz yapısı oluşur [11]. Ek olarak, safir ve 10¹⁰ cm⁻² 'ye kadar azotlu bileşik yarı iletken malzemeler arasındaki büyük örgü sabit uyumsuzlukları, epitaksiyel katmanda ciddi yer değiştirmelere yol açar [16]. Ayrıca, numune soğutulduğunda, azotlu materyal ve safir arasındaki termal tutarsızlık, epitaksiyel katmanda stres yaratır. Kritik kalınlıkta malzemeler için bu gerilme, alttaş ve epitaksiyel tabakada çatlak oluşumuna neden olur [17]. Bir diğer önemli dezavantaj, safir bileşiğindeki oksijenin büyütülmüş epitaksiyel tabakada istenmeyen

bir katkı maddesine neden olması ve arka plan safsızlığını arttırmasıdır [18]. Bu tezde, safirin (0001) örgü uzay oryantasyonu kullanılmıştır. Safirdeki azotlu yapıyı arttırmada kullanılan en yaygın yönelimdir. MOCVD (0001) yönelimli safirde büyütülen GaN epitaksiyel filmleri Ga polaritesine sahiptir. [19].

2.3. Yarıiletkenler

Tüm maddeler elektriği az ya da çok iletirler. Maddeler; $\rho_{\text{metal}} 10^{-10} \Omega.\text{cm}$, $\rho_{\text{yarıiletken}} 10^{-2}-10^9 \Omega.\text{cm}$ ve $\rho_{\text{yalıtkan}} = 10^{22} \Omega.\text{cm}$ mertebelerinde öz dirence sahiptir. Özdirencin dirençle doğru orantılı, akımın ve dolayısıyla iletkenliğinde bunlara ters orantılı bir şekilde bağlı olduğu düşünüldüğünde her madde çok az da olsa bir iletkendir diye kabul edilebilir. Ek olarak, elementlerin iletkenlik ve yalıtkanlık karakterleri elektronlarını bulundurdıkları enerji bantlarıyla detaylı olarak incelenebilir. Bir katı bandının yapısı, manyetik, optik ve elektriksel özellikleri gibi birden fazla özelliği tanımlar. Atomlar birbirlerinden uzak olduğunda, elektron şemaları birbirinin etkisiyle değişmez ve etkileşim oluşmaz. Atomlar arasındaki mesafe azalırsa, dış yörüngeler üst üste gelmeye başlar ve atomlar artık bağımsız olmaz. Kristallerdeki elektronlar enerji bantlarında bulunur. Bu bantlar, elektronların bulunmadığı bölgelerle birbirlerinden ayrılır. Elektronların bulunmadığı bu bölgelere yasak band aralığı veya yasak enerji aralığı (E_g) denir. En düşük boş band iletkenlik bandı (E_c) ve elektron seviyeleriyle dolu en yüksek band valans bandı (E_v) olarak tanımlanır. Değerlik bandı, kristalde her atom tarafından verilen değerlik elektronlarının sayısı ile bantta bulunan elektron seviyeleri arasındaki orana bağlı olarak kısmen veya tamamen doldurulabilir. Değerlik bandının doldurulması ve değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji boşluğunun büyüklüğü, kristalli yarıiletkenlik, iletkenlik veya yalıtkanlık karakterleri olarak tanımlanmaktadır. 0 K'de tüm elektronlar değerlik bandında olduğu ve iletkenlik bandında birçok boş seviye olduğu için, bu elektronlara uygulanan küçük bir potansiyel ile elektronlar iletkenlik bandına kolayca geçebilir. Uygulanan potansiyel, değerlik bandındaki elektronlara çeşitli etkiler ile iletilirse, iletim bandına geçer. Fermi enerjisi (E_f), 0 K'de bir elektronun doldurabileceği en son seviyenin enerjisidir.

Band yapısına bağlı olarak katıların kategorize edilmesi aşağıdaki gibi yapılabilir;

- (i) Metallerdeki değerlik bandı kısmen doludur.
- (ii) Yarımetallerde iletkenlik ve değerlik bandının örtüşmesi nedeniyle değerlik bandı kısmen doludur.

- (iii) Yalıtkanlarda valans bandı tamamen doludur, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında geniş bir enerji aralığı vardır.
- (iv) Yarıiletkenlerde ise valans bandı tamamen doludur ve valans bandı ile iletkenlik bandı arasında küçük bir enerji aralığı bulunmaktadır.

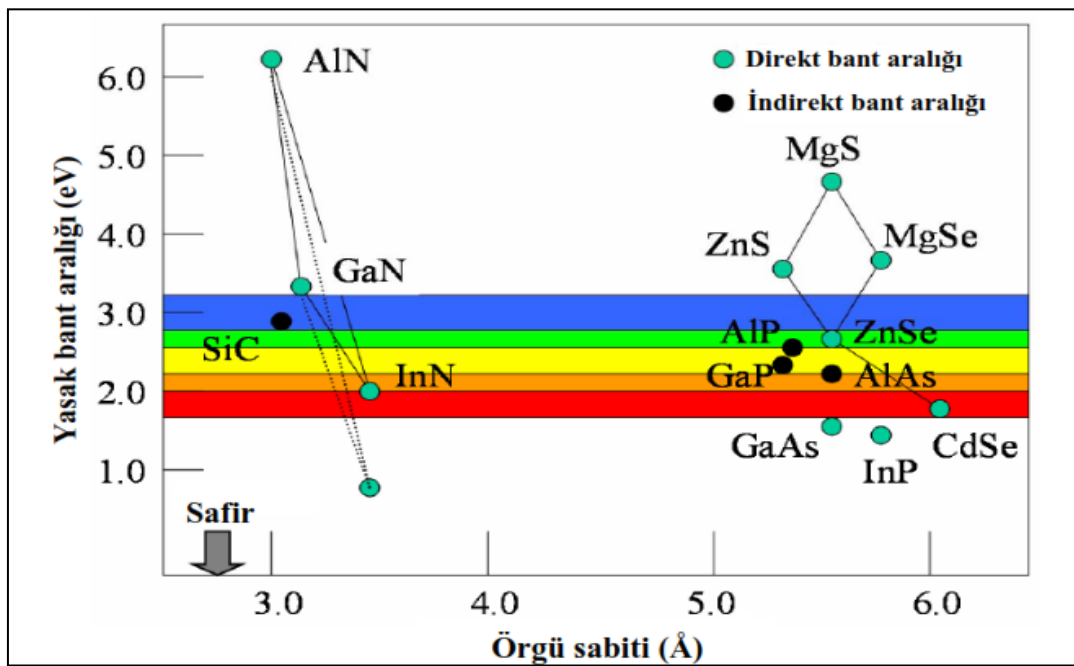
En üst enerji kabuğunda 4 elektron bulundurup normalde yalıtkan olan ve akım, ışık ve ısı gibi dış etkenlerle uyarıldığında iletkenlik özelliği gösteren yarıiletkenlerin elektriksel ve diğer özellikleri, iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer almaktadır. Yarıiletken malzemelerin en önemli iki özelliği; serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunması ve bu malzemelere yapılacak çok düşük orandaki uygun etki ile bu yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirilebilmeleridir. Yarıiletkenleri; bileşik, element ve alaşım yarıiletkenler olarak üç grupta sınıflandırabiliriz.

Elementer yarıiletkenler; Germanyum (Ge) ve Silisyum gibi aynı cins atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirlerine bağlanmışlardır ve saf olarak doğada bulunurlar.

Bileşik yarıiletkenler, doğal halde bulunmayan fakat yapay büyütme teknikleri ile elde edilebilen InP, GaAs ve GaN gibi iki elementten oluşan yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıklar nedeniyle kristal bağlanma iyonik ve kovalent bağlanmanın çeşitidir.

Alaşım yarıiletkenler; bileşiğe üçüncü bir elementin eklenmesiyle oluşturulur. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bunlara örnek olarak verilebilir. Burada x ilgili elementin alaşımdaki oranını temsil eder. Bununla birlikte $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ gibi dörtlü alaşım yarıiletkenleri elde etmek mümkündür. Burada x ve y, alaşımı meydana getiren elementlerin oranlarını belirtir. İşlenmiş doğal yarıiletkenler, ikili bileşik yarıiletkenler, üçlü ve dörtlü alaşım yarıiletkenler kullanılarak; diyot, transistör, LED, Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT), foto dedektörler, entegre devre elemanları, lazerler gibi elektronik ve optoelektronik cihazlar üretilmektedir. Nanoteknolojide yarıiletken malzemelerin tercih edilme nedenleri, üstün optoelektronik özellikler taşımalarının yanı sıra hafif, küçük ve verimli olmalarındandır.

Farklı bileşimlerden oluşan tabakaların örgü sabitleri arasındaki farklılıklar gerilmiş yapıların oluşumuna sebep olmaktadır. Bu tabakalar üst üste büyütüldüğünde, yarıiletkenin yüzeyindeki boş bağlardan dolayı “yüzey birleşmeleri” olarak adlandırılan birleşme merkezleri oluşur ve örgünün bu istenmeyen süreksizliği, “yüzey durumları” olarak adlandırılan çok sayıda enerji durumu oluşturmaktadır [20]. Bu boş bağlı atomlar ayrıca bir birleştirme mekanizması olarak hareket ederek taşıyıcıları yakalayarak taşıyıcı ömrünü azaltır. Bu nedenle, örgü uyumlu tabakaları büyütme önemlidir. Şekil 2.2 farklı yarı iletkenler için yasak bant boşluğunu ve örgü sabitini göstermektedir. [21].



Şekil 2.2. Farklı yarıiletkenler için yasak bant boşluğunun örgü sabitine göre değişimi

Örgü uyumlu yapılar elde etmek için örgü sabitine en yakın malzemeleri kullanmak gerekir. Örgü için uygun alt tabakanın seçilmesi de önemlidir. Alttaş ile büyütülecek katman arasındaki örgü sabiti açısından önemli bir fark varsa; doğrusal artan büyüme modu ile ağ uyumluluğu elde edilebilir [22,23].

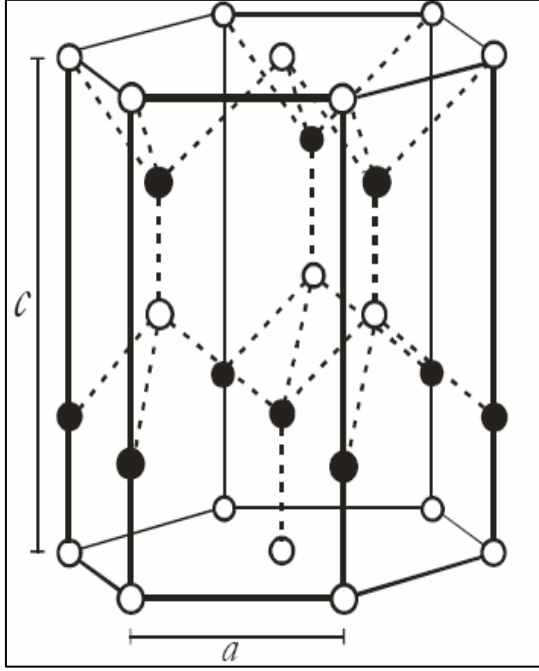
Bileşik ve alaşım yarı iletkenlerin epitaksel amplifikasyonu için çok sayıda teknik geliştirilmiştir. Kimyasal Buhar Birikimi (CVD), Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) bu tekniklerden bazılarıdır. Bu teknikler ile periyodik tablonun II-VI, III-V ve IV-VI gruplarındaki elementlerin uygun kompozisyonları kullanılarak çeşitli yarı iletken kristalleri büyütme mümkündür.

2.3.1 Nitrit yarıiletken malzemeler

Bu kısımda, nitrit yarıiletken malzemelerin temel özellikleri, büyütülmesi ve yüzeyleri hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

2.3.2 Fiziksel Özellikler

Nitrit yarı iletken malzemeler üç farklı yapıda kristalize olabilir: Bunlar kükürt (S), çinko (Zn), sodyum klorür (NaCl) ve wurtzitedir. Bu yapıların termodinamiksel kararlı fazı wurtzite yapıdadır. Bu sebeple cihaz için wurtzite yapı kullanılır. Wurtzite yapı için altıgen prizmanın yüksekliği “ c ”, altıgenin taban kenar uzunluğu “ a ” ve (0001) eksenini boyunca anyon-kasyon bağ uzunluğu olarak anılan “ u ” parametresi ile belirtilir. Şekil 2.3’ de bu yapıya ait birim hücre gösterilmektedir. Bu yapıda kristalleşen nitrit bileşik yarıiletken malzemeler (0001) yöneliminde ABABAB şeklindeki dizilişli grup-III (In, Ga, Al) ve grup-V (N) düzlemler çiftlerinden oluşmaktadır. Grup-III atomu, dört N atomuyla tetrahedral bağ yapar. AlN, InN ve GaN farklı katyonlara ve farklı iyonik yarıçaplarda bulunmaktadır. Bu sebeple malzemelerin örgü sabitleri (Şekil 2.2), bağlanma enerjileri ve band aralıkları farklıdır. Bunun dışında wurtzite yapıları nitrit bileşik yarıiletkenler, direkt band aralıkları 0,7 eV’den 6,2 eV’a kadar uzanan alaşım yarıiletken malzemeleri barındırmaktadır. Şekil 2.2’de wurtzite yapıları nitrit bileşik yarıiletken malzemelerle alakalı önemli birkaç parametre belirtilmiştir. Diğer taraftan wurtzite yapı terslenme (*inversion*) simetrisine sahip değildir. Bundan dolayı wurtzite yapıları nitrit malzemeler grup-III (Ga, In veya Al) ya da grup-V (N) polariteye sahiptir. Polarite öbek (*bulk*) ve yüzey özellikleri bakımından çok önemlidir. Mesela; N-polar GaN’ın, Ga-polar GaN’dan kimyasal olarak daha reaktif olduğu gözlenmiştir [24]. Safır alttaşı üzerine MOCVD ile büyütülen nitrit malzemeler ise Ga polaritededir. Moleküler demet epitaksi (MBE) ile büyütülen nitrit yapıları ise çoğunlukla N polariteye sahiptir ama bu yapılar GaN büyütmeden önce ince AlN tampon tabakası Ga polaritesini oluşturmak maksadıyla büyütülebilir [25].



Şekil 2.3. Wurtzite yapıda birim hücre (a ve c örgü sabitleri) [33]

Çizelge 2.2. Wurtzite yapıda olan nitrit bileşik yarıiletkenlerle alakalı bazı parametreler [26]

	Birim	InN	GaN	AlN
Örgü sabiti a (300 K)	Å	3,54	3,189	3,112
Örgü sabiti c (300 K)	Å	5,705	5,185	4,982
Erime noktası	K	2146	2791	3487
Termal genleşme katsayısı α_a	10^{-6} K^{-1}	3,8	5,59	4,15
Termal iletkenlik (300 K)	$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$	1,76	4,1	5,9

2.3.3. Heteroyapı

Birbirinden farklı bant aralıklarına sahip iki veya daha çok yarıiletken malzemeden oluşan yapıya “heteroyapı” denir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletkeninin GaN yarıiletkeni üzerine büyütülmesi ile oluşan yapı buna örnektir. Bu yapılar elektron ve deşiklerin hareketini kontrol etmek için çeşitli şekillerde tasarlanmıştır. Bu özellik elektronik ve optoelektronik uygulamalar için çok önemlidir [20]

Heteroyapıları baz alan cihazlarda aktif bölge, ara yüzeyler veya ara yüzeylere yakın bölgelerdir [22] Bu nedenle yüksek verim için muhteşem ara yüzeylere sahip uygun heteroyapılar oluşturulmalıdır. Aksi takdirde, ara yüzey boyunca hareket eden elektronlar kusurlar sebebiyle dağılır. İdeal heteroyapı hazırlamak maksadıyla farklı türdeki malzemeleri birleştirmek gerekmektedir. Bundan dolayı birleştirilen malzemelerin aynı kristal yapıya (ya da en azından aynı simetriye) sahip olmalıdırlar. Bu gereksinim, temel III-V yarıiletkenler tarafından sağlanmıştır İkinci bir gereklilik, hazırlanan heterojen yapılarda gerilmenin olmamasıdır. Çünkü germe işlemi kritik bir kalınlıktan sonra tabakalarda kritik hatalara neden olur. Bu cihaz yapılar için istenmeyen bir durumdur. Gerinme bulunmayan bir heteroyapı, birbirlerine yakın örgü sabitine sahip malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilir [22]. Ek olarak, birleştirilmiş malzemelerin termal genleşme katsayıları dikkate alınmalıdır. Birleştirilen malzemelerin ısı genleşme katsayıları çok farklıysa, yüksek sıcaklıklarda üretilen heterojen yapılar oda sıcaklığına soğutulduğunda gerilme meydana gelir.

2.4. Doğrudan ve Dolaylı Band Yapıları

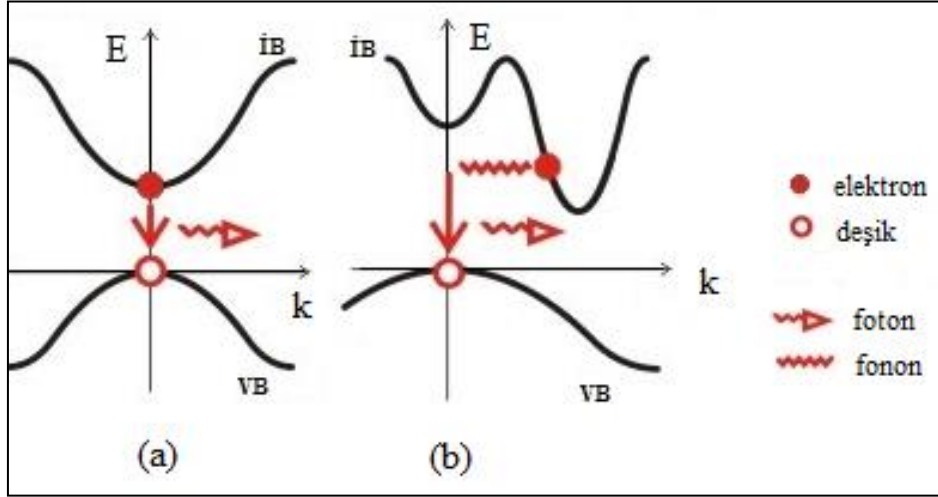
Yarı iletkenlerin band aralığı yapısı, malzemenin elektriksel optik ve diğer özellikleri hakkında bilgi sağlar ve daha verimli optoelektronik cihazların üretimi için bize yardımcı olur. Bu malzemeler doğrudan band aralığı ve dolaylı band aralığı olan malzeme olarak iki gruba ayrılır. Doğrudan ve dolaylı band aralığı Şekil 2.4'de verilmiştir, k dalga vektörü doğrudan ve dolaylı band aralığı için farklı olduğu görülmektedir

2.4.1. Doğrudan band aralıklı yarıiletken

Yarı iletkenin değer bandının maksimum değeri ve iletkenlik bandının minimum değeri aynı k değerinde ve sıfır ($k = 0$) ise, elektron iletkenlik bandına en az yasaklanan band boşluğuna eşit bir enerji alarak ulaşır. Böylece, k dalgası vektörü değişmez ve kristal dokumada momentum kaybolmaz (Şekil 2.4-a). GaN, çalışmamızda önemli bir yere sahiptir. Değerlik bandının maksimum noktasıyla, iletkenlik bandının minimum noktası aynı k değerinde bulunmuş olduğundan doğrudan band aralıklı bir yarıiletkendir.

2.4.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletken

Bir yarı iletkenin değer bandının maksimum değeri ve iletkenlik bandının minimum değeri farklı k değerinde ($k \neq 0$) ise valans bandına ait bir elektron, farklı k değerindeki iletkenlik bandına ulaşabilmesi için yarıiletken örgüsüne momentum aktararak geçiş yapabilir (Şekil 2.4-b).

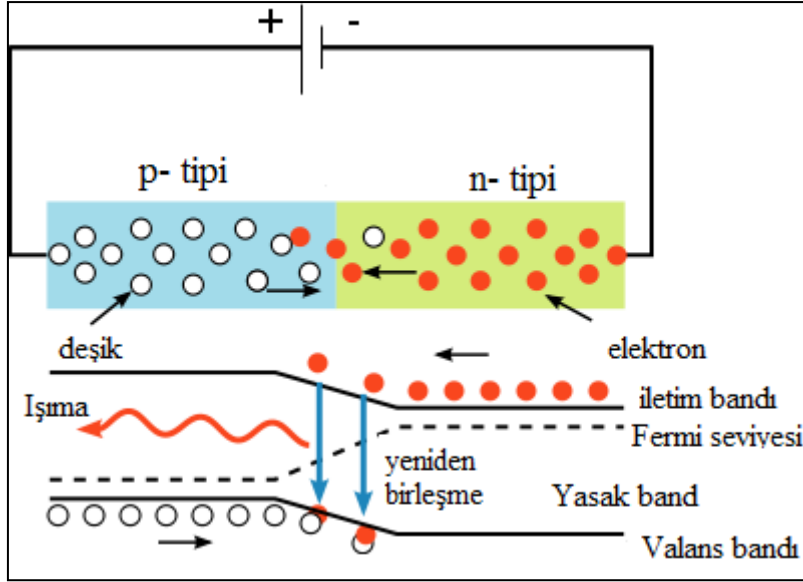


Şekil 2.4. (a) Doğrudan band aralığı (b) Dolaylı band aralığı

2.5. p-n Eklem

Işık yayan diyotlar morötesi, kızılötesi veya görünür bölgelerde kendiliğinden ışıma yayabilen p-n eklemelerdir [26]. P tipi ve n tipi malzemeler birbirleriyle temas halinde olduğunda, bağlantı tek başına her iki malzeme türünden çok farklı davranır. Özel olarak, akım kolayca bir yönde (ileriye doğru eğimli) akacak ve temel diyotu oluşturacaktır. Bu geri dönüşsüz davranış, iki tür malzemedeki taşıma sürecinin niteliğinden kaynaklanmaktadır [26,27]. Eklem p bölgesinin yanında, negatif ve n bölgesinin yakınında pozitif bir yük tabakası (tüketim bölgesi) oluşturulur ve bir bariyer potansiyeli meydana gelir [28]. Bu yük bölgesinde (taşıyıcı yoğunluğu olmayan bölge), pozitif yükten negatif yüke bir elektrik alanı üretilir. Bu elektrik alanı her yük taşıyıcısı türü için difüzyon akımının zıt yönündedir [26,28]. Uygulanan voltajla, difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki denge bozulur. Doğru beslemede uygulanan voltaj, tüketim bölgesi boyunca elektrostatik potansiyeli azaltır, böylece p bölgesinden n bölgesine difüzyonun artmasına ve elektronun n bölgesinden p bölgesine difüzyona doğru yayılmasına neden olur. Böylece, bir azınlık taşıyıcısının

enjeksiyonu meydana gelir, yani ilk durumun aksine itme hareketi meydana gelir. Bunun sonucunda elektronlar ile deşikler eklemnin yakınında karşılaşır (Şekil 2.5) [29].



Şekil 2.5. p-n eklemde yeniden birleşme

2.6. Azotlu Yarıiletken Malzemeler

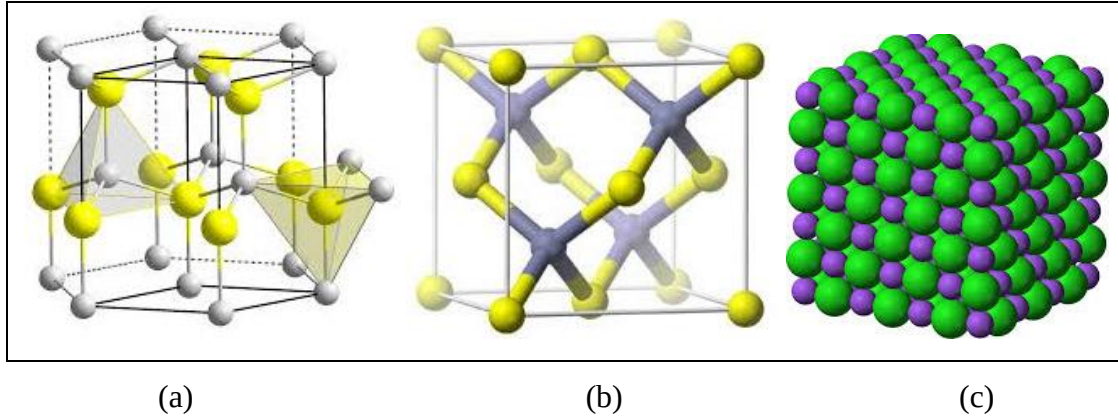
Bu kısımda, öncelikle AlN, GaN ve InN yarı iletkenlerinin bazı özellikleri, azotlu malzemelerin bilimsel gelişimi, önemi ve kullanım alanları incelenecek. Ayrıca azot esaslı yapılarda görülen kusurlar ve çok katmanlı yapılarda polarizasyonlara değinilerek tartışılacaktır [3,30].

InGaN epitopu, InGaN / GaN aktif tabakaları ve kuantum kuyusu yapılarının özellikleri açıklanacaktır. Nanoteknolojik sınıfı oluşturan optoelektronik cihazların üretimi için azotlu malzemelerin önemi son derece büyüktür. Bu nedenle, bu malzemelerin özelliklerini, büyütölmelerini ve yüzey koşullarını, üretilecek ekipmanın kalitesi açısından bilmek önemlidir. Bölgeyi metallerden yalıtkanlara kadar kaplayan yarı iletkenler, önemli bir katı sınıfını oluşturur. Yarıiletkenler çok çeşitli teknolojik uygulamalara sahiptir. III-V grubu yarı iletkenler, yarı iletkenlerin önemli bir alt grubunu oluşturur. InAs, GaAs, InSb, GaP, GaSb, bu gruptaki en yaygın bileşik yarı iletkenlerdir. InGaAs, AlGaAs, InGaN ve GaAsN III-V ise önemli alaşım yarı iletkenleridir.

Çalışmalarda; SiC ve elmesa ilave olarak, azot alaşımlı yarı iletkenlerin cihaz sıcaklıkları için daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek potansiyel ve direnç değerleri sağlayabildiği gözlenmiştir [31]. Bu nedenle, yüksek güç ve yüksek frekans gerektiren uygulamalar için, III-V grubunun azotlu alaşımlarının kullanımı artmaktadır [31,32].

2.6.1. III-V azot bileşiklerinin kristal yapısı

Yarıiletkenler, çok sayıda element ve farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip bileşikler içerir. Bu elementler ve bileşikler, periyodik tablodaki konumlarına bağlı olarak benzer davranış gruplarına ayrılır. Elmas yapı iki özdeş atomdan oluşan yüzey merkezli bir kübik yapıdır ve saf yarıiletkenler elmas yapısında kristalleşir. III-V grubu bileşik yarı iletkenlerde, üç değerlik elektronu ve beş değerlik elektronu içeren atomlar bu elektronları tetrahedral kovalent bağa ekler. Bu grupta bağlanma tamamen kovalent değildir. Bileşikte ki iki element farklı olduğu için, elektronların bağ boyunca dağılımı simetrik değildir. Yük dağılımı büyük atoma doğru kaydırılır. Bu yük kayması III-V grubundaki kovalent bağlara iyonik bir görünüm verir. Bu nedenle, III-V grubu yarıiletken bileşiklerin bağlanması birçok yarı iletken baskın olmasına rağmen kovalent ve iyonik bileşenlerin bir karışımıdır [33,34]. III-Azot grubu yarı iletkenleri (GaN, AlN ve InN), altıgen (wurtzit), çinko karışımı ve NaCl (kaya tuzu) yapısında kristalize olur (Şekil 2.6) [2,3]. Normal şartlar altında termodinamik olarak dayanıklı yapı altıgendir. AlN, GaN ve InN, en stabil altıgen yapı içinde kristalleştirilir. ZnS (çinko sülfür) ve elmas yapısı arasındaki tek fark, bazılarını oluşturan iki atomun farklı olmasıdır. Her atom diğer cinsiyetten dört atomla çevrilidir ve bu atomlar pürüzsüz bir üçlü yapı oluşturur. Si, SiC, MgO, GaAs (011) gibi kristalimsi düzlemde, kristal düzleminin epitel büyütmesi yapılabilir ve kristalize edilmiş GaN ve InN, ZnS yapısında kararlı hale getirilebilir. NaCl yapısının stabilitesi ancak yüksek hidrostatik basınç altında mümkündür [33].



Şekil 2.6. (a) Altıgen (b) çinko karışımı ve (c) NaCl kristal yapıların şematize hali

Altıgen kristal yapı, sıkıca paketlenmiş altıgen (hcp) yapıya dayanmaktadır (Şekil 2.6-a). Yapı, altıgen bir birim hücresi ve her örgü noktasında iki atomlu bir tabandan oluşmaktadır [33,34]. Altıgen yapı ve çinko-kükürt kristal yapı birbirine benzerler. Çünkü dört yüzlü bağ gösterirler. Çinko altıgen yapıda eşit değildir, bitişik atomlar arasındaki bağın uzunluğu kükürt yapısındakine eşittir. Altıgen yapının birim hücresinde, her atomdan altı adet ve her biri tip atomlu altıgen bir örgüden oluşan, iç içe geçmiş ve sıkıca paketlenmiş alt birimler vardır. Asimetrik yapının altıgen birim hücresi “a” ve “c” As. yönde ki bağ, diğer üç bağdan daha uzundur [33,34].

2.6.2. III-V azot bileşiklerinin mekanik özellikleri

Malzeme biliminde; sertlik, esneklik sabitleri, hacimsel modül, Young modülü, Akma kuvveti gibi kavramlar mekanik özelliklerdir. Altıgen yapılarda, C_{11} , C_{33} , C_{12} , C_{13} ve C_{44} olarak bilinen beş bağımsız esneklik sabiti vardır ve C_{11} [1000], C_{33} yönlerinde uzunlamasına optik mod verir. C_{44} [0001] yöneliminde C_{66} ise [1000] yöneliminde yayılan enine modlar ses hızından tespit edilebilir ve C_{11} ve C_{12} sabitlerinin farkının yarısına eşittir. C_{13} ise [0011] gibi yüksek olmayan simetrikli doğrultuda yayılmış modların hızındaki diğer dört modülün değerlerinden ölçülür [35]. Çizelge 2.3 AlN, GaN ve InN için birtakım yapısal parametreler gözlemlenmiştir[3].

Çizelge 2.3. AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler

Örgü Parametreleri	GaN	InN	AlN
a (Å)	3,199	3,585	3,110
c (Å)	5,185	5,760	4,982
c /a	1,634	1,618	1,606
u	0,377	0,379	0,382
b (Å)	1,971	2,200	1,907
b ₁ (Å)	1,955	2,185	1,890
b ₁ '(Å)	3,255	3,600	3,087
b ₂ '(Å)	3,757	4,206	3,648
b ₃ '(Å)	3,749	4,198	3,648
α	109,17	108,69	108,19
β	109,18	110,24	110,73

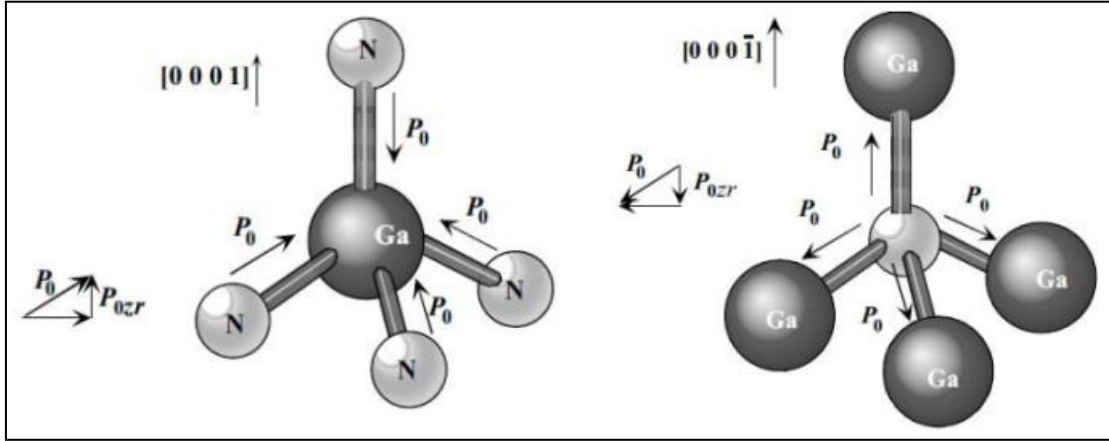
2.6.3. III-V azot bileşiklerinin elektriksel özellikleri

GaN ve diğer azotlu malzemeler; geniş ve doğrudan bant genişliği, yüksek kayma hızı, yüksek hareketlilik değerleri ve yüksek kırılma voltajları gibi çok önemli elektriksel özelliklere sahiptir. Ek olarak, uygulama alanına göre yeterli n tipi ve p tipi iletkenlik sağlanabilir. Elektriksel özellikleri karakterize etmek için Hall etkisi, Shubnikov de Haas etkisi (SdH) ve Akım Gerilim ölçümleri kullanılmıştır [3].

2.6.4. III-V azot bileşiklerinin polarizasyonu

Polarize edici etki, III-V azot yarı iletken grubu için hem temel fiziksel özelliklerin hem de saha efektörleri LED'ler gibi saha uygulamalarının belirlenmesinde son derece önemlidir. Katılar için üç polarizasyon türünün ilki; kutupsal moleküllerin elektrik alanı ile kısmi ya da tamamen düzenlenmesinin sonucudur. İkincisi; kısmen veya tamamen iyonik kristallerde elektrik alanı altındaki pozitif ve negatif iyonların nispi hareketinden kaynaklanan dipolün neden olduğu iyonik polarizasyondur. Üçüncüsü tüm dielektriklerde elektronik kutuplaşmadır. Şekil 2.7' de görüldüğü gibi, Ga polaritesi, c yönünde Ga (katyon) atomundan N (anyon) atomuna doğru olduğu kabul edilen polidyumdur. Polarizm, Ga

polaritesinin tersidir ve c yönünde ki bağların polaritesinin N atomundan Ga atomuna olduğu varsayılmaktadır [3]. III-V grubu azotlu bileşiklerin altıgen yapısı; AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler çizelge 2.3'te verilmiştir [30].



Şekil 2.7 Ga ve N polarlık

2.6.5. III-V azot bileşiklerinin termal özellikleri

Dokuma parametresindeki Kelvin başına değişim, termal genleşme olarak ifade edilir. Termal genleşme katsayısı, a örgü parametresi için $\Delta a/a$ (αa) ve c örgüsü için $\Delta c/c$ (αc) şeklinde ifade edilir. Kusurlara ve serbest taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır. Isı iletkenliği (k) kinetik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir malzeme özelliğidir ve elektronik titreşim, dönme ve serbestlik derecesine göre belirlenir.

2.6.6. III-V azot bileşiklerinin optik özellikleri

Hem iç hem de dış etkiler yarı iletkenlerin optik özelliklerini etkiler. Bir yarı iletkenin fotoluminesans olayı, üç temel işlemde oluşur. Bu süreçler;

Uyarılma: Tek kaynaklı optik uyarma kaynağı tarafından h enerjisine sahip olan uyarıcı fotonlar tarafından uyarılan malzemedeki elektronlar, değerlik bandından iletim bandına çıkar. Kaynağın enerjisi yarı iletkenin yasak band boşluğundan (E_g) daha büyükse, elektron-çiftleri oluşur [3].

Termalizasyon: İlk kez ve çok yüksek kinetik enerjiye sahip, akustik ve optik fonon difüzyonu ile 0.2-100 ps'lik küçük bir sürede hızla akıntı yapan elektron pompalama çiftleri,

band kenarı yönünde (değerlik bandının maksimum yönü), iletim bandının minimumuna doğru hareket eder ve termal dengeye ulaşır [3].

Yeniden Birleştirme: Elektron geri tepme çifti elektron değerlik bandına geri döndüğünde, fazla enerji ışınlanmış olarak yayılır.

Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için optik, elektrik, mekanik, termal ve polarizasyon parametreleri Çizelge 2.4' de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler

Parametreler	InN	GaN	AlN
Optiksel Özellikler			
Enerji bant aralığı, $E_g(\Gamma)$ (eV)	6,20	3,42	0,78
Kırılma indisi, n	2,15	2,35	2,80
Dielektrik sabitleri	$\epsilon_r=8,50$	$\epsilon_r=10,40$	$\epsilon_r=15,30$
Polarizasyon			
$E_{33}(\text{C/m}^2)$	1,46	0,73	0,97
$E_{31}(\text{C/m}^2)$	-0,60	-0,49	-0,57
ϵ_{11}	9	9,50	-
ϵ_{33}	10,70	10,40	14,60
$P_{KP}(\text{C/m}^2)$	-0,08	-0,03	-0,03
Elektriksel Özellikler			
Elektron etkin kütlesi, m^* (kg)	$0,33m_0$	$0,20 m_0$	$0,11 m_0$
Elektron Mobilitesi, $\mu(\text{cm}^2/\text{V.s})$	300	1500	100-2100
Doyum sürüklenme hızı,	$1,40 \times 10^7$	$2,50 \times 10^7$	$2,50 \times 10^7$
Mekanik Özellikler			
$C_{11}, (\text{GaP})$	345-411	296-396	190-271
$C_{12}, (\text{GaP})$	125-149	120-160	104-124
$C_{13}, (\text{GaP})$	90-127	80-158	92-121
$C_{33}, (\text{GaP})$	373-395	209-405	182-224
$C_{44}, (\text{GaP})$	96-125	81-105	10-48
Poisson oranı, ν	0,216	0,372	- -
Hacim modülü, B (GaP)	160-218	195-245	125-147
Young modülü, E (GaP)	295-374	150	- -

Çizelge 2.4. (devam) Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler

Kesme modülü,	117-154	121	43
Akma dayanımı, σ_Y (GaP)	1000 °C’de 0,3	900 °C’de 0,1-0,2	- -
Sertlik (GaP)	Nano;11,2	Mikro; 10,2 Nano; 8-20	Mikro;17,7 Nano; 18
Elektronik deformasyon potansiyel, E_{ds} (eV)	7,10	8,54	9,50
LO fonon enerjisi, $\hbar \omega_{LO}$ (meV)	73	91,20	99,20
Termal Özellikler			
Isısal genleşme (K^{-1})	$\Delta a/a=2,85 \times 10^{-6}$	$\Delta a/a=5,59 \times 10^{-6}$	$\Delta a/a=4,20 \times 10^{-6}$
	$\Delta c/c=3,75 \times 10^{-6}$	$\Delta c/c=3,17 \times 10^{-6}$	$\Delta c/c=5,30 \times 10^{-6}$
Isısal iletkenlik, (W/cmK)	0,80	2,30	3,20
Oluşum ısısı, ΔH_{298} (kcal/mol)	-4,60	-26,40	-64
Erime noktası (°C)	1100	>1700	3000

3. YÜKSEK ELEKTRON MOBİLİTELİ TRANSİSTÖRLER

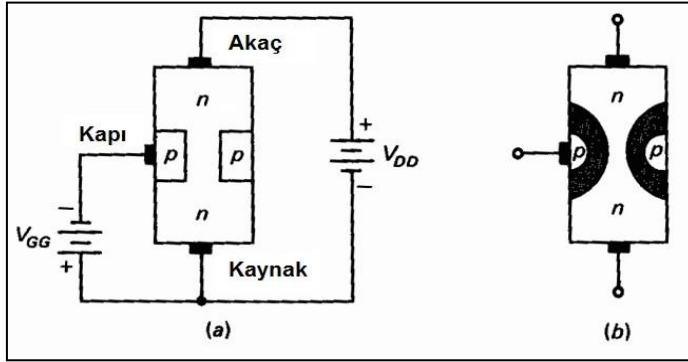
3.1. Alan Etkili Transistörler (FET)

Transistör, talebi yerine getirme yeteneğine sahiptir. Ana görev girişine uygulanan sinyali artırarak akım ve voltaj kazancı sağlamaktadır. Yönlü bir iletkenlik bölgesi ile ayrılmış iki iletken bölgesinden oluşan bir yarıiletken elektronik devre elemanıdır. Transistörler, görevlerinden bağımsız olarak, elektriksel dirençteki değişim nedeniyle çalışırlar. Transistör üretiminde genellikle germanyum ve silisyum yarı iletkenleri kullanılır. Transistörler, elektronik cihazların en önemli birimleridir. Günlük yaşamda elektronik cihazlarda kullanılan milyarlarca transistör bulunabilir. Transistörler çift polarize transistörler (BJT) ve alan etkili transistörler (FET) olarak iki gruba ayrılır. Bu iki tip transistör yapı olarak oldukça benzer olsa da, alan etkili transistörlerin bipolar transistörlere göre üstün özelliklere sahip olmalarıdır. FET'ler daha çabuk geçiş yapabilirler. Giriş empedansları daha yüksektir. Radyasyon yayınımları mevcut değildir. Termal değişikliklerden etkilenmezler. BJT' ler den daha küçüklerdir. Tetikleme için bir giriş akımına ihtiyaç duymazlar ve üretilmeleri daha kolaydır. Üstün özellikler nedeniyle, alan etkili transistör teknolojisi ile ilgili çalışmalar artmıştır. Günümüzde her iki teknoloji de halen kullanılmaktadır.

İlk FET üretimi 1960'larda yapıldı. FET'ler iletken, yarı iletken ve yalıtıcı yapılara sahiptir. FET voltaj kontrollüdür ve üç ucu vardır. FET'in uçları G (Kapı), D (Akış) ve S (Kaynak) olarak tanımlanmıştır. Bu birimlerin görevleri, en basit olarak Şekil 3.1'deki gibi açıklanabilir. Kaynak ve akaç arasındaki akım kapı terminali tarafından kontrol edilebilir.



Şekil 3.1. Alan etkili transistör yapısı gösterimi



Şekil 3.2. Alan etkili transistör devresi

Şekil 3.2, alan etkili transistörün elektronik yapısını gösterir. Kaynak, drenaj kaynağının gerilimindeki negatif kutupdaki elektronların toplamını belirtir. Drenaj (akaç), pozitif konumda olmayan elektronların yapısını veya basınç voltajının miktarını ifade eder. Su akışının kontrol kısmı, n-kanalın genişliğini kontrol eden ve böylece kaynaktan gelen yük akışını kontrol eden kapı voltajıdır. İletken ve yarı iletken arasındaki uygulanan voltajı değiştirilerek, malzemenin iletkenliği, yarı iletken bölgedeki yük taşıyıcıların yoğunluğu ve işaretleri değiştirilebilir. Alan efeği transistörü p veya n kanalı olabilir. N kanalı bir FET'de, kapı p tipi ve n tipi bir malzemedir. Kapıdan kanala bir p-n kavşağı vardır. Bu p-n bağlantısı, kapıya uygulanan gerilime zıt yönde kutuplanır ve kapıdan çok düşük bir kaçak akım vardır. Bu nedenle FET yapılarında giriş direnci çok yüksektir (1000 MΩ). Birçok FET tipi üretilebilir, ancak en yaygın kullanım alanı Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistörleri'dir (MOSFET). MOSFET' te metal terminal ve kapı terminal, elektriksel olarak yalıtkan olan bir silikon katkılı oksit tabakası (SiO₂) ile ayrılır. Dijital devrelerin kullanımında FET'lerin kullanımı daha yaygındır. Bunun nedenleri şunlardır:

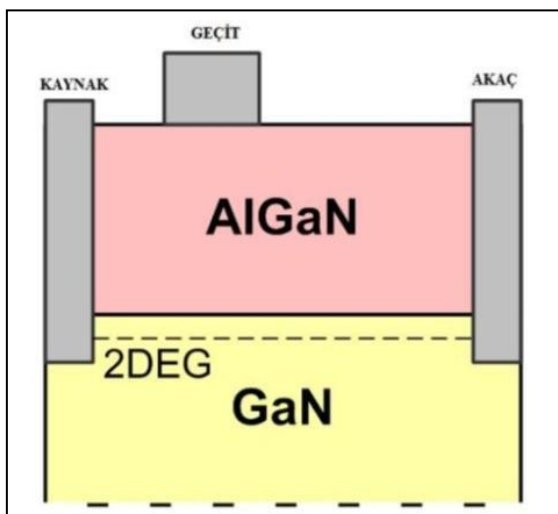
Kapı ve kaynak arasındaki voltaj eşik voltajının altında uygulandığında, akım boşaltma ile kaynak arasında durur. Böylece istenen mükemmel anahtar yapısı yaratılabilir. Kapı terminalinin, transistörün geri kalanından yalıtım malzemesi ile ayrılmasıyla, düşük frekans transistörünün giriş direnci sonsuza kadar gider.

Bir silikon malzeme üzerine birden fazla farklı işlem uygulayarak, üretim arttıkça maliyetin düşmesine izin veren çok sayıda FET üretmek mümkündür.

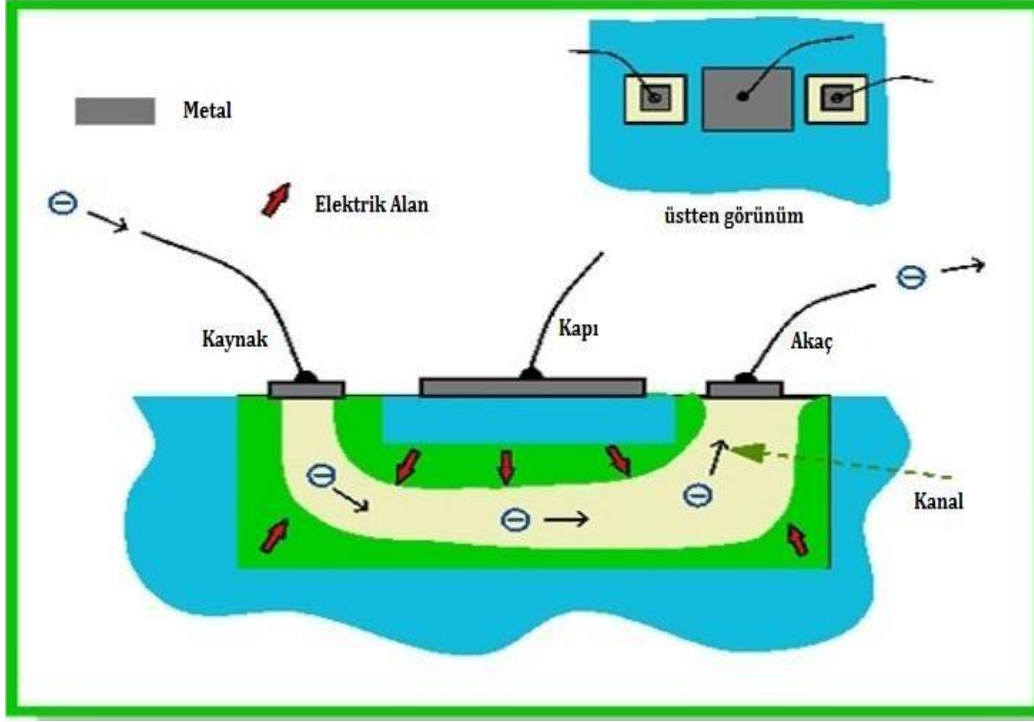
3.2.Yüksek Elektron Mobiliteli Transistörler (HEMT)

MOSFET teknolojisi uzun zamandır mikrodalga uygulamalarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek elektron taşıma özellikleri nedeniyle, HEMT yapıları yüksek güç ve frekans uygulamaları için kullanılmaktadır. Aynı zamanda heteroblock FET (HFET) olarak da bilinen yüksek elektron mobilite transistörleri (HEMT), MOSFET yapılarında kullanılan katkı bölgesi yerine bir kanalda mevcut akışı sağlamak için kullanılan farklı band genişliğine sahip iki malzeme arasında bir bağlantı içeren alan etkili transistörlerdir [36]. HEMT'ler, yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve III-Nitrürlerin oluşturduğu bileşik ile geniş bant aralığı nedeniyle çok uygun malzemelerdir.

HEMT'ler FET'e benzer şekilde çalışır. İki farklı bant yapısına sahip malzeme epitaksiyel olarak büyütülür ve bu malzemelerin arayüzünde iki boyutlu elektron gazı (2DEG) olarak adlandırılan bir bölge oluşturulur. HEMT cihazı bu bölge kontrol edilerek çalıştırılır. Omik temas olarak adlandırılan ve akış iletken yapıları arasında akan akım bir kanaldan geçer. Bu kanal, akım akışını kontrol etmek için kapıya uygulanan elektrik alanı tarafından kontrol edilir. Burada kapı Schottky bariyer temas yapısından yapılmıştır ve GaN esaslı yapılar genellikle Ni/Au kaplaması ile oluşturulmaktadır. Bir AlGa_N / GaN HEMT cihazının yapısı Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Bu yapıda HEMT'e dikey yönde bir gerilim uygulanır. Uygulanan gerilime bağlı olarak, kapı terminali kanaldan geçen akımı, yani elektron akışını kontrol eder.



Şekil 3.3. AlGa_N/GaN yapısı ve 2DEG oluşumu [31,32]

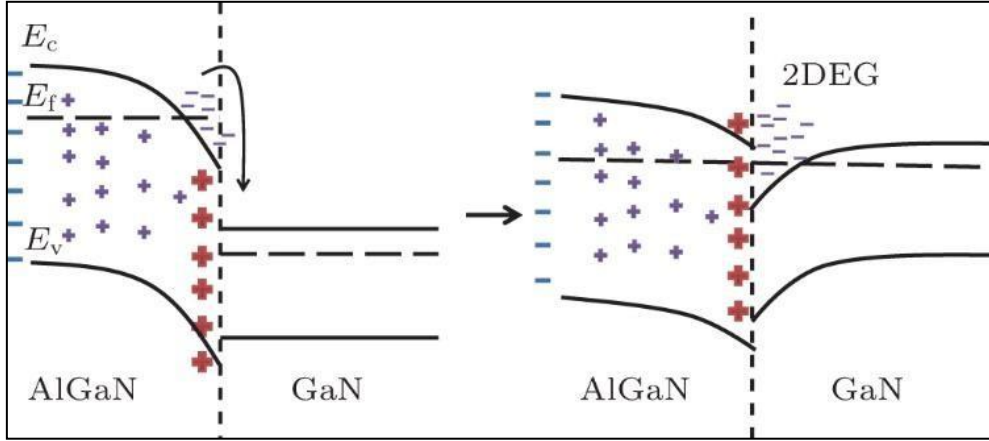


Şekil 3.4. HEMT kanal yapısı

Kanal yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. 2 boyutlu elektron gazı sayesinde, elektronların hareketi sırasında yapıyla etkileşimi önemli ölçüde azaltılacaktır. Yapı ve yapı hataları ile daha az etkileşime bağlı olarak daha az saçılma olacaktır. Böylece, elektronlar yüksek mobiliteye sahip olacaktır. HEMT yapısı iletişim, uydu ve radar uygulamalarında popüler hale gelir ve yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılabilir.

3.3. AlGaN/GaN Çoklu Kristal Yapısı

AlGaN, InAlN veya AlInN gibi malzemeler, altıgen ağ yapıları nedeniyle GaN üzerinde büyütülebilir. Hetero yapılarıdır, farklı enerji band aralıklarına sahiptirler. Bir kuantum kuyusu ve buna katkıda bulunan. 2DEG'nin oluşumu için bir enerji kesintisi gerekir. Bu malzemeler birleştirildiğinde, değişik değerlerde olan fermi enerji değerleri aynı seviyeye gelir. AlGaN ve GaN malzemelerin iletkenlik ve değer bandları, Fermi seviyeleri eşitlenene kadar bükülür. Denge durumunda, Fermi enerji seviyesinin altına düşen GaN iletkenlik bandı bölgesi elektronlarla doldurulur. Elektron birikiminin oluşturduğu elektrik alanı nedeniyle, bandlar bükülmeye başlar. Bükme sırasındaki 2DEG bölgesi, Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



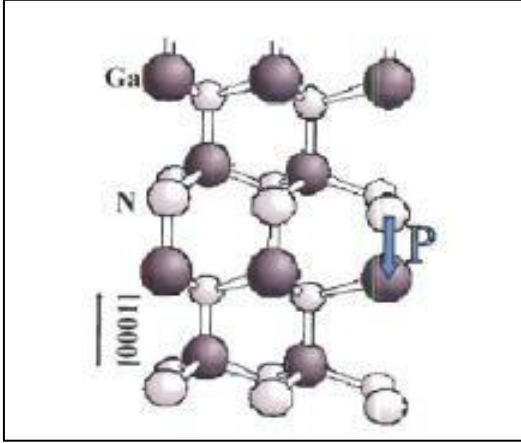
Şekil 3.5. AlGaIn/GaN bant yapısı

3.3.1. GaN temelli çoklu yapılarda kutuplanma

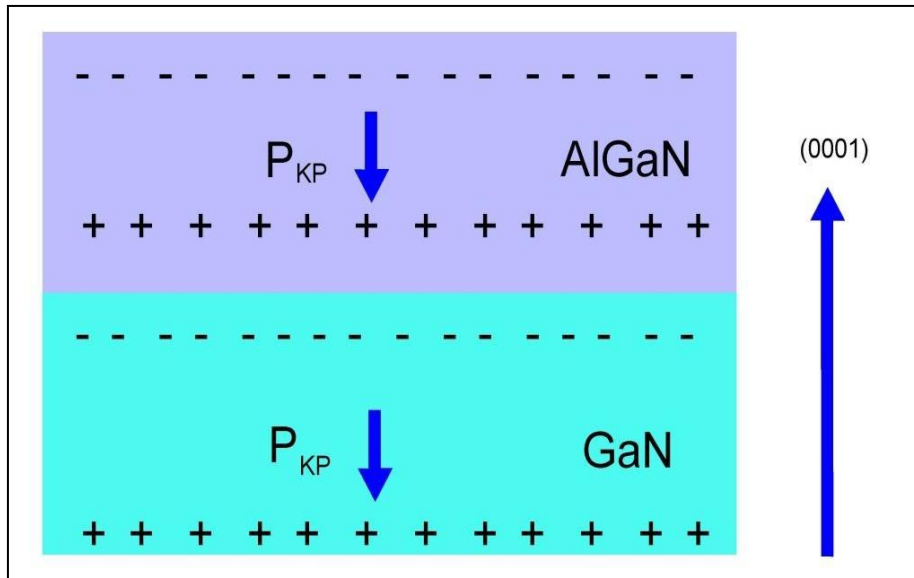
III-nitrür yarı iletkenlerinde iki tür polarizasyon vardır. Bunlar; doğal polarizasyondan (PSP) oluşan piezoelektrik polarizasyon (PPZ) ve farklı tabakalar arasındaki gerginlik farkıdır [39]. Bu polarizasyon alanları sayesinde, elektronlar AlGaIn / GaN arayüzünde herhangi bir ilaveye gerek kalmadan birikebilir. Bu alanların toplamı 2DEG üretecek kadar güçlüdür [37]. Dışarıdan elektriksel alan etkisi olmadığında, toplam polarite bu iki polarizasyonun toplamına eşittir [37]. III-Nitrürler için toplam polarizasyon formülü ile hesaplanmaktadır.

Doğal Kutuplanma

Doğal polarizasyon, kristalin iç yapısı nedeniyle oluşan bir polarizasyon şeklidir. Bu alan, altıgen yapı III-Nitrürlerin azot metal atomları arasındaki bağların tamamen kovalent bağ olmadığı ve inversiyon simetrisinin olmadığı gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Ga-N ve Al-N elementleri iyonik bağ yapmaktadır ve bunlarda güçlü dipol bulunmaktadır. N atomları güçlü elektronegatif olduklarından, elektron bulutu N atomu tarafına kayar. Kristal, asimetric elektron bulutu nedeniyle yüzde bir net negatif, diğeri ise net bir pozitif yük birikimidir. III-Nitrür grubunda kendiliğinden oluşan bu durum çok güçlü bir kutuplanma alanı yaratmaktadır. Bu alan diğeri yarı iletken malzemelerden 5 kat daha güçlüdür [39].



Şekil 3.6. Hekzagoal GaN da doğal kutuplanma vektörü [41]



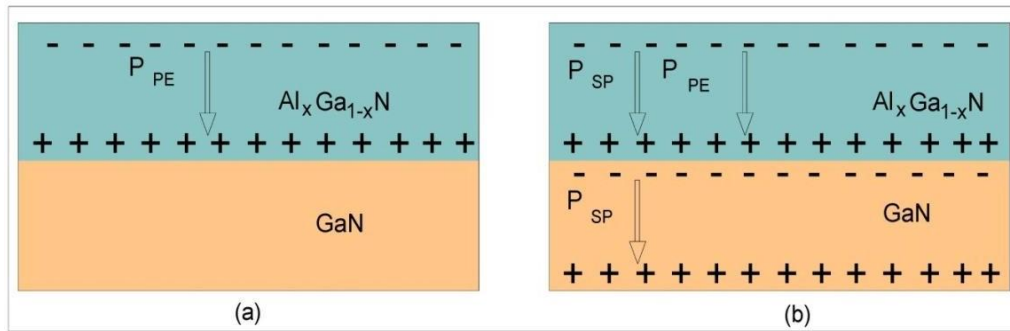
Şekil 3.7. GaN ve AlGaN için doğal kutuplanma vektörleri

Şekil 3.6, GaN'ın doğal polaritesini göstermektedir. C eksenindeki polarizasyon vektörü, N'den Ga'ya yönlendirilir. Bu, polarizasyonun ters yönünde bir elektrik alanı yaratır. Bu alana doğal kutuplaşma denir. Şekil 3.7. Ga yüzü GaN ve AlGaN epitaksiyel yapıları için doğal polarizasyon durumunu göstermektedir.

Piezoelektrik Kutuplanma

İki tabaka arasındaki gerginliklerden bahsedildi. Piezoelektrik polarizasyon; bu farklı katmanların örgü sabitleri ile ısı genleşme katsayıları arasındaki gerilim sonucunda kristal kafesin bozulmasından kaynaklanır. Bu gerilmeler iki tiptedir. Bunlar basınç ve gerilmelerdir. N-bazlı yarı iletkenler üzerindeki piezoelektrik polarizasyon alanı, bilinen

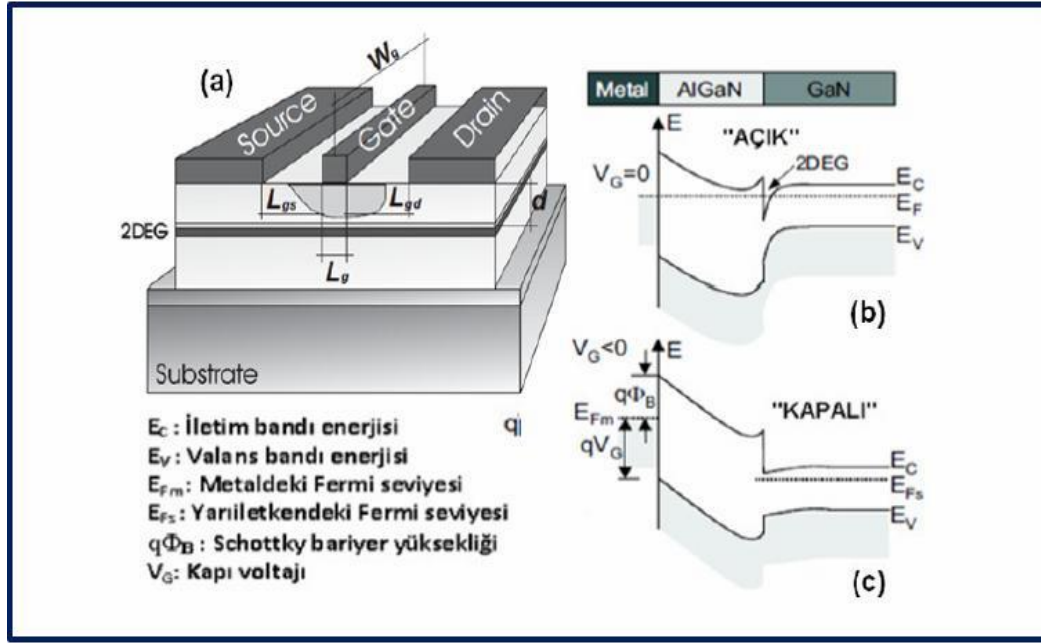
II-IV ve III-V yarı iletkenlerinden yaklaşık 10 kat daha yüksektir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ / GaN arayüzünde ki bu tip polarizasyon iki boyutlu elektron gazının kalitesini doğrudan etkiler. Bu polarizasyon sayesinde, elektron ekstra doping gerektirmeden arayüzlerde birikebilir. Bu birikim tarafından üretilen elektronlar iki boyutlu serbest harekete neden olur. Daha önce belirtildiği gibi, AlGaN katmanının ve Al molar fraksiyon polarizasyonunun kalınlığı doğrudan 2DEG'yi etkiler. Şekil 3.8 piezoelektrik polarizasyonu ve toplam polarizasyonu göstermektedir.



Şekil 3.8. Ga-yüzlü AlGaN/GaN yapıda piezoelektrik ve toplam kutuplanma

3.3.2. GaN HEMT çalışma prensibi

HEMT yapısının çalışma prensibi bu bölümde detaylı olarak açıklanacaktır. HEMT'lerdeki elektronlar, AlGaN / GaN katmanlarının ara yüzünde tek bir düzlemde hareket edecek şekilde sınırlandırılmıştır. Bu yapıda, 2DEG olarak adlandırılan bu elektronlar HEMT yüzeyinden kapı voltajını değiştirerek kontrol edilir. Kapı voltajını değiştirerek, elektronlar kaynak ile akım veya elektron transmisyonu arasında akar. Şekil 3.9' da ki AlGaN/GaN HEMT yapı ve kapı gerginliğine bağlı olarak enerji bandı yapısının farklılaşmasını göstermektedir.



Şekil 3.9. AlGaN/GaN HEMT (a) Şematik çizimi (b) Termal denge halinde sıfır kapı voltajı band yapısı (c) Negatif kapı voltaj halinde band yapısı[42]

Akım ve drenaj arasındaki potansiyel fark, akım pozitif voltaj altında tutulduğunda azaltılacağından, elektronlar bir akım üretmek için 2DEG düzleminde etki eder. Bu akımın miktarı kapı voltajı (V_g) tarafından kontrol edilir. Bu voltaj negatif yönde artırılırsa, kapı alanının altındaki bu yükler 2DEG düzleminde dağıtılır. Gerilimin değeri arttığında, yükler bütün yüzeye yayılır. Bu da 2DEG yoğunluğunda bir azalmaya ve önemsiz bir değere neden olur. Bu durumu oluşturan en az geçit voltajı değerine eşik voltajı (V_{th}) denir. Elektron akışı, kapı voltajı bu eşik voltajının üzerine çıktığında başlar. Voltaj Drenaj değeri arttığında, akım belirli bir noktaya kadar doğrusal olarak artar, kaynak ile akım arasındaki bu akış doygunluğa ulaşır. Bu noktada maksimum akım değerine I_{DSS} denir. Doygunluk akımı 2DEG yoğunluğuna bağlıdır. Yoğunluk arttıkça doyma artar [43].

HEMT cihazlarının performansındaki en önemli parametrelerden ikisi kapı genişliği (W_g) ve kapı uzunluğudur (L_g). Özellikle, L_g değeri, cihazın çalışma özelliklerini ve sınırlarını belirlemede doğrudan kullanılan parametredir. L_g küçükse, cihaz daha yüksek frekansa bağlanır ve güç artar. W_g , akış akımıyla orantılıdır. HEMT cihazı tanımlanırken yukarıda belirtilen tüm parametreler kullanılır. Bu parametreler:

- $f_{\max}$: maksimum salınım frekans değeri ya da güç kesilim frekansı
- $P_{\max}$: maksimum güç değeri
- I_{DS} : akaç-kaynak akımı
- I_{DSS} : akaç-kaynak doyum akımı
- g_m : geçici iletkenliği
- f_r : akım kazancı kesilim frekansı
- ϵ_0 : boşluk dielektrik sabiti
- ϵ_s : yarıiletken dielektrik sabiti
- d_{AlGaN} : AlGaN tabaka kalınlığı

Bu denklem kapı kapasitansı için yazılabilir:

$$C_g = \epsilon_s \epsilon_0 \frac{L_g W_g}{d_{AlGaN}} \quad (3.1)$$

I_{ds} için ise,

$$I_{ds} \cong \frac{1}{L_g} C_g \vartheta_d (V_g - V_{BI}) \quad (3.2)$$

Bu denklemde, doymuş elektronun sürüklenme hızı iç kapı voltaj değeri ve V_g kapı dış voltajı sıfır olduğunda, o sırada ölçülen V_g kapı voltajıdır.

Geçici iletkenlik (g_m), voltaj sabit iken kapı voltajındaki değişime bağlı olarak I_{DSS} değerini belirler. G_m aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$g_m \approx \frac{1}{L_g} C_g \vartheta_d \quad (3.3)$$

Elektronun kapı kontağı (τ) altındaki kanal teması boyunca geçiş süresi ve kapı kapasitansı ve geçici iletkenlik (g_m) ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_d}{2\pi L_g} = \frac{g_m}{2\pi C_g} \quad (3.4)$$

RIN ve RL, aşağıdaki formülde, cihazın girişindeki ve çıkışındaki yük direnci açısından f_{max}'ta bulunur:

$$f_{max} = \frac{f_T}{2} \chi \sqrt{\left(\frac{R_L}{4R_{IN}}\right)} \quad (3.5)$$

Maksimum güç P_{max}, aşağıdaki denklemde verilir:

$$P_{max} = \frac{I_{DSS}(V_{br} - V_{knee})}{8} V \quad (3.6)$$

Burada V_{knee}, cihazın doygunluğa ulaştığı minimum voltaj değeridir. Yukarıda ki formülde gösterildiği gibi, bir HEMT cihazının çıkış gücü değeri, kırılma gerilimi (V_{br}) ve doyma akımı (I_{DSS}) ile orantılıdır. Bu değerler arttıkça, cihazın güç performansı artar.

Gelişmiş epitaksiyel tekniklerle yüksek kaliteli yarı iletken yapılar üretilebilir. Bu, yüksek performanslı HEMT cihazların üretilmesini mümkün kılar. Özellikle savunma sanayinde, MOSFET yapılarının yerine radar ve uydu sistemlerindeki HEMT cihazları atanmıştır.

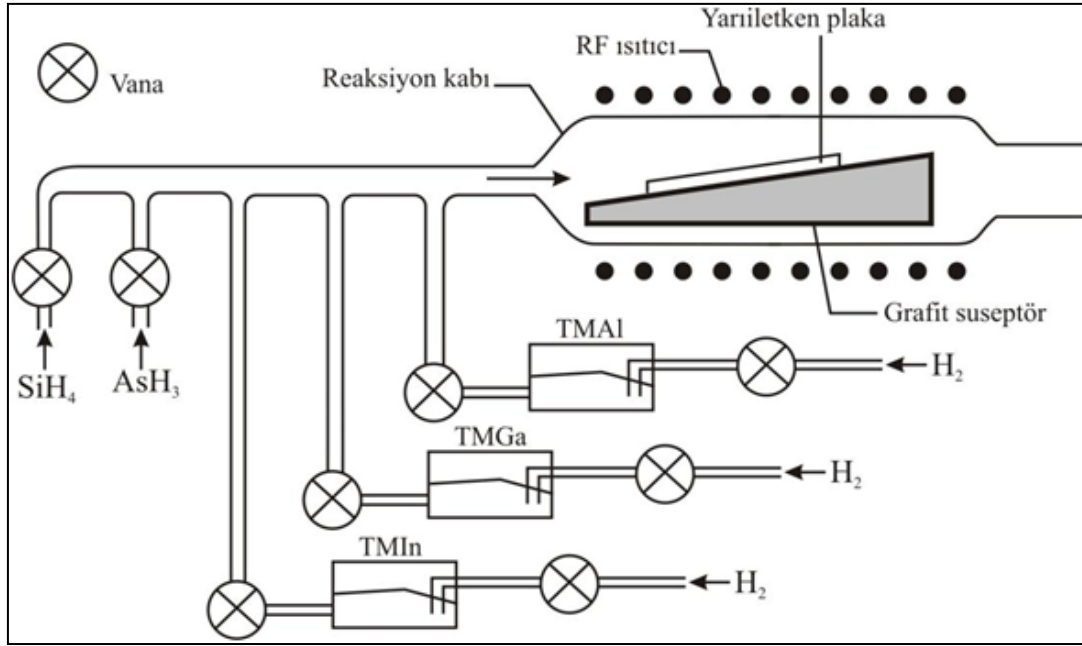
4. DENEYSEL YÖNTEM VE ANALİZ SİSTEMLERİ

Optoelektronik yapılar genellikle Kimyasal Buhar Biriktirme, Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) veya Moleküler Demeti Epitaksi (MBE) gibi çeşitli sistemlerde üretilir. Optoelektronik cihazlar için uygun olan yarı iletken kristallerin özellikleri incelenerek belirlenir. Ek olarak, karakterizasyon tespiti, çalışabileceği koşullara, avantajlarına ve dezavantajlarına ışık tutacağından büyük Ar-Ge yatırımları için gerekli bir test sırasındır. Bu kısımda MOCVD büyütme sistemi ve analiz için karakterizasyon metodları; HR-XRD, AFM, PL, FTIR, I-V hakkında bilgi verildi.

4.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi Yöntemi (MOCVD)

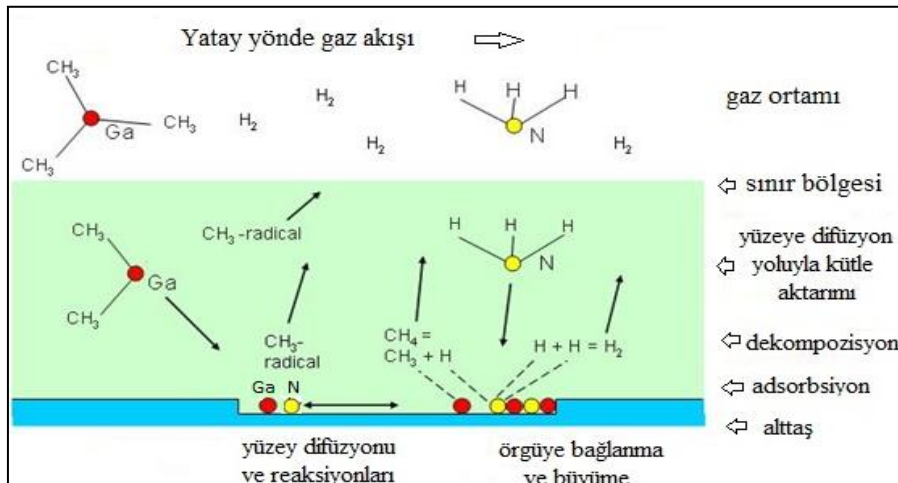
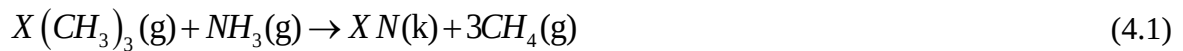
MOCVD metodu başlangıçta Maruska ve Tietjen tarafından GaN büyütme reaktörü olarak tasarlandı. Günümüzde ise çeşitli reaktör geometrilerinde yüksek kaliteli III-Azot yapılarının büyütülmesinde çokça faydalanılmaktadır. Bu sistem azot bazlı geniş bant aralıklı yarı iletken malzemelerini bazı yüzeyler de ince atomik katmanlara genişletmek için kullanılır. MOCVD sisteminde, çok katmanlı yapılar ayrıca üst üste ince katmanlar halinde genişletilir. Bu şekilde, çok özel optik ve elektriksel özelliklere sahip malzemeler, çok hassas bir şekilde kontrol edilen katmanlar tarafından oluşturulan yapılardan elde edilebilir.

MOCVD sisteminde, ısıtılmış grafit tutucu yüzeyine seçilen bir alttaş yerleştirilir. Gaz halinde kaynak malzemeleri bu katman üzerinden N_2 ve H_2 taşıyıcı gazlarla birlikte geçirilir ve kimyasal bir reaksiyon oluşturmak için istenen katman atomik birikim formunda meydana getirilir [44]. III-V grubunun kullanılması çok yaygındır, çünkü malzemelerin hızlı ve hassas büyümesini sağlar. Optoelektronik cihazların tutarlılığı ve yüksek büyütmesi nedeniyle, grup III-azot bazlı malzemelerin MOCVD tekniği ile büyütülmesi tercih sebebidir [45]. Şekil 4.1, MOCVD kullanım kılavuzlarından temin edilebilen III-nitrojen grubu MOCVD tekniğinin şematik bir gösterimidir.



Şekil 4.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi

Trimetil-Galyum (TMGa), Trimetil-Alüminyum (TMAI), Trimetil-İndiyum (TMIIn) gibi gaz kaynakları sıcak yüzey yüzeyinde amonyakla (NH_3) reaksiyona girer. Sıcak ortamda, organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılır (piroliz) Böylece istenen materyal atomik birikimle alttaş üzerinde kristalize olur. Herhangi bir tabaka için formülasyon Denklem 4.1'de verilmiştir. İnce filmin büyümesi sırasında meydana gelen fiziksel olaylar Şekil 4.2'de gösterilmiştir [46].



Şekil 4.2. İnce film büyütme sırasındaki temel fiziksel olaylar



Resim 4.1.MOCVD cihazının görünümü

4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınım Tekniği (HRXRD)

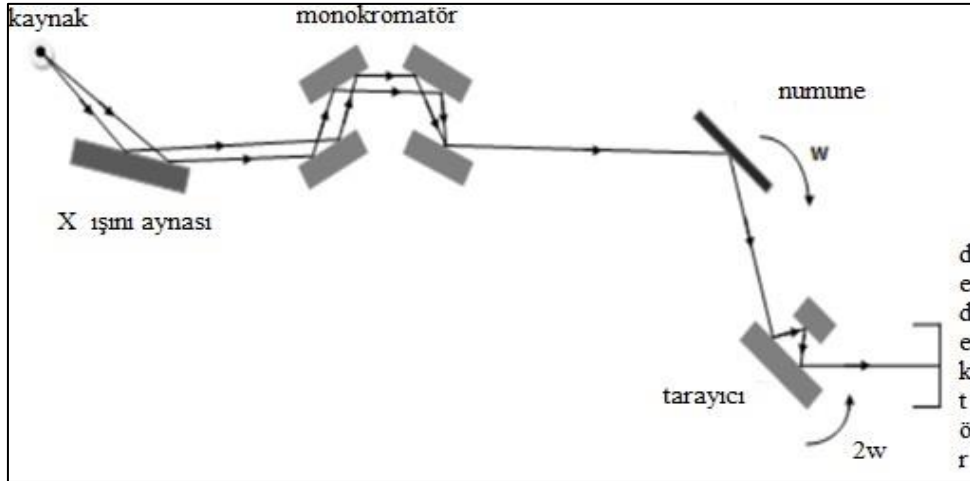
İlk olarak 1895'te Alman fizikçi Röntgen tarafından keşfedilen X-Işınları; atomların iç yörüngelerinde elektronların doğal yolla kapalı tüp içindeki katottan salınan elektronlar anodik (örneğin bakır) metal tarafından hızlandırılır ve bombalanır. Yüksek enerjili elektronların hedef metalde yüksek hızlanma ile yavaşlamaları gerektiğinden, enerjilerini fotonlar vererek yayarlar. Bu olay fotonlardan zincirleme olarak X-Işınları üretilmesine devam eder. Karakteristik olanlar üretilen X ışınlarından seçilir. Bu özellik, X-Ray kullanarak HRXRD tekniği ile çoklu alaşımların ayrıntılı analizleri yapılırken faydalanılır.

X ışını toz kırınımı, rastgele düzenlenmiş toz örneklerinden saçılan monokromatik X ışınının kırınım açısını ve yoğunluğunu ölçerek malzemenin kristal yapısını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir [48,49]. İlk defa, kristal yapı ve içindeki atomların düzenlenmesi, X-ışını difraksiyon modeli kullanılarak Max Van Laue tarafından incelenmiştir. Bir malzemenin atomik yapısını görüntülemek için yüksek çözünürlüklü elektron mikroskopları kullanılmalıdır [50]. X ışını kırınım işlemi boyunca, kristal içindeki atomların elektronları gelen X ışını ile titre ve X ışını esnek saçılma yapar. Elde edilen kırınım deseni, her kristal türüne özgüdür. Örneğin; Grafüt ve elmas karbon atomlarından oluşsa da, kırınım desenleri birbirinden farklıdır. X-ışını toz kırınım modeli, malzemenin kristal sistemi, uzay grubu simetrisi, birim hücre parametreleri hakkında bilgi içerir ve X-ışını toz kırınımı kantitatif ve

kalitatif faz analizi ile yapılabilir. Çok fazla kullanılan X-ışını toz kırınımı, sıcaklık ve basınç gibi fiziksel parametrelerden dolayı faz değişikliklerinin, ağ sabitlerinin ve parçacık boyutunun belirlenmesinde çok önemli bir yöntemdir. Ek olarak, X-ışını kırınım teknikleri yıkıcı değildir ve incelenen numuneyi değiştirmez [51].

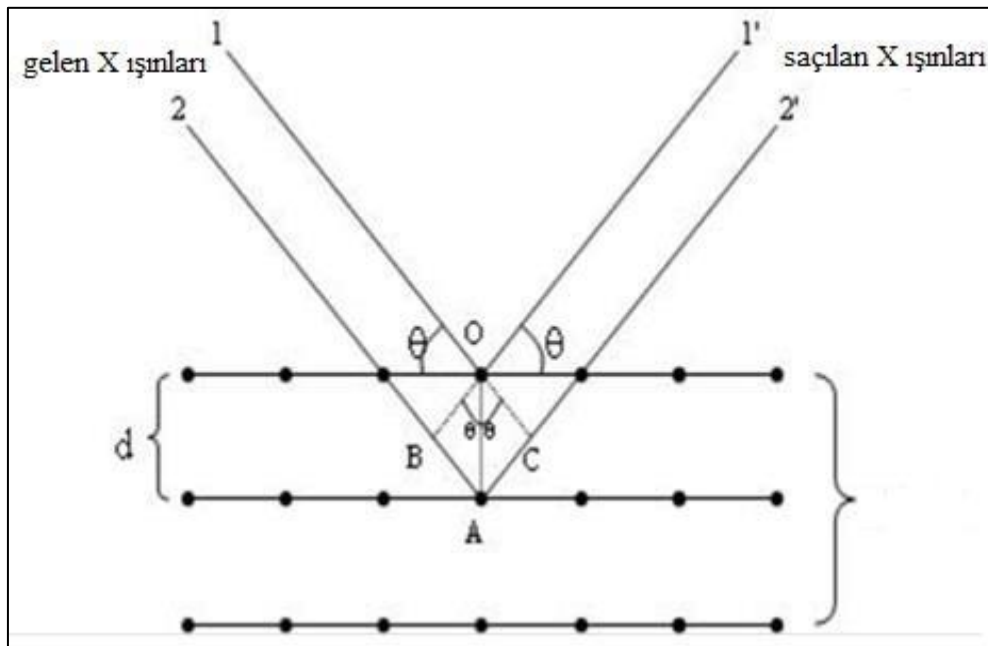
4.3 Yüksek Çözünürlüklü X-İşını Kırınımı

X ışınları, malzemelerin (ince film, toz, polimer vb.) yapısal analizine ve karakterizasyonuna izin veren bir yöntemdir. İnce filmlerin ve katmanlı yapıların yapı karakterizasyonunu belirlemek için yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı kullanılmış. HRXRD'de kullanılan dört kristal monokromatör yardımıyla, karakteristik X-ışınları spektrumundaki $K_{\alpha 1}$ ışınımını $K_{\alpha 2}$ ve $K_{\beta x}$ ışınlımlarından ayırır. Bu nedenle, çok katmanlı yapılarda, $K_{\alpha 1}$ radyasyonunun kırınımı, epitaksiyel tabakaların yoğunluk farkına göre yayılmaktadır. Klasik X-ışını toz difraktometrisinde, $K_{\alpha 1}$ ve $K_{\alpha 2}$ radyasyonları toz kristalleri tarafından yayılırken, yüksek çözünürlüklü X-ışını difraksiyonu $K_{\alpha 1}$ radyasyonunu yayar. Bu iki ışınlama arasındaki yoğunluk farkı nedeniyle, örnek yapısını belirlemek için $K_{\alpha 1}$ ışınlımı yeterlidir. İnce film örneklerini karakterize etmek için kullanılan HR-XRD yöntemi, birim hücrenin simetrisini, şeklini ve boyutunu belirler. Ayrıca, çok katmanlı yapıların ölçümünde oluşan ana kırınım zirvesi uydu tepeleri üreteceğinden, burada elde edilen bilgiler kristal katman kalınlığı, örgü kusurları ve örgü farklılıkları, numunenin kimyasal bileşenleri hakkında bilgi verir. Bir kristal üzerinden gönderilen X-ışınları, kristal içindeki atomlar tarafından yayılır. Saçılmış ışınların yapıcı girişim yoluyla kırınım modeli, bragg kanununa uygundur [52]. Şekil 4.2'de XRD cihazının çalışma prensibi şematik halde gösterilmiştir.



Şekil 4.3.Yüksek çözünürlüklü XRD cihazının şematik gösterimi

X-ışınlarının kristal ağdan saçılması Bragg yasası olarak adlandırılır [53]. Olay ışınının geliş açısı, yansıma açısına eşit olmalıdır. Farklı atomik düzlemlerden yayılan ışınların, yapıcı bir girişim oluşturarak birbirlerini güçlendirmesi için, farklı düzlemlerden yayılan ışınlar arasındaki fark, kullanılan ışının dalga boyunun tam uzunluklarına eşit olmalıdır. Bragg yasası, kristal yapı hakkında kristalle ilgili X-ışını dalga boyunun veya kristal yapı biliniyorsa belirlenmesine izin verir. Şekil 4.3, X-ışınlarının Bragg yasasını yansıttığını göstermektedir.



Şekil 4.4.Bragg yasası

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

n: Dalgaboyu sayısı (n=1, 2, 3, ...)

d: Düzlemler arası mesafe

θ : Gelen X-ışını ile kristal düzlemi arasındaki açı

λ : Dalgaboyu

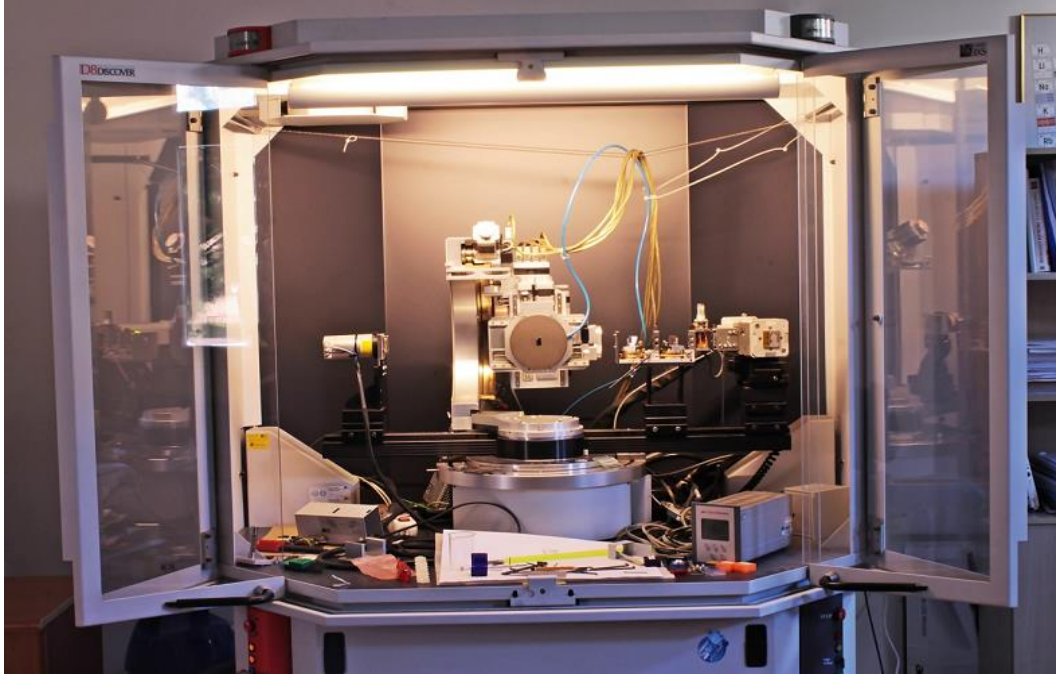
Kübik kristallerde düzlemler arası uzaklık (d) değeri Miller indisleriyle (hkl) belirtilebilir [54].

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (4.2)$$

Hekzagonal kristal yapıda düzlemler arası uzaklık denklem 4.2 ile gösterilir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.3)$$

Bragg yasası, kristal ağın periyodik yapılanması sonucunda oluşturulmuştur. Bu yasa, örgü noktaları göz önüne alındığında örgü noktalarına karşılık gelen atom sırasını dikkate almaz. Bu düzen sadece yansımanın kuvvetine bağımlı etki gösterir.



Resim 4.2. Bruker D8 Discover HR-XRD cihazının genel görünümü

Numunelerimiz Bruker D8 Discover XRD cihazı ile ölçülmüş olup, dalga boyu $1,54056 \text{ \AA}$ olan X-ışını ile gerçekleştirildi. Cihazın özellikleri Cu kaynak, 4-kristalli Ge (022) yönelimli monokromatör ve çözünürlüğü (022) yönelimli Si alttaş için $0,00435^\circ$ olarak ayar yapıldı. İlk olarak $\theta-2\theta$ taraması ile örneklerin hedeflenen yapıları doğrulandı. Sonrasında simetrik $\omega-2\theta$ taraması ile malzemelerin kristal kalitesi değerlendirildi. Burada örnek, ölçüm için tutucuya yerleştirilir. X-ışını demeti, yükseklik ayarı ve θ eksenlerinde ayarlamalar yapılarak örnek yüzeyine paralel hale getirilir. Sonra simetrik ya da asimetrik düzlem χ , θ , 2θ ve φ (ϕ) eksenler düzenlenir. Kaynaktan gelen X-ışınları demeti göebel ve monokromatör yardımıyla ayrıştırılmış olur. $\omega-2\theta$ ve $\theta-2\theta$ taramaları yapıldıktan sonra düzlemlerden gelen girişim modellerini sodyum iyot (NaI) dedektörü topladı. Oluşan piklerin zaman aralıkları epitaksiyel tabaka kalınlıklarını gösterir. Genlikleri ise yoğunluk farkı ve pürüzlülüğünü gösterir. Bu sayede, epitaksiyel tabakaların kristal kalitesi, alaşım bileşimi, tabakalardaki arayüzey pürüzlülüğü gibi yapısal özellikler hakkında bilgi alınabilir [55]. Kristalize edilmiş bir örnek; her zaman, saf, alaşımlı veya bileşik [48] olsun, karakteristik bir kırınım modeli oluşturur [56].

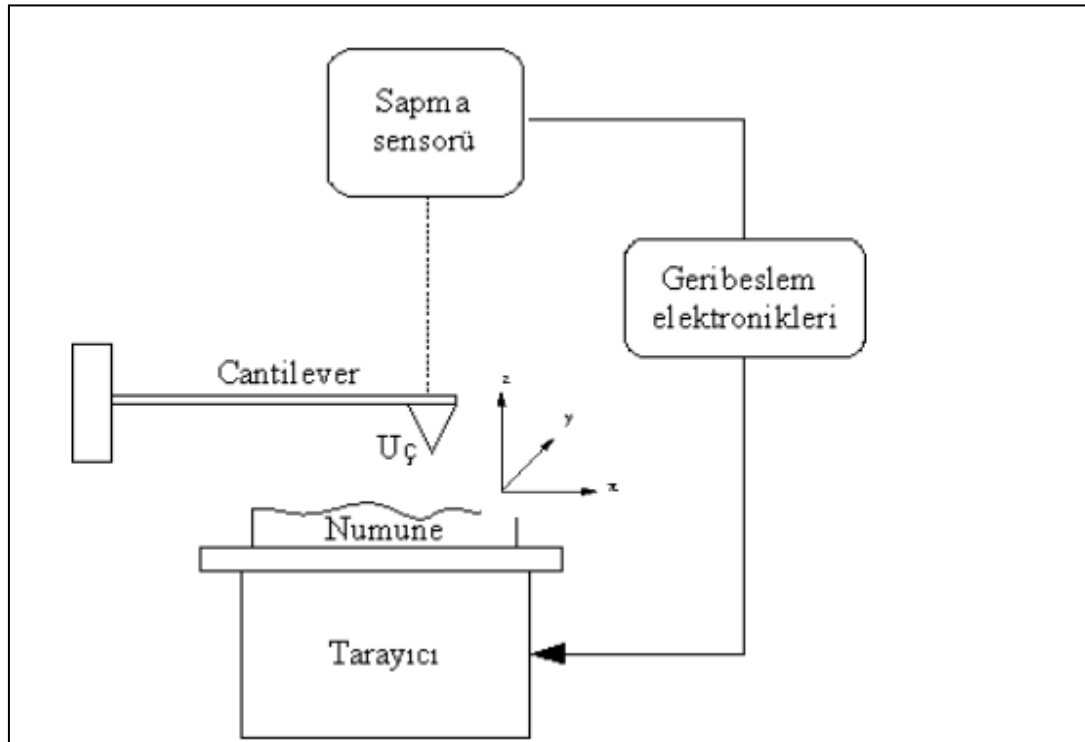
X-Işınları difraktometresinin genel özellikleri;

1- Jeneratör gerilimi 40 kV

- 2- Jeneratör akımı 40 mA
- 3- Monokromatör tipi Jhannson
- 4- Monokromatör malzemesi Ge (022)
- 5- $K\alpha 1$ dalga boyu 1,54060 Å
- 6- Difrakrometre çemberi bruker D8 şeklindedir

4.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

AFM analiz sistemleri ile, kristal yüzeylerin pürüzlülüğünün yanı sıra, yüzeyde oluşan moleküler yapıların ve bunların büyüklüklerinin, şekillerinin ve birbirleriyle etkileşimleri anlaşılabilir. AFM ile nano boyutlu (10^{-9} m) görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme yapılabilir. Ek olarak, AFM kullanılarak, numuneyi oluşturan moleküllerin ve elementlerin bileşimi, bunların nispi miktarları ve erime noktaları ve sertlik gibi maddelerin bazı fiziksel özellikleri hakkında bilgi alınabilir. Ek olarak, atom içindeki elektriksel özellikleri hakkında, madde içindeki düzenlemeleri, bu sekanslar arasındaki ilişkiler ve bileşenlerin iletkenliği gibi bilgileri de sağlayan AFM görüntüleri elde edilebilir [57].



Şekil 4.5. AFM'nin çalışma prensibi

AFM ölçümleri, Yüksek Performanslı AFM / MFM (hpAFM) sistemi kullanılarak yapıldı. Resim 4.3'te gösterilmiştir. Performansı ve işlevselliği ile dünyanın en gelişmiş AFM'lerinden biri olan Yüksek Performanslı hp AFM, otomatik lazer odaklama sistemine, 10 MP video kameraya, kapalı döngü esnek tarayıcıya ve çeşitli sistemlere ve özel modlara sahiptir. Bunun yanı sıra, RF modülasyonlu düşük gürültülü lazer ile gürültü seviyesi $25\text{fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 'e düşürülür ve 0.01 nm 'lik bir çözünürlük elde edilir. Kontrol ünitesi bilgisayara bağlıken, görüntüler ekranda görüntülenir ve uygun programlarla kaydedilir. Başka AFM sistemleri, Yüksek Vakumlu (UHV) ortamlarda çalışmaktadır ve hpAFM'nin bir atmosferde çalışabilmesi, kayda değer bir yarar sağlar.



Resim 4.3. Yüksek Performanslı AFM / MFM

Analiz, tek atomik boyutlarda konsol (cantilever) ile sağlanır ve bu sivri uç nanometre ölçeğinde bir eğrilik yarıçapına eşittir. Konsol çoğunlukla silikon veya silikon nitrürdür. Uç numune yüzeyine yaklaştığında, uç ile yüzey arasındaki kuvvetler Hooke kanununa göre bükülmesine sebep olur. Bu değişim değerleri, yüzeyin bir tür topolojik haritasını şekillendirir.

AFM analizi yaparken, uç sabit bir yükseklikte tarama yaparsa, yüzeye çarpabilir ve bunun sonucunda uç veya numuneye zarar verebilir. Bu amaçla, uç ile yüzey arasındaki kuvveti korumak ve mesafeyi ayarlamak için bir sistem kullanılır. Örnek, “z” yönünde hareket edip yüksekliği ayarlayan, “x” ve “y” istikametinde hareket gösterip taramayı gerçekleştiren bir dizi piezoelektrik düzenek yardımıyla taranır.

Bazı mekanizmalarda, tarama ucu dikey piezo tarayıcıya monte edilirken, incelenen numune diğer piezo grup kullanılarak x ve y doğrultusunda taranır. Açığa çıkan $z=f(x,y)$ haritası yüzeyin şeklini gösterir.

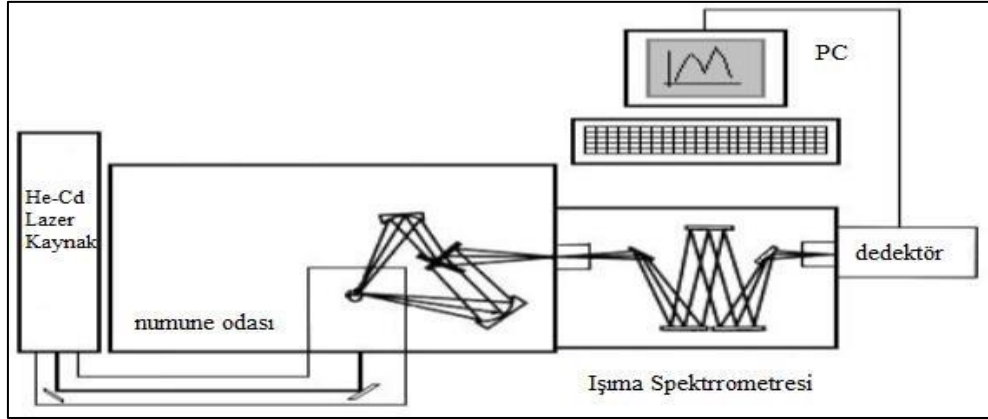
AFM, uygulamadan bağımsız olmamak kaydıyla farklı modlar da kullanılabilir. Bu ekran modları statik (temas) veya temas dinamiği (temassız) olabilir.

Dinamik modda; konsol (cantilever) akustik veya manyetik yöntemlerle titretilir. Statik mod; örneğe dokunarak ölçüm yapıldığında kullanılır. Temas etkisi sayesinde yüksek çözünürlüklü ve atomik düzeyde görüntüler oluşturulur [58].

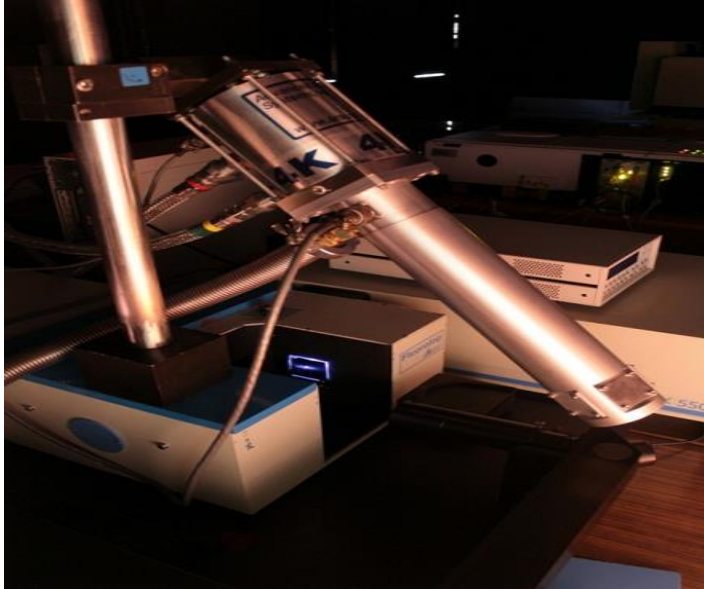
Ayrıca iki mod daha bulunmaktadır. Bu iki mod; sabit yükseklik ve sabit kuvvet modudur. Sabit yükseklik modunda, tarama sırasında konsol (cantilever) ile yüzey arası uzaklık sabit tutulur ve kuvvetteki değişim değerlerinden faydalanılır. Sabit kuvvet modunda ise, taranırken konsol (cantilever) ve yüzey arasında kuvvet sabit tutulacağından uzaklık miktarı farklılaşır, bu uzaklık değişim değerlerinden faydalanılarak topografya oluşturulur.

4.5. Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi, yarı iletken malzemelerin elektronik yapılarını ve optik özelliklerine zarar vermeden incelemek için kullanılan bir araçtır. PL optik uyarılmaya maruz kalan bir materyalin ışınım yapma halidir. PL sistemini şu şekilde açıklayabiliriz; Işık, numune tarafından soğurulan (fotouyarılma) numunenin üzerine yayılır. Böylece elektronlar, yukarı çıkarak izin verilen uyarma seviyelerine atlar. Elektronlar, bu radyasyonun enerjisi olan dengeye geri dönmek için bu fazla enerjiyi yeniden yayar. Denge durumu ve uyarılmış hal arasındaki enerji farkına denktir. Serbest bırakılan ışığa odaklanır, bir spektrometre ve foton detektörü ile toplanır. Toplanan radyasyon tarafından ifade edilen optik sinyal elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu sinyal, malzemenin fotolüminesans ışımaya karşılık gelen şiddet dalga boyu veya şiddet-enerji grafiği çizilir sonuçta ışık ışınım spektrumu oluşturulur. Elde edilen spektrumun analizi ile malzemenin kalitesi, kirlilik oranı ve katkı maddesi miktarı, yasaklanmış enerji bandı boşluğu ve ara yüzey pürüzlülük miktarı elde edilebilir [2,59].



Şekil 4.6. Fotolüminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematize edilmiş hali



Resim 4.4 Fotolüminesans sistemin genel görünümü

Yasak enerji aralığı: Yarıiletkenlerde bulunan en sık karşılaşılan ışımalı geçiş, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit olan iletkenlik ve valans bantları arasındaki geçişlerdir.

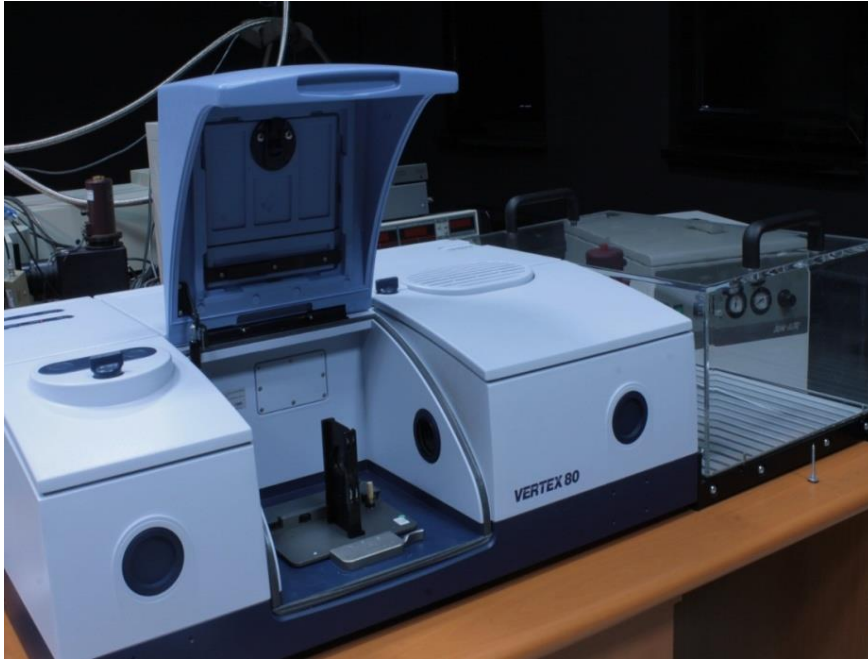
Kirlilik (safsızlık) seviyeleri ve kusurların belirlenmesi: Yarıiletkenlerdeki ışımalı geçişler lokalize hata seviyelerini kapsar. Bu seviyelere denk PL enerjisi, belli hataları tespit etmek için faydalanılır.

Yeniden birleşme (Rekombinasyon) mekanizmaları: Bir p-n eklemdeki tüketim aralığında, elektronlar denge haline geldiklerinde, hem ışımalı hem de ışımasız geçişler oluşturabilirler. PL tepe noktalarının şiddet seviyesi ve foto-uyarılma düzeyine ve de sıcaklık seviyesine bağlılığı, baskın rekombinasyon süreciyle doğru orantılıdır.

Malzeme kalitesi: Bir PL spektrumunun şiddet seviyesi ve çizgi genişliği (FWHM) malzemenin kalitesini belirtir. Bunun yanı sıra hatalarla alakalı tepe noktalarının var oluşları epitaksiyel tabakadaki hataların olduğunun kanıtıdır.

4.6. Fourier Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Titreşim spektroskopisi, spektrumun kızılötesi bölgesinde üretilen moleküler titreşim nedeniyle ışığın soğurulması (kızılötesi) veya saçılımını (Raman) incelemektedir. IR spektroskopisinde, kızılötesi bölgedeki tüm frekansları içeren elektromanyetik radyasyon incelenecek numuneye gönderilir ve molekül yapısına ve radyasyonun frekansı ile bağlantılı olarak soğurulan ışık incelenir. Soğurulan ışının frekansı iki titreşimsel enerji düzeyindeki enerji farkları ile tespit edilir.



Resim 4.5. Bruker Vertex 80 spektrometresi

5. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇ

Günümüzde, III-nitrür yarı iletkenler, HEMT Uygulamaları için kullanılmasında daha fazla çaba sarfettiler[60-67]. Yüksek sıcaklık, yüksek frekans, yüksek güç ve akışkan izleme uygulamaları için yoğun olarak çalışılan Al / GNN / GaN HEMT cihazları HEMT araçlarının performansı, III-N heteroyapı ve yapısal kalitenin katman tasarımı ile yakından ilgilidir. Tampon ve sonraki katmanlar, cihazların performansını artırmak için güçlü bir etkiye sahiptir. GaN ve AlGa_N filmlerin bir AlN tampon tabakası veya çok tamponlu tabakalar üzerinde büyümesi ilgi çekici olmuştur [72-77]. AlN tampon tabakası cihazın performansı için kritik bir öneme sahiptir. Hetero yapıların etkileri mozaik model yardımıyla analiz edilmiştir.

Bu çalışmada, bir HT AlN (yüksek sıcaklık AlN) tampon kalınlığının AlGa_N / GaN HEMT'lerinin kristal kalitesi, dislokasyon ve yüzey morfolojisi üzerindeki c düzlem safir alttaş üzerindeki etkileri bildirilmiştir. Ayrıca HEMT yapılarında GaN, AlGa_N ve AlN epitaksiyel katmanlarının gerilme durumu da değerlendirilmiştir.

5.1. HEMT Uygulamaları İçin AlGa_N / AlN / GaN Heteroyapılarının Analizi

520-nm (örnek A) ve 260-nm-kalınlığında (örnek B) AlN tamponlu iki AlGa_N / AlN / GaN heteroyapısı MOCVD'ye göre safir alttaş üzerinde üretildi. Numuneler Şekil 5.1'de şematik olarak gösterilmektedir. Yüzey kirlenmesini ortadan kaldırmak için, Al₂O₃ alttaşları 1090 ° C'de 10 dakika boyunca H₂ gazı altında temizlendi. Büyüme, AlN çekirdeklenme katmanının birikmesi ile başlatıldı. Bu katman, 15 nm kalınlığında, 50 mbar'da ve 840 ° C'de saklandı. Son aşamada, AlN tampon katmanı büyümesi, 35 mbar'lık bir basınç altında gerçekleştirilir. Numune A ve B için, farklı kalınlıklarda AlN tabakası 1050 ° C'de tutuldu. AlN büyümesinden sonra, 1070 ° C'de 1500 nm kalınlığında büyütülmüş beş tekrar GaN tampon tabakası büyütüldü. GaN büyümesinden sonra, InGa_N katmanı, GaN katmanı, AlN katmanı, AlGa_N katmanı GaN kap katmanının kalınlıkları sırasıyla 1 nm, 5 nm, 2 nm, 25 nm, 3 nm olarak hazırlandı. AlN tampon tabakası dışında, büyüme koşulları, iki numunenin bu tabakaların her birinde sabit olarak tutuldu. Bir Bruker D8 sistemi kullanılarak yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (XRD) tekniğinin kullanılması ve CuK α 1 ile, örneklerin yapısal özellikleri araştırıldı.

GaN tepe katman~3 nm
AlGaN ~ 25 nm
AlN ara katman~1-2 nm
GaN katman~5 nm
InGaN katman~1 nm
GaN tampon katman (1500 nm)
HT AlN tampon katman (520 nm for Sample A) (260 nm for Sample B)
AlN NL (10-15 nm)
Alttaş-Al ₂ O ₃

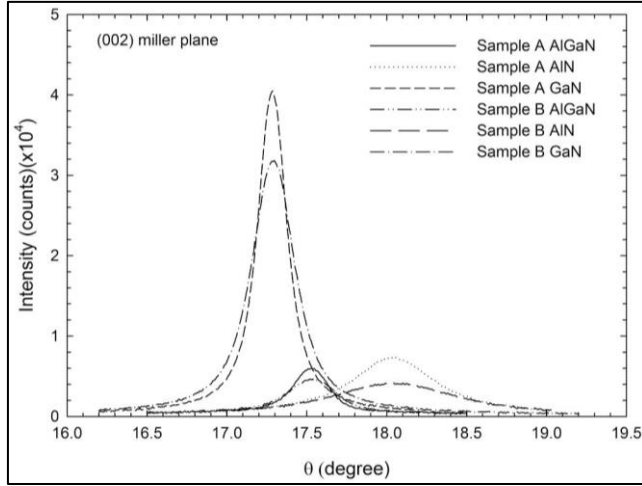
Şekil 5.1 HEMT numunelerinin katman yapısının şematik gösterimi

5.2. Deney ve Sonuç

HEMT cihazların performansı, katmanların kristal kalitesine dayanır. Numunelerdeki tabakaların kristalin kalitesi simetrik (002) ve asimetrik (105) Bragg yansıması olarak değerlendirildi. (002) Bragg yansıması, katmanların mozaikinden kaynaklanan bir gauss tipi yansımadır [19,20].

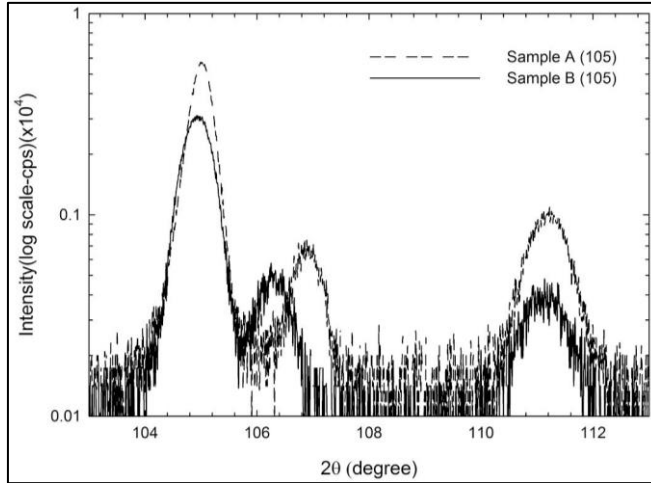
Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, simetrik (002) ve asimetrik (105) düzlemlerden elde edilen üç temel tepe, GaN, AlGaN ve AlN katmanları tarafından elde edilen Bragg yansımalarıdır. HEMT yapılarının tabaka kalınlıkları Şekil 5.1'de incelendiğinde, yansıtma zirvesi daha yoğundur, çünkü GaN tabakasının tabaka kalınlığı diğer tabakalardan daha yüksektir. Ek olarak, numune A'nın daha kalın tampon tabakası, GaN tabakasının kalitesinin daha iyi olmasını sağlar. A ve B örneklerinin pik yükseklik yarı genişlikleri (FWHM), GaN (002) yansımaları için 0.2783 °, 0.2410 °, AlGaN (002) yansımaları için 0.2183 °, 0.2694 ° ve AlN (002) yansımaları için 0.4157 °, 0.6091 ° olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.1'de açıkça gösterildiği gibi, örnek A'nın FWHM değerleri örnek B'ninkinden daha düşük ve daha kristalizedir.



Şekil 5.2. (002) Bragg yansımasının XRD salınım eğrileri

Şekil 5.3, HEMT numunelerinden (105) Bragg yansımasını içermektedir. A ve B örneklerinin FWHM'leri GaN (105) yansımaları için 0.2162 °, 0.4352 °, AlGaIn (105) yansımaları için 0.2613 °, 0.3511 ° ve AlIn (105) yansımaları için 0.3513 °, 0.5154 ° olarak bulundu. Tampon tabaka kalınlığı azalırken, epitaksiyel tabakaların simetrik ve asimetrik doruklarının FWHM değerleri artar. Daha kalın tampon tabakası yapıyı daha iyi kristalize eder.



Şekil 5.3. (105) Bragg yansımasının XRD salınım eğrileri

Çizelge 5.1: Örneklerin FWHM değerleri

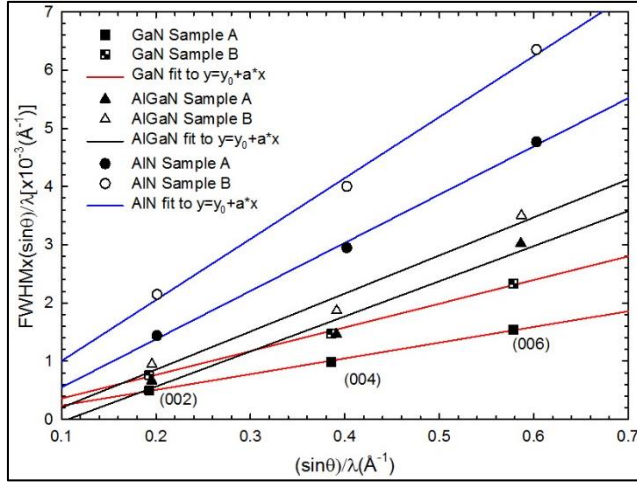
	(002)		(105)	
	Sample A(°)	Sample B(°)	Sample A(°)	Sample B(°)
GaN	0.1783	0.2410	0.2162	0.4352
AlGaIn	0.2183	0.2694	0.2613	0.3511
AlIn	0.4157	0.6091	0.3513	0.5154

Epitaksiyel tabakaların kusur yoğunluğu dört parametre ile tanımlanan mozaik model ile açıklanmaktadır. Tutarlılık uzunlukları, eğim ve bükümdür. Eğim ve büküm kristalografik yönelimin açısal dağılımını belirler. Dikey ve yanal tutarlılık uzunlukları mozaik blok boyutunu belirler. Bu dört parametre çeşitli dislokasyonlarla ilişkilidir. Mozaik kristalit boyut ve eğim, simetrik ve asimetrik tepe noktalarının sallanma eğrilerinin genişlemesinin bir sonucudur. Altıgen öğütücü düzlemlerinin sallanma eğrileri, eğim açısı, yan ve dikey koherens uzunlukları, bu pilotlar için W-H grafik yöntemiyle bulunur. (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Bu yöntem, $\text{FWHM}(\sin \theta) \lambda$ olan yansıma sırasının bir fonksiyonu olarak sallanan eğrinin FWHM'sinin bir grafiğidir ve her yansıma için $(\sin \theta)/\lambda'$ a karşı çizilir. Çizilen eğri düz bir çizgi ile donatılmıştır. İlgili parametreler FWHM'nin ölçülen profilin ayrılmaz genişliğidir. θ ve λ' nın sırasıyla X-ışınlarının ve X-ışını dalga boyunun asal açısı olduğu açıklanabilir [80]. Lineer bağımlılık eğiminden ve yanal kristal mozaik uzunluğu (L_{II}), ordinat ile kesişme noktasının tersini takip eder. L_{II} , Denk. 1, elde edilen hattın y_0 kesit noktasından,

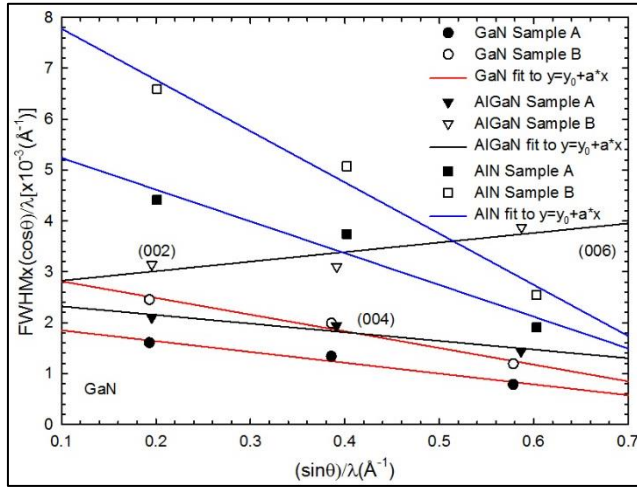
$$L_{II} = \frac{0.9}{2y_0} \quad (5.1)$$

$\text{FWHM}(\cos \theta) \lambda$ her yansıma için $(\sin \theta)/\lambda$ karşısında çizilir ve eğri düz bir çizgiyle çizilir. Dikey kristal mozaik uzunluk $L_{\perp}$, ordinat ile kesişme noktasının tersini takip eder.

W-H tarafından belirlenen eğim açıları (Şekil 5.4) ve bu değerler çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu tabloda, B numunesi için eğim açısı değerleri, örnek A numunesinden daha yüksektir. Farklı simetrik yansımaların FWHM'sinin karşılaştırılmasından, B numunesinde sallanma eğrisi genişlemesi, eğim değerlerinin arttırılmasıyla tanımlanabilir.



Şekil 5.4. W-H a) GaN b) AlGaIn c) AlN yanal tutarlılık uzunluğunun GaN eğrileri



Şekil 5.5 W-H eğrileri için a) GaN b) AlGaIn c) AlN dikey uyum uzunluğu

Çizelge 5.2: Eğim, tutarlılık uzunlukları, dislokasyon örnekleri için gerilme değerleri

	GaN		AlGaIn		AlN	
Samples	A	B	A	B	A	B
Eğim (°) ($\times 10^{-3}$)	2.69	6.53	6.03	6.53	8.28	10.47
Yanal tutarlılık uzunluğu (Å) ($\times 10^4$)	1.45	0.92	0.07	0.09	0.16	1.02
Dikey tutarlılık uzunluğu (Å)	218.02	143.25	180.59	170.56	76.74	51.22
Kenar dislokasyon (cm^{-2}) ($\times 10^{10}$)	0.68	1.53	1.06	1.48	4.74	7.28
Vida dislokasyon (cm^{-2}) ($\times 10^8$)	2.78	6.48	4.74	9.62	21.5	48.0
Gerginlik ($\times 10^{-4}$)	-5.32	-8.19	-4.25	4.69	-15.60	-25.20

Çizelge 5.2' de sunulan mozaik blok boyutunu tanımlayan dikey ve yan tutarlılık uzunluklarıdır. Uyum uzunlukları, diğerleriyle kıyaslandığında, lateral koherenkül

uzunlukları daha yüksek değerlerdir. AlN tampon tabakası ve AlN iç tabakasının yapı üzerindeki etkisi çok büyüktür. GaN tampon katmanının kristal kalitesi, yüksek sıcaklıktaki AlN tampon katmanının kullanılmasıyla geliştirilir ve AlGaN katmanındaki gerilme azalır [62, 81,82].

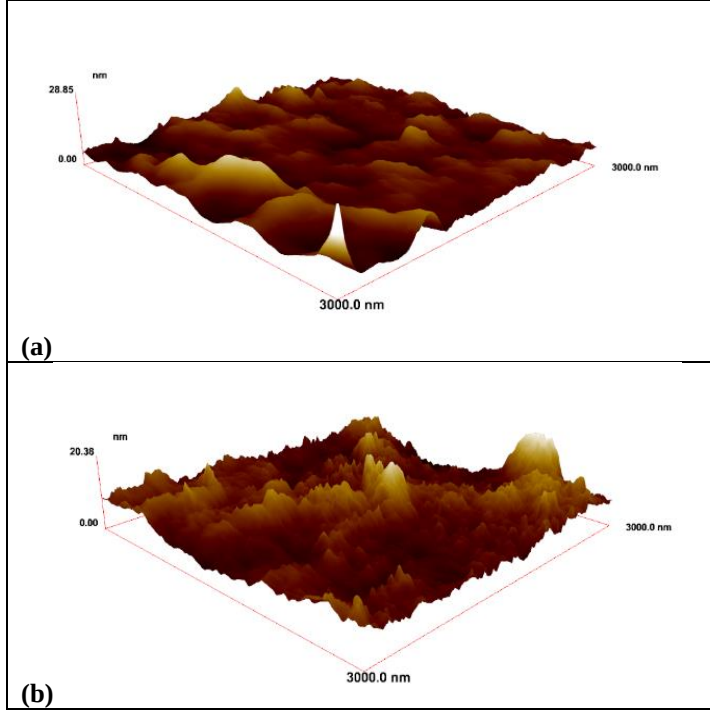
Örneklerin dislokasyon yoğunlukları, aşağıdaki denklemlerden hesaplanmaktadır.

$$D_{screw} = \frac{FWHM^2}{9b_{screw}^2} \quad D_{edge} = \frac{FWHM^2}{9b_{edge}^2} \quad (5.2)$$

D_{screw} vida tipi yoğunluğu ise, D_{edge} kenar tipi yoğunluğu ve b Burglektörün yer değiştirme uzunluğudur ($b_{screw} = 5.1855 \text{ \AA}$, $b_{edge} = 3.1890 \text{ \AA}$). Hesaplanan değerler Çizelge 5.2' de verilen sonuçları göstermektedir. $(0.68-1.5) \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 'nin kenar dislokasyon yoğunluğu ve $(2.78-6.48) \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 'lik bir vida çıkma yoğunluğu epitaksiyel GaN tabakaları için tipiktir. Bu sonuç, kenar TD'lerinin daha küçük çekirdekleşme enerjisinden kaynaklanmaktadır [83]. A'nın vida yerinden çıkma değeri, tüm epitaksiyel katmanlar için B'den düşüktür. Bu durum birbirini eğim değerleri ile destekler.

Şekil 5.6' da HEMT numunelerin yüzeyinden kaydedilen $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ tarama alanlı AFM (3D) görüntüsünü görülmektedir. Genel olarak, MOCVD tarafından büyütülen GaN yapıları yüksek hata yoğunluğuna sahiptir [84-86]. Hata konsantrasyonu, yüksek sıcaklıkta AlN tampon tabakası ile azaltılır. AFM sonuçları incelendiğinde, numune B'deki çukurlar ve yükseltiiler çok daha sık görülür. A numunesinin yanal uzunluğu B'ninkinden büyükse, numune B'de ki dağılım daha sık görülür. Bu, GaN kap katmanının yapıdaki dislokasyonlardan elde edilen yanal uzunluğu ile tutarlıdır. Düşük pürüzlü ve yüksek kristalize olmuş katmanlar, yüksek düz yüzeyli başlık katmanıyla büyütüldüğünde, yüzeydeki basamak morfolojik yapısı meydana gelir. Bazen, karanlık noktalar basamak noktaları arasında belirir. Bu koyu lekeler kenar, vida veya karışık yer değiştirmelerden biri olabilir. Bu yer değiştirme hatları, uygun koşullar altında hacimsel olarak büyük çukurları sıkıştırarak oluşturulur. Bu karanlık noktaların yoğunluğu önceden tahmin edilebilir. Bununla birlikte, daha büyük ve küçük boyutlu kristalli tabaka, sık sık çukur sayısı nedeniyle uygun koşullar altında karanlık bir noktaya dönüşür. B numunesi bu durum için uygundur ve çok sayıda çukurun bulunduğu dislokasyon yoğunluğu vardır. Bu, XRD sonucuyla

uyumludur. Numune A ve numune B'nin rms değerleri sırasıyla 2.25 nm ve 2.47 nm'dir. AFM gözlemleri açıkça numune B'nin A örneğinden daha kaba olduğunu ortaya koyuyor.



Şekil 5.6. HEMT yapılarının 3 μm x 3 μm tarama alanına sahip AFM görüntüleri

5.3. Sonuç

MOCVD ile safir alttaşlarda büyütülen iki farklı kalınlıkta AlN tampon tabakası, XRD ve AFM ile araştırılmıştır. XRD sonuçları, 520-nm-kalınlığında bir AlN tamponunun, epitaksiyel tabakaların asimetric ve simetric zirveleri üzerinde ters bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. AlN tampon tabakasının ve AlN iç tabakasının yapı üzerindeki etkisi, dislokasyonlar, gerilme, eğim, koherensel uzunlukları için oldukça büyüktür. AFM sonuçları, düşük kalınlıktaki tamponun daha sık çukurlara ve tepceliklere sahip olduğunu ve daha sert olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Bardeen, J. and Brattain, W.H. (1998). The transistor, a semiconductor triode (Reprinted from Physical Review, 74, 230-231, 1948). *Proceedings of the Ieee*, 86(1),29-30.
2. Mimura, T. (2002). The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). *Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3),780-782.
3. Morkoç, H. (2009). *Handbook of nitride semiconductors and devices, Materials Properties, Physics and Growth*. New York: John Wiley & Sons,31-43.
4. Amano, H. (1986). Metalorganic Vapor-Phase Epitaxial-Growth of a High-Quality Gan Film Using an Ain Buffer Layer. *Applied Physics Letters*, 48(5), 353-355.
5. Khan, M.A. (1994). Microwave Performance of a 0.25 Mu-M Gate Algan/Gan Heterostructure Field-Effect Transistor. *Applied Physics Letters*, 65(9), 1121-1123.
6. İnternet: Temel malzeme bilgisi. muhendishane. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fmuhendishane.org%2Fkutuphane%2Ftemel-malzeme-bilgisi%2F&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2019.
7. İnternet: Göller, G.Keleş, Ö. ve Akın. Atomik ve İyonik Düzenler. itu. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.itu.edu.tr%2Fozgulkel-es%2Fdersler%2FMalzemeBilimi+_03_2010.pdf&date=2015-01-12, Son erişim tarihi:12.01.2015
8. Çörekçi, S. (2008). *Grup III-V Bileşik Yarıiletkenlerde AFM Yüzey Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10, 11, 39.
9. Oura,K.,Lifshitsi,V.G.,Saranin,A.A.,Zotov,A.V.,Katayama,M. (2003). *Surface science* (1). Berlin: Springer,166, 229, 378-382.
10. Liu, L., Edgar, J. H. (2002). *Substrates for Gallium Nitride Epitaxy. Materials Science and Engineering*. R: Reports, 37(3), 61-128.
11. Kocan, M. (2003). *AlGaN/GaN MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between surface-interface-device properties*, PhD thesis, Pondicherry University, Pondicherry, 1-60.
12. Liang,C.T.,Lin,L.H.,Huang,J.Z.,Zhang,Z.Y.,Sun,Z.H.,Chen,K.Y., Chen,N.C.,Chang,P.H.andChang,C.A. (2007). *Electron-electroninteractions in Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN highelectron mobility transistor structures grownon Si substrates*. *AppliedPhysics Letters*, 90(2), 022107(1-3).

13. Fieger, M., Erickelkamp, M., Koshroo, L. R., Dikme, Y., Noculak, A., Kalisch, H., Heuken, M., Jansen, R. H. and Vescan, A. (2007). MOVPE, processing and characterization of AlGaIn/GaN HEMT with different Al concentrations on silicon substrates. *Journal of Crystal Growth*, 298(1), 843-847.
14. Dikme, Y. (2006). MOVPE and characterization of GaN-based structure on alternative substrates, Doktora Tezi, Pondicherry University, Pondicherry, 1-24.
15. Maruska, H. P. and Tietjen, J. J. (1969). The preparation and properties of vapor-deposited single-crystalline GaN. *Applied Physics Letters*, 15(10), 327-329.
16. Ponce, F. A. (1998). *Structural defects and materials performance in the III-V nitrides*. (1). New York: Oxford University Press, 123-157.
17. Etzkorn, E. V. Clarke, D. R. (2001), *Cracking of GaN films*. *Journal of Applied Physics*, 89(2), 1025-1034.
18. Van Nostrand, J. E., Solomon, J., Saxler, A., Xie, Q. H., Reynolds, D. C. and 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.
19. Bayrak, S. T. (2011). InGaIn/GaN Çoklu Kuantum Kuyulu Işık Saçan Diyotlar, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 7-11, 21-23, 31, 32.
20. 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, 9, 10, 20-23, 42.
21. Nakamura, S. (1995). A bright future for blue/green LED's. *IEEE Circuits and Devices*, 11(3), 19-23.
22. Brown, A. S., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Brown, T., May, G. (2006). Fundamental reactions controlling anion exchange during mixed anion heterojunction formation: Chemistry and kinetics of P-for-As Exchange reaction. *Applied Physics Letters*, 99(9), 093510(1-4).
23. Hudait, M. K., Lin, Y., Palmisiano, M. N., Tivarus, C., Pelz, J. P., Ringel, S. A. (2004). Comparison of mixed anion, InAs_yP_{1-y} and mixed cation, In_xAl_{1-x}As metamorphic buffers grown by molecular beam epitaxy on (100) InP substrates. *Applied Physics Letters*, 95(8), 3952-3960.
24. Gao, Y., Craven, M. D., Speck, J. S., DenBaars, S. P. and Hu, E. L., "Dislocation- and crystallographic dependent photoelectrochemical wet etching of gallium nitride", *Appl. Phys. Lett.*, 84: 3322-3324 (2004).
25. Chu, R. "AlGaIn/GaN single and double-channel high electron mobility transistors", Yüksek lisans tezi, Hong Kong University, Hong Kong, 3-13 (2004).
26. Dikme, Y. "MOVPE and characterization of GaN-based structures on alternative substrates", Doktora Tezi, Pondicherry University, Pondicherry, 1-24 (2006).

27. Koçan, M., “AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: interplay between surface-interface- device properties”, Doktora tezi, Pondicherry University, Pondicherry, 1-60(2003).
28. Davies, J. H., “The Physics of low-dimensional semiconductors”, Cambridge University Press, Cambridge, 80-84(1998).
29. İnternet: LED Lighting. 3esolition. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.3esoln.com.sg%2Ftechnology%2Fled-lighting.html&date=2019-09-12>, Son erişim tarihi: 12.09.2019.
30. Gupta, M. C., Ballato, J. (2007). *The Handbook of photonic*. (2). Florida: CRC Press, 20.
31. Nakamura, S., Pearton, S., Fasol, G. (2000). *The blue laser diode, The complete story* (2). Berlin: Springer-Verlag, 42, 43.
32. Paskova, T., Hanser, D. A. and Evans, K. R. (2010). *GaN Substrates for III-Nitride Devices. Proceedings of the IEEE*, 98(7), 1324-1338.
33. Bulun, G. (2010). *3D-Geçiş Metali Ni Katkılı Zn1-xNixO ve 4f Lantanit Gd Katkılı Zn1-xGdxO Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 9-11,33-38.
34. Kittel, C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*, (Çev. Bekir Karaoğlu). İstanbul: Güven Yayınevi, 302-310.
35. Wright, A. F. (1997). *Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN. Journal of Applied Physics*, 82(6), 2833-2839.
36. Sarua, A. (2008, July). *Raman-IR micro-thermography tool for reliability and failure analysis of electronic devices. Paper Presented at 15th IEEE International Symposium Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits IPFA 2008*, Singapore.
37. Ambacher, O. (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.
38. Balaz, D. (2011). *Current collapse and device degradation in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors*, Phd Thesis, University of Glasgow School of Engineering, Glasgow,28-30.
39. Abbas, J.M.M.J.A. (2016). *GaN-Temelli Ultraince Baariyeerli Yüksek Elektron Devingenlikli Transistörlerin Benzetimi ve Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,19-20.
40. Bernardini, F. Fiorentini V. and Vanderbilt, D. (1997). *Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. Physical Review B*, 56(16),R10024.
41. Kelekci, O. (2011). *GaN Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Tasarımı, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,14-18.

42. Javorka, P. (2004). *Fabrication and characterization of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors*. Phd Thesis, Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 24-30.
43. Toprak, A. (2014). *Gate Uzunluğunun Gan Hemt Aygıtlarda Güç Performansına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-12.
44. Davis, R. F., Roskowski, A. M., Preble, E. A., Speck, J. S., Heying, B., Freitas, J. A., Glaser, E. R. and Carlos, W. E. (2002). *Gallium Nitride Materials-Progress, Status, and Potential Roadblocks*. *Proceedings of the IEEE*, 90(6), 993-1004.
45. Keller, S., Wu, Y., Parish, G., Ziang, N., Xu, J., Keller, B., Den Baars, S., Mishra, U. (2001). *Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(3), 552-559.
46. İnternet: AIX 200/4 RF-S. aixtron. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.aixtron.com%2Fen%2Fhome%2F&date=2019-09-12>, Son erişim tarihi: 12.09.2019.
47. Flynn, J. S., Xin, H., Dion, J. A., Hutchins, E. L., Antunes, H., Fieschi-Corso, L., Egas, R. V. and Brandes, G. R. (2003). *Delta doped AlGa_N and AlGa_N/Ga_N HEMTs: pathway to improved performance?* *Physica Status Solidi (c)*, 0(7), 2327-2330.
48. Arulkumaran, S., Egawa, T., Ishikawa, H., and Jimbo, T. (2003). *Characterization of different-Al-content Al_xGa_{1-x}N/Ga_N heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire*, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 21(2), 888-894.
49. Cheal, R. L., Yong, J. P. (2003). *Characteristics of UV photodetector fabricated by Al_{0,3}Ga_{0,7}N/ Ga_N heterostructure*, *Journal of Crystal Growth*, 252(1), 51-57.
50. Aygün, E., Zengin, M. (Editörler). (1998). *Atom ve Molekül Fiziği*, Ankara Üniversitesi, 86-92
51. Cullity, B.D. (1996). *X ışınlarının Difraksiyonu*, (Çeviri Ali Sümer), İstanbul, İTÜ Yayınları, 30-32.
52. Durlu, T.N. (1992). *Katıhal Fiziğine Giriş*, Ankara: Bilim Yayınları, 24-25.
53. Kittel, C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*, (Çev. Bekir Karaoğlu). İstanbul: Güven Yayınevi, 302-310.
54. Yu, P. Y., Cardona, M. (2005). *Fundamentals of Semiconductors, Physics and Materials Properties* (3). Berlin: Springer Berlin Heidelberg New York, 62, 87, 96-98.
55. Kocan, M. (2003). *AlGa_N/Ga_N MBE 2DEG Heterostructures: interplay between surface-interface-device properties*, Doktora tezi, Pondicherry University, Pondicherry, 1-60.

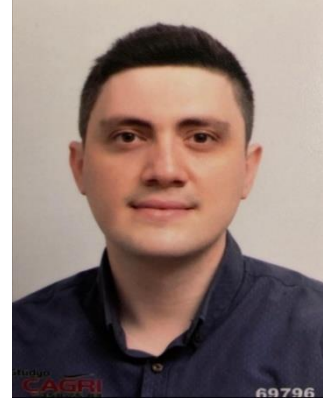
56. Afseth, A. Nordlien, J.H., Scamans G. M. and Nisancioğlu, K. (2001). *Effect of heat treatment on filiform corrosion of aluminium alloy AA3005*, *Corrosion Science*, 43(11).2093-2109.
57. Kızılkaya, K. (2012). *InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs Kuantum Kuyulu Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37, 39-42.
58. Cheal, R. L., Yong, J. P. (2003). *Characteristics of UV photodetector fabricated by $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ / GaN heterostructure*. *Journal of Crystal Growth*, 252(1), 51-57.
59. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği*. (1). Ankara: Nobel Yayınları, 221–499.
60. Y.-F. Wu, D. Kapolnek, J.P. Ibbetson, P. Parikh, B.P. Keller, and U.K. Mishra, *Very High Power density AlGaIn HEMT's* *IEEE Trans. Electron Devices* 48,586 (2001).
61. H. Kim, R.M. Thompson, V. Tilak, T.R. Prunty, J. R. Shealy, *Device degradation in GaN HFET technology Eastman*, *IEEE Electron Device Lett.*24,42 (2003).
62. M. K. Öztürk, H. Altuntaş, S. Cörekçi, Y. Hongbo, S. Özçelik and E. Özbay, *Strain-Stress Analysis of AlGaIn/GaN Heterostructures With and Without an AlN Buffer and Interlayer* 47,19–27(2011).
63. W. T. Liaoa, J. R. Gong, S.W. Lina, C. L. Wanga, T. Y. Lin, K. C. Chena, Y. C. Chengd, and W. J. Lin, *Growth of AlGaIn and GaN films on Al_2O_3 substrates and the influence of V/III ratio on the properties of GaN films* *Cryst. Growth*286,28(2006).
64. S. Cörekçi, S. Dugan, M.K. Öztürk, S.Ş. Çetin, M. Çakmak, S. Özçelik and E. Özbay, *Journal of Electronic Materials* 45,7(2016).
65. S. Arulkumaran, K. Ranjan, G. Ing Ng, J. Kennedy, P. P. Murmu, T. N. Bhat, and S. Tripathy, *J. Vac. Thermally stable device isolation by inert gas heavy ion implantation in AlGaIn/GaN HEMTs on Si*. *Technol. B* 34(4) (2016).
66. Y. Li, S. Arulkumaran, Z. H. Liu, K. Ranjan, K. Siong Ang, P. Paul Murmu, J. Kennedy, *Improved planar device isolation in AlGaIn/GaN HEMTs on Si* *Phys. Status Solidi A* 214, 8, 1600794 (2017).
67. Y. Li, S. Arulkumaran, Z. H. Liu, K. Ranjan, K. Siong Ang, *Analyzing of AlGaIn/GaN devices*, *Journal of Applied Physics* 121, 044504 (2017)
68. S. M. Hubbard, G. Zhao, D. Pavlidis, W. Sutton and E. Cho, *Protein Function Prediction for Omics Era*, *Cryst. Growth* 284,297–305(2005).
69. H. Yu, D. Caliskan, and E. Ozbay, *Growth of high crystalline quality semiinsulating GaN layers for high electron mobility transistor applications* *J. Appl. Phys.* 100,033501–033504(2006).
70. N. Nakamura, K. Furuta, X. Q. Shen, T. Kitamura, K. Nakamura and H. Okumura, *Analyzing the AlGaIn/AlN/GaN Heterostructures for HEMT Applications* *J. Cryst. Growth* 301– 302,452–456 (2007).

71. X. Wang, C. Wang, G. Hu, H. Xiao, C. Fang, J. Wang, J. Ran, J. Li, J. Li and Z. Wang, *Analyses of 2-DEG characteristics in GaN HEMT with AlN/GaN super-lattice as barrier layer grown by MOCVD* *J. Cryst. Growth* 298,791–793(2007).
72. C. W. Kuo, Y. K. Fu, C. H. Kuo, L. C. Chang, C. J. Tun, C. J. Pan, and G. C. Chi, *Dislocation reduction in GaN with double Mg_xNy/AlN buffer layer by metal organic chemical vapor deposition* *J. Cryst. Growth* 311,249(2009).
73. J. S. Ha, H. J. Lee, S. W. Lee, S. H. Lee, H. Goto, M. W. Cho, T. Yao, S. K. Hong, R. Toba, and J. Y. Lee, *Reduction of dislocation in GaN films* *Phys. Lett.* 92,091906(2008).
74. Q. M. Fu, T. Peng, F. Mei, Y. Pan, L. Liao, and C. Liu, *Relaxation of compressive strain by inclining threading dislocations* *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42,035311(2009).
75. S. Corekci, M.K. Ozturk, A. Bengi, M. Cakmak, S. Ozcelik, E. Ozbay, *Characterization of an AlN buffer layer and a thick-GaN layer grown on sapphire substrate by MOCVD* *J. Mater. Sci.* 46 (6),1606-1612(2011).
76. S. Corekci, M.K. Ozturk, H.B. Yu, M. Cakmak, S. Ozcelik, E. Ozbay, *Effects of high-temperature AlN buffer on the microstructure of AlGa_N/Ga_N HEMTs* *Semiconductors* 47(6),820-824 (2013).
77. L. Sugiura, *Dislocation motion in GaN light-emitting devices and its effect on device lifetime* *J. Appl. Phys.* 81,1633(1997).
78. V. V. Mamutin, V. A. Vekshin, V. Yu. Davydov, V. V. Ratnikov, and S. V. Ivanov, *Mg-doped Hexagonal InN/Al₂O₃ films grown by MBE* *Status Solidi A* 176,373 (1999).
79. V. Tasco, A. Campa, I. Tarantini, A. Passaseo, F. González Posada, A. and E. Muñoz, *Investigation of GaN growth on AlN and GaN* *J. Appl. Phys.* 105,063510(2009).
80. M. K. Öztürk, Yu Hongbo, B. Sarıkavak, S. Korçak, S. Özçelik, E. Özbay, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 21 (2),185-191(2010).
81. H. Amano, M. Iwaya, N. Hayashi, T. Kashima, and I. Akasaki, *Control of dislocation in AlGa_N on sapphire using interlayer* *Phys. Status Solidi B* 216,683–689(1999).
82. J. Y. Kim, K. J. Lee, E. H. Shin, K. Y Lim, and K. Nahm, *High quality AlGa_N growth by changing pressure and insertion* *Phys. Status Solidi* 10, 2445–2449(2004).
83. L. Sugiura, *Dislocation motion in GaN devices and its effect on device life* *J. Appl. Phys.* 81, 1633(1997).
84. T. Metzger, R. Hoepler, E. Born, O. Ambacher, M. Stutzmann, R. Stoemmer, *Defect structure of epitaxial GaN films determined by trans.* *Philos. Mag. A* 77,1013(1998).
85. J. Elsner, R. Jones, P.K. Sitch, V.D. Porezag, M. Elstner, Th. Frauenheim, M.I. Heggie, S. Oberg, P.R. Briddon, *Theory of Threading Edge and Screw Dislocations in GaN*, *Phys. Rev. Lett.* 79, 3672(1997).
86. B. Heying, E.J. Tarsa, C.R. Elsass, P. Fini, S.P. DenBaara, *Dislocation mediated surface morphology of GaN* *J. Appl. Phys.* 85, 6470(1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AVAR,Celal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.11.1986, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (533) 504 27 98
 e-mail : celal.avar@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / FİZİK	2019
Lisans	Gazi Üniversitesi / FİZİK	2011
Lise	Ankara Atatürk Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	Havaş A.Ş.	Harekat Memuru
2016-2017	Rovenma A.Ş.	İdari İşler Koordinatörü
2013/2015	DRB Ltd.Şti.	Şube Müdürü
2012/2013	Ankara Bilim Merkezi	Eğitmen Koordinatör

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. İ. Kars Durukan, Ö. Akpınar, C. Avar, A. Gultekin . M. K. Öztürk, S.Özçelik, E.Özbay (2018) Analyzing The AlGa_N/AlN/GaN Heterostructures for HEMT Applications

Hobiler

Seyahat etmek, At binmek, Araba yarışları |

DİZİN

A

Abstract · 25, 66, 68
Alıntılar · 14
Alt Bölümler · 10
APA · 35, 45
Araştırma · 30
Arial · 6

B

Bakınız · 23
Baskı · 36, 42
başlık · 10, 15, 20, 29, 31, 34, 40, 47
bölüm · 6, 31, 47

C

CD · 3
Cilt · 8

Ç

çizelge · 4, 19, 20, 21, 23, 25, 28, 47, 81
Çizelge · 9, 27, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77

D

Dipnot · 18
Dizin · 50
Doğrudan aktarma · 15
Dolaylı aktarma · 16

E

EKLER · 6, 20, 47, 49, 51, 69
Eşitlik · 20, 21
Etik · 9, 25

F

Format · 4, 5

formül · 20, 25

G

Giriş · 2, 4, 5, 9, 29, 31, 80
Görüntü · 4
grafik · 4, 20, 25

H

Harita · 9
Haritalar · 27

İ

İlk kontrol · 3
indis · 6
İspat · 11

K

Kabul ve Onay · 25
Kaynak · 11
Kenar Boşlukları · 7
Key Words · 25, 65, 66
Kılavuz · 1

L

Lemma · 11
literatür · 11, 14, 29

N

Numaralandırılma · 9, 11, 20

O

Onay · 2, 9
Ondalık Sayılar · 19

Ö

Özet · 10, 25, 64, 68
Özgeçmiş · 10, 49, 69, 76

P

patent · 5
pdf · 1, 3, 4
program · 4, 47
punto · 6, 9, 10, 18, 24, 25, 26

R

Referans · 5, 18
resim · 2, 4, 20, 21, 28, 47
Resimle · 27
Resimlemelerin Açıklamaları · 21

S

savunma · 1
sembol · 25, 40
simge · 6, 25, 28
Simgeler ve kısaltmalar · 28, 75
Simgeler ve Kısaltmalar · 9, 19
Sonuç ve öneriler · 31

Ş

şekil · 4, 20, 21, 23, 25, 28, 47
Şekil · 27, 68, 71
Şekille · 9, 27

T

Tanım · 11, 19
Teşekkür · 9, 10, 26, 67, 68, 70, 71, 73, 74
Tetkik · 75
Times New Roman · 6

U

Unvan · 34

Y

yazar · 13, 14, 15, 16, 34, 38, 42



GAZİ GELECEKTİR..