



**FARKLI PÜSKÜRTME GÜÇLERİ ALTINDA ÜRETİLEN n-ZnO/AlN/p-GaN YAKIN UV MAVİ IŞIK YAYAN DİYOTLARIN (LED) ELEKTRİKSEL, OPTİK, YAPISAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Derya ÜNAL**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2021**

## 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.

Derya ÜNAL

02/08/2021



FARKLI PÜSKÜRTME GÜÇLERİ ALTINDA ÜRETİLEN n-ZnO/AlN/p-GaN YAKIN  
UV MAVİ IŞIK YAYAN DİYOTLARIN (LED) ELEKTRİKSEL, OPTİK, YAPISAL VE  
MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Derya ÜNAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2021

ÖZET

Bu tez çalışmasında farklı püskürtme güçleri altında üretilen n-ZnO/AlN/p-GaN yakın uv mavi ışık yayan diyotların (led) elektriksel, optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelendi. Bu çalışmada p-n yapıları elde etmek için farklı ince film büyütme yöntemleri kullanıldı. İlk olarak safir ( $Al_2O_3$ , (0 0 0 1) yönelimli) alttaş üzerine Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) tekniği kullanılarak nitrit tabakaları (AlN, GaN) büyütüldü. Daha sonra n-tipi tabakası için rf magnetron püskürtme yöntemiyle 25 W, 50 W, 75 W, 90 W ve 100W püskürtme gücü değişkenleri altında ZnO büyütmesi yapıldı. p-GaN ve n-ZnO katmanları üzerine kontaklar (Ni (200 Å)/Au (2000 Å) ve Ti (300 Å)/Au (2000 Å) yapılarak Led yapısı tamamlandı. Numunelerin elektriksel, yapısal, optik ve morfolojik özellikleri; Akım-Voltaj (I-V) ölçümleri, X-ışını kırınımı (XRD), Fotoluminesans (PL), Elektrolüminesans (EL) dataları ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) sonuçları değerlendirilerek belirlendi. AFM sonuçlarının rms (root-mean-square) değerlerine göre püskürtme gücü arttıkça, tane boyutu arttı. Ayrıca PL spektrumundan 422nm, 465nm, 425nm, 420nm ve 421nm'de ZnO pikleri, 423 nm'de GaN piki görüldü. Led'in oda sıcaklığı elektrolüminesansı (EL) sırasıyla 25 W, 50 W, 75 W, 90 W ve 100 W püskürtme güçlerinde biriktirilen ZnO ince filmler için 455, 442, 430, 420 ve 395 nm'de güçlü mor-mavi emisyon spektrumu gösterdi. Led'lerin I-V eğrileri, 25 W, 50 W, 75 W, 90 W ve 100 W değerleri için 6,8 V, 6,4 V, 5,5 V, 3,3 V ve 5,2 V eşik gerilimleriyle iyi düzelme eğilimi gösterdi.

Bilim Kodu : 20206  
Anahtar Kelimeler : LED, ZnO, MOCVD, Püskürtme yöntemi  
Sayfa Adedi : 98  
Danışman : Prof. Dr. Ziya MERDAN  
İkinci Danışman : Doç. Dr. Songül FİAT VAROL

INVESTIGATION OF ELECTRICAL, OPTICAL, STRUCTURAL AND  
MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF n-ZnO/AlN/p-GaN NEAR UV-BLUE LIGHT  
EMITTING DIODES (LED) FABRICATED UNDER DIFFERENT SPUTTERING  
POWERS

(Ph. D. Thesis)

Derya ÜNAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2021

ABSTRACT

In this thesis, the electrical, optical, structural and morphological properties of n-ZnO/AlN/p-GaN near uv-blue light Emitting Diodes (Led) fabricated under different sputtering powers were examined. In this study, we have used different thin film deposition techniques to obtain p-n junctions. Firstly, nitrite layers were deposited on Sapphire ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , with (0 0 0 1) orientation) substrates using Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) technique. Then ZnO depositions were performed for the n-type layers under 25 W, 50 W, 75 W, 90 W and 100W sputtering powers with rf Magnetron sputtering method. The Led structure is completed by making contacts on p-GaN and n-ZnO layers. The electrical, structural, optical and morphological properties of the samples were determined by evaluating current-voltage (I-V) measurements, X-ray diffractions (XRD), Photoluminescence (PL), Electroluminescence (EL) datas and Atomic Force Microscope (AFM) results. According to the rms values of AFM results. As the sputtering power increased, grain size increased. In addition, PL peaks were observed at 422nm, 465nm, 425nm, 420 nm, 421 nm for ZnO and at 423nm for GaN layers at 25 W, 50 W, 75 W, 90 W and 100 W sputtering powers, respectively. The room temperature Electroluminescence (EL) of the Leds showed strong violet-blue emission spectra at 455, 442, 430, 420 and 395 nm for ZnO thin films deposited at 25 W, 50 W, 75 W, 90 W and 100 W sputtering powers, respectively. The I-V curves of the Leds showed good rectifying behavior with threshold voltages of 6,8 V, 6,4 V, 5,5 V, 3,3 V and 5,2 V for 25 W, 50 W, 75 W, 90 W and 100 W values

Science Code : 20206  
Key Words : LED, ZnO, MOCVD, Sputtering method  
Page Number : 98  
Supervisor : Prof. Dr. Ziya MERDAN  
Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Songül FİAT VAROL

## TEŞEKKÜR

Doktora araştırmalarım boyunca bana yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Ziya MERDAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Çalıőmalarım boyunca yardımını esirgemeyen, her konuda bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Songül FİAT VAROL'a çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca varlıklarına Őukredeceęim, beni her türlü destekleyen canım annem ve babama sonsuz teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. YARIİLETKENLER .....	3
2.1. Katkılı ve Katkısız Yarıiletkenler.....	6
2.2. Yarıiletkenlerde Optik İşlemler.....	7
2.2.1. Elektron-deşik oluşumu ve rekombinasyonu .....	7
2.2.2. Işımalı ve ışısız geçişler .....	9
2.2.3. Banttan banda rekombinasyon .....	10
2.2.4. Eksiton.....	10
2.2.5. Donör-Akseptör ve Safsızlık-Bant Geçişleri .....	11
3. ÇİNKO OKSİT (ZnO) VE ÖZELLİKLERİ .....	13
3.1. Fiziksel Özellikleri .....	14
3.1.1. Kristal yapısı .....	14
3.1.2. Örgü parametreleri.....	16
3.1.3. Elektronik bant yapısı .....	17
3.2. Elektriksel Özellikleri.....	17
3.3. Optik Özellikleri.....	18

	<b>Sayfa</b>
3.4. Mekanik Özellikleri.....	18
3.5. Manyetik Özellikleri.....	19
3.6. Katkılanması.....	19
3.6.1. N-tipi katkılama.....	20
3.6.2. P-tipi katkılama .....	21
3.7. Uygulama Alanları .....	21
<b>4. IŞIK YAYAN DİYOTLAR (LED'LER) .....</b>	<b>23</b>
4.1. ZnO Tabanlı Led'ler.....	25
4.1.1. Heteroeklem Led'ler .....	26
4.1.2. ZnO nanomalzemeli heteroeklem ledler .....	27
4.2. Nitrat Tabakalar.....	27
4.2.1. Nitratların kristal yapısı.....	31
4.2.2. Nitratların mekanik özellikleri .....	33
4.2.3. Nitratların optik özellikleri.....	34
4.2.4. Nitratların elektriksel özellikleri .....	35
<b>5. İNCE FİLM KAPLAMA VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ..</b>	<b>37</b>
5.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniği (MOCVD).....	37
5.2. RF Magnetron Püskürtme Sistemi.....	40
5.3. X-ışınları Kırınımı (XRD).....	42
5.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) .....	44
5.5. Fotoluminesans Sistemi (PL) .....	46
5.6. UV-Visible Spektrometre .....	47
5.7. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi .....	48
5.8. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi .....	49
5.9. Spektroskopik Elipsometre.....	50

6. YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR VE TARTIŞMA .....	51
6.1. Yapıların Büyütülmesi.....	51
6.1.1. AlN/GaN/AlN yapısının MOCVD yöntemi ile büyütülmesi.....	53
6.1.2. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının rf magnetron püskürtme yöntemi ile büyütülmesi .....	54
6.1.3. Aşındırma işlemleri ve kontak yapımı .....	56
6.2. Yapıların Karakterizasyonları .....	65
6.2.1. XRD analizleri .....	65
6.2.2. AFM analizleri .....	70
6.2.3. Fotoluminesans (PL) –soğurma analizleri .....	77
6.2.4. Elektrolüminesans (EL) analizleri.....	80
6.2.5. Akım Gerilim (I-V) analizleri .....	82
7. SONUÇ.....	85
KAYNAKLAR .....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	97

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. ZnO'nun bazı fiziksel parametre değerleri (Oda sıcaklığında) .....	14
Çizelge 3.2. ZnO'nun ölçülen parametreleri .....	16
Çizelge 3.3. Hesaplanan en yakın komşu bağ uzunlukları, negatif yüklü süstitüsyon katışıkları için kusur enerji seviyeleri ( $E_i$ ), pozitif yüklü AX merkezi oluşturmak için gereken enerji ( $\Delta E$ ) .....	20
Çizelge 4.1. Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi .....	30
Çizelge 4.2. $Al_2O_3$ 'e ait temel parametreler .....	31
Çizelge 6.1. Numune parametreleri .....	53
Çizelge 6.2. ZnO kaplama parametreleri .....	55
Çizelge 6.3. 25W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri .....	58
Çizelge 6.4. 50W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri .....	59
Çizelge 6.5. 75W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri .....	60
Çizelge 6.6. 90W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri .....	61
Çizelge 6.7. 100W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri .....	62
Çizelge 6.8. Kontak parametreleri .....	63
Çizelge 6.9. Farklı güç değişkenleri altında büyütülen ZnO filmlerin yapısal parametreleri .....	70
Çizelge 6.10. ZnO ince filmlerin AFM ölçümlerinden elde edilen pürüzlülük (rms) parametreleri .....	72
Çizelge 6.11. p-tip GaN ve n-tipi ZnO ince filmlerin elektriksel özellikleri .....	76

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İletken (metal), yalıtkan ve yarıiletken enerji bant diyagramı .....	3
Şekil 2.2. a) Metal, b) Yarıiletkenin özdirençlerinin sıcaklıkla değişimi.....	4
Şekil 2.3. Taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi .....	5
Şekil 2.4. T=0 K'de saf (katkısız) yarıiletken diyagramı .....	6
Şekil 2.5. Katkılı yarıiletkenlerin Fermi enerji seviyeleri .....	7
Şekil 2.6. Direk geçişli ve indirek geçişli bant yapısına sahip olmayan bir yarıiletkende bantdan banda soğurma ve rekombinasyon işlemleri.....	9
Şekil 2.7. a) Donör-akseptör geçişinden dolayı foton soğurması b) kusur merkezleri arasındaki r mesafesinin gösterimi .....	11
Şekil 2.8. a) Donör-bant ve b) akseptör-bant soğurmaları geçişleri.....	12
Şekil 3.1. ZnO kristal yapıları (a) kübik kaya tuzu, (b) kübik çinko sülfür, (c) hegzagonal wurtzit .....	15
Şekil 3.2. c taban yönünde ve a taban düzleminde örgü parametrelerine sahip hegzagonal wurtzit yapıdaki ZnO kristali .....	15
Şekil 4.1. III Grubu nitratların dalga boyu spektrumu .....	29
Şekil 4.2. Wurtzite metal nitrat yapısının şematik gösterimi .....	32
Şekil 5.1. MOCVD büyütme tekniğinin şematik gösterimi .....	39
Şekil 5.2. Püskürtme sisteminin şematik diyagramı.....	41
Şekil 5.3. Bragg yasasının gösterimi .....	44
Şekil 5.4. AFM çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	45
Şekil 6.1. Numunelerin şematik gösterimi .....	55
Şekil 6.2. Yapının aşındırma işlemi öncesi ve sonrası şematik gösterimi.....	63
Şekil 6.3. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GaN, AlN tabakaların XRD kırınım deseni.....	65
Şekil 6.4. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının XRD kırınım deseni.....	66
Şekil 6.5. Fotoluminesans (PL) spektrumu .....	77
Şekil 6.6. Soğurma spektrumu.....	78

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.7. Elektrolüminesans (EL) spektrumları grafiği.....	80
Şekil 6.8. I-V karakterizasyon eğrisi .....	82



## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. AIXTRON 200/4 RF-S model MOCVD sistemi .....	40
Resim 5.2. BESTEC püskürtme sistemi.....	42
Resim 5.3. XRD cihazının görünümü .....	42
Resim 5.4. Atomik kuvvet mikroskobu.....	46
Resim 5.5. Fotoluminesans sistemi .....	47
Resim 5.6. Perkin Elmer marka UV-Vis spektrometresi (Gazi Fotonik).....	48
Resim 5.7. I-V ölçüm sistemi .....	49
Resim 5.8. Spektroskopik elipsometre .....	50
Resim 6.1. Üretilen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlN/GaN/AlN numune resmi.....	53
Resim 6.2. Üretilen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GaN/AlN numunenin kesilmiş hali .....	54
Resim 6.3. ZnO kaplamaları yapılan numuneler.....	55
Resim 6.4. Optik mikroskop ile farklı led boyutları.....	64
Resim 6.5. Led boyutları ve led ışığı.....	64
Resim 6.6. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 3d AFM görüntüleri a) 25W b) 50W c) 75W d) 90W e)100W .....	71
Resim 6.7. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 2d AFM görüntüsü.....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
Å	Angstrom
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Safir
AlGaN	Alüminyum galyum nitrat
AlInGaN	Alüminyum indiyum galyum nitrat
Ar	Argon
As	Arsenik
As	Arsenik
AsH <sub>3</sub>	Arsin
Au	Altın
CH <sub>4</sub>	Metan
Cl <sub>2</sub>	Klor
Co	Kobalt
DC	Doğru akım
E <sub>g</sub>	Yasak enerji aralığı
eV	Elektron volt
Ga	Galyum
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Galyum oksit
GaAs	Galyum arsenik
GaN	Galyum nitrat
H <sub>2</sub> O	Su
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Fosforik asit
Hz	Hertz
I	Akım
In	İndiyum
InAl	İndiyum alüminyum

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>InGaN</b>	İndiyum galyum nitrat
<b>K</b>	Potasyum
<b>Li</b>	Lityum
<b>ml</b>	mililitre
<b>mm</b>	milimetre
<b>Mn</b>	Manganez
<b>N</b>	Azot
<b>Na</b>	Sodyum
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amonyak
<b>Ni</b>	Nikel
<b>NiO</b>	Nikel oksit
<b>nm</b>	nanometre
<b>NRs</b>	Nanorod
<b>O</b>	Oksijen
<b>P</b>	Fosfat
<b>PH<sub>3</sub></b>	Fosfin
<b>RF</b>	Radyo frekansı
<b>Sb</b>	Antimon
<b>Si</b>	Silisyum
<b>SiC</b>	Silisyum karbür
<b>Ti</b>	Titanyum
<b>V</b>	Voltaj
<b>V<sub>0</sub></b>	Oksijen boşluğu
<b>Zn<sub>i</sub></b>	Çinko aralığı
<b>ZnO</b>	Çinko oksit
<b>µm</b>	Mikrometre

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>ADX</b>	Açısal dağıtıcı x-ışını kırınımı
<b>AFM</b>	Atomik kuvvet mikroskobu
<b>CVD</b>	Kimyasal buhar biriktirme

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>EDX</b>	Enerji dağılımlı x-ışını kırınımı
<b>FWHM</b>	Maximum yarısı tam genişlik
<b>HEMT</b>	Yüksek elektron mobiliteli transistör
<b>HRXRD</b>	Yüksek çözünürlüklü x-ışınları kırınımı
<b>HVPE</b>	Hidrat buhar epitaksisi
<b>I-V</b>	Akım voltaj
<b>MBE</b>	Moleküler demet epitaksisi
<b>MIS</b>	Metal yalıtkan-yarıiletken
<b>MOCVD</b>	Metal organik kimyasal buhar birikimi
<b>MOVPE</b>	Metal organik buhar fazı epitaksisi
<b>NBE</b>	Yakın bant kenarı emisyonuna
<b>PLD</b>	Pulslu (atımlı) lazer birikimi
<b>PVD</b>	Fiziksel buhar biriktirme metodu
<b>UV</b>	Ultraviyole
<b>XAS</b>	X-ışını emilim spektroskopisi
<b>XRD</b>	X-ışınları kırınımı

## 1. GİRİŞ

Işık yayan diyot ileri yönde beslenen bir p-n eklemidir ve uygun ileri besleme koşullarında elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde doğal ışığa yapan aygıtlardır. 1949 yılında ilk p-n eklemının geliştirilmesinin ardından 1962 yılında GaAs p-n ekleminden doğal ışığa gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra Led'ler üzerinde yapılan çalışmalar hız kazanmış ve özellikle büyütme tekniklerindeki ilerlemeler, kuantum kuyusu ve süper parlak yapılardaki Led'lerin gelişimine olanak sağlamıştır [1].

Son on yılda geniş bant yapısına sahip yarıiletken tabanlı ışık yayan diyotlar mobil aletler, otomotiv, ekranlar ve aydınlatmadaki potansiyel optoelektronik uygulamalarından dolayı büyük ilgi gördü [2]. Günümüz teknolojisinde yarıiletkenler hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Çinko oksit (ZnO) yarıiletkeni çok fazla tercih edilen bir yarıiletkendir.

ZnO 60 meV yüksek eksiton bağlanma enerjisi ve oda sıcaklığında 3,37 eV'lik geniş doğrudan bant aralığına sahip olduğu için ultraviyole (UV) ışık yayan diyotlar (Led) ve lazer diyotlar için umut verici bir materyal olarak düşünülmüştür [3-5].

ZnO ve GaN'ın fiziksel özellikleri birbirine benzerdir. Örneğin ZnO ve GaN aynı wurtzite kristal yapıya, aynı düzlem kafes parametresine sahiptir ve oda sıcaklığında bant boşlukları sırasıyla 3,3 eV ve 3,4 eV'dir. Aynı zamanda ZnO, kısa dalga boylu optoelektronik endüstrisinde kullanılan geniş bant aralıklı yarıiletken olan GaN üzerinde önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları büyük bağlanma enerjisi (GaN için 26 meV'e karşılık 60 meV), daha yüksek radyasyon sertliği, kimyasal ıslak aşındırmaya uygun olması nedeniyle basit inceltme, en önemlisi düşük malzeme maliyeti ile geniş yüzey alanlarında kullanılabilir olması. Ancak epitaksiyel büyütme teknolojisi, yüksek kalite ve tekrarlanabilir olmamasından dolayı ZnO'nun eksikliği vardır. Bu alanda çok fazla ilerleme kaydedilmesine rağmen ZnO tabanlı ışık yayan diyotların (Led'lerin) ve lazer diyotların gelişiminin daha iyi olması, p-tipi malzeme olması ve tekrarlanabilir olması beklenmektedir. Ancak birkaç grup iyi kalitede p tipi GaN sahibidir [6].

ZnO oda sıcaklığında doğrudan geniş bant aralığına sahip II-IV yarıiletkenidir. ZnO ince filmler gaz sensörleri, fotodedektörler, bipolar eklem transistörler, ışık yayan diyotlar,

güneş pilleri için şeffaf iletken oksit kaplamalar gibi uygulamalara ağırlık vererek incelenmiştir [7].

p-n eklemler p tipi ve n tipi malzemelerin kontak haline getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Birçok elektronik devre elemanlarında tercih edilirler. Homoeklemler ve heteroeklemler olmak üzere iki tür eklem çeşidi bulunmaktadır. Aynı tür yarıiletkenlerden oluşturulan p-n eklem homoeklem, farklı tür yarıiletkenlerden oluşturulan p-n eklem ise heteroeklem olarak adlandırılmaktadır. Heteroeklemlerin üretimi zor ve maliyetlidir. Ancak verimli optoelektronik devre elemanları üretimi için oldukça uygun yapılardır.

Son zamanlarda ZnO p-n heteroeklem tabanlı ışık yayan diyotlar üretildi [8-10]. İstenilen kalitede karalı ve tekrarlanabilen p tipi katkılı materyalin eksikliğinden dolayı ZnO tabanlı ışık yayan diyotlar ticari seviyede düşünülmemektedir. P tipi ZnO'nun kararsızlığından dolayı p tipi GaN, Si [12], SiC(4H) [13] da dahil olmak üzere başka p tipi malzemeli heteroeklem ZnO lar üretilmiştir [11-13].

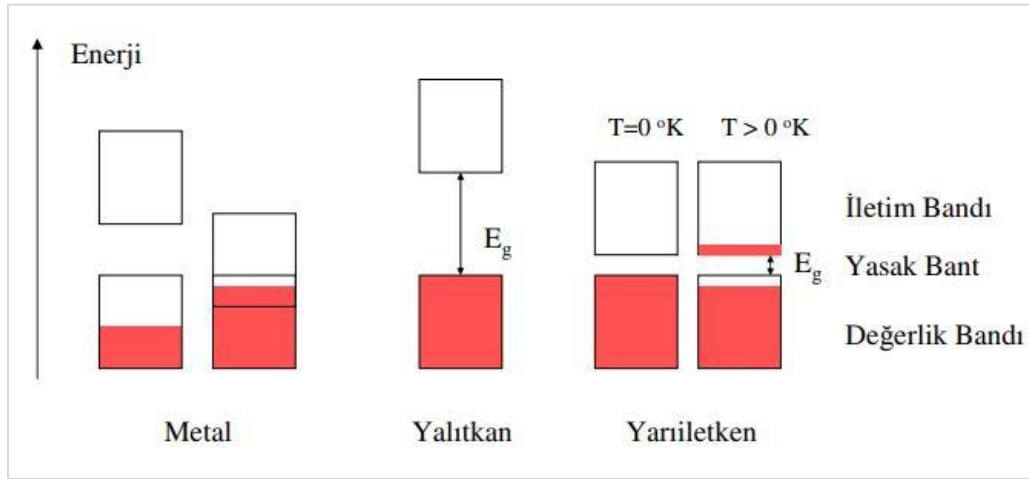
Galyum nitrid (GaN) ışık yayan diyotların gelişimi için ZnO ile heteroeklem üretiminde etkili bir şekilde kullanılır. Çünkü her iki malzeme de benzer kristal wurtzit yapı ve elektronik özelliklere sahiptirler. Kafes uyumsuzlukları 1,8% oranında farklılık gösterirler. Yakın bant aralıklı UV emisyonuna ek olarak derin seviyede fotoluminesans (PL) ve elektrolüminesans (EL) ZnO yarıiletkeni ile birlikte ele alınır. [14-17]. Derin seviyedeki emisyon olası oksijen boşluklarının veya derin seviyeli emisyonlardan sorumlu olan çinko yarığı olarak kabul edilmektedir [18].

ZnO tabanlı ışık yayan diyotların parlaklığını artırmak için tampon ortamı olarak işlev gören uygun bir malzemenin ara katmanının olması gereklidir. Çünkü ara katman diyotun ışık yayan kısmında elektron deşik injeksiyonu boyunca kararlı bir yük ortamı sağlar [19].

İnce filmler uygun alttaşlar üzerine büyütülür. İnce film büyütme teknikleri olarak; lazer biriktirme (PLD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), moleküler demet epitaksi (MBE), metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD), püskürtme (sputtering) ve sol-jel teknikleri kullanılmaktadır. En çok tercih edileni püskürtme (sputtering) tekniğidir. Tez çalışmamda MOCVD ve Püskürtme tekniği kullanılmıştır.

## 2. YARIİLETKENLER

Katı malzemeler elektriksel iletkenlik özelliklerine göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olarak üç gruba ayrılırlar. İletken maddelerin elektriksel özdirenci  $10^{-10}$   $\Omega\text{cm}$ , yarıiletkenlerin özdirenci  $10^{-2}$ - $10^{10}$   $\Omega\text{cm}$ , yalıtkanların özdirenci ise  $10^{22}$   $\Omega\text{cm}$  mertebesindedir. Maddelerin elektriksel özellikleri maddelerin bant yapısı ile ilgilidir [20].

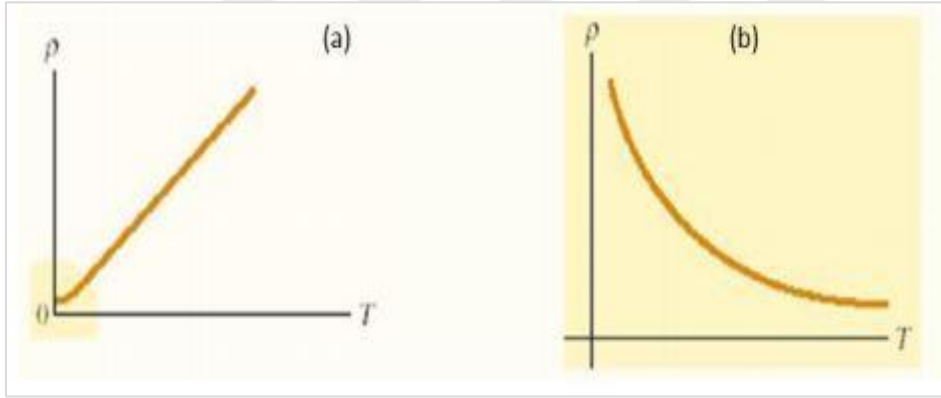


Şekil 2.1. İletken (metal), yalıtkan ve yarıiletken enerji bant diyagramı [20]

İletkenlerde valans bandı ile iletim bandı birbir içine geçmiş haldedirler. Böylelikle, elektronlar kristal içerisinde serbest bir şekilde hareket edebilmektedir. ( $E_g=0$  eV). Yalıtkanlarda yasak enerji aralığı fazladır. Elektronların, valans bandından iletim bandına geçebilmesi için çok yüksek bir enerji ile uyarılmaları gerekmektedir. ( $E_g>4$  eV). Yarıiletkenlerde; mutlak sıfırda ( $T=0$  K) iletim bandı boş, valans bandı ise tamamen doludur. Sıcaklığın artışıyla beraber ısıl olarak uyarılan elektronlar, valans bandından iletim bandına geçerler. Böylelikle hem elektronlar hem de geride kalan boşluklar iletkenliğe katkıda bulunurlar. Valans bandındaki bir elektronun uyarılabilmesi yasak enerji aralığına eşit veya daha fazla bir enerji verilmesiyle mümkün olur. Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı yaklaşık 0,1-4,0 eV aralığındadır. Valans bandı; elektronların bulunduğu temel seviye bandıdır ve bu bantlarda bulunan elektronlar, atomlar arası bağları oluşturmaktadır. İletkenlik bandı ise; valans bandının üzerindeki izinli enerji bandıdır ve elektronlarının bu banda geçmesiyle maddeler iletken hale gelir. Yarıiletkenlerde, mutlak sıfırda ( $T=0$  K) iletkenlik bandında hiç taşıyıcı bulunmamaktadır. Yüksek sıcaklıklara doğru artış oldukça, atomdaki bazı elektronlar gerekli termal enerjiye sahip olarak kristal

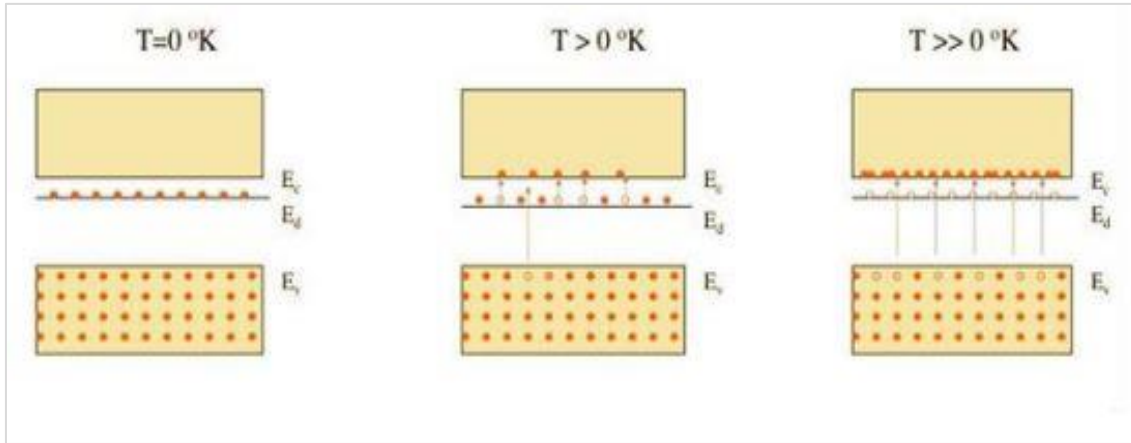
içerisinde hareket etmeye başlarlar. Hareket kazanan bu taşıyıcılar, valans bandından iletkenlik bandına geçiş yaparlar. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki taşıyıcı geçişinin olduğu bu aralığa ise yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) denilmektedir.

Sıcaklık metal ve yarıiletken malzemelerin elektriksel iletkenliğine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Sıcaklığın artmasıyla metal ve yarıiletken malzemelerin özdirençlerinde meydana gelen değişim Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Bir yarıiletken malzemenin özdirenci, sıcaklığın artmasıyla üstel (exponansiyel) olarak azalırken, metal malzemelerin özdirenci ise sıcaklık ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Metallerdeki bu artışın nedeni artan sıcaklıkla birlikte elektronların birbirleriyle ve fonon örgü kusuru gibi iç faktörlerle çarpışması ve bu çarpışmaların, elektronların hareketlerini kısıtlayıcı özellikte olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.2. a) Metal, b) Yarıiletkenin özdirençlerinin sıcaklıkla değişimi [20]

Şekil 2.3' te ise yarıiletken malzemelerin taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekil 2.3' de görüldüğü üzere, sıcaklık artışı ile birlikte yarıiletkenlerde, iletkenlik bandında bulunan elektronların konsantrasyonu önemli derecede artış göstermekte ve bununla birlikte malzemenin iletkenliği de artmaktadır. Sıcaklık ve yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) yarıiletken malzemelerin elektriksel özelliklerini belirlemede oldukça önemlidir.



Şekil 2.3. Taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi [20]

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu sonlu sıcaklıklarda, yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu ve dağılımını belirlemek için kullanılmaktadır. Fermi seviyesi  $T=0 \text{ °K}$ ' de dolu olan yörüngelerin en üst seviyesidir. Fermi enerjisi, özellikle katkılı veya katkısız yarıiletkenlerde atom konsantrasyonunun tanımlanması açısından önemlidir. Yarıiletkenler veya yalıtkanlar için Fermi seviyesi, valans bandı ve iletenlik bandı arasında yer alır, metallerde ise bu seviye enerji bandının içerisinde yer almaktadır. Katkısız yarıiletkenlerde Fermi seviyesi valans ve iletenlik bandının tam ortasındadır. Katkılı yarıiletkenlerde ise yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olmasına göre Fermi seviyesinin yeri değişiklik göstermektedir [21].

Valans bandındaki elektronların iletim bandına geçişi termal yollarla sağlanacağı gibi optik yollarla da elektronlar uyarılarak yasak enerji aralığını geçebilmelerini sağlanabilir. Foton enerjisi tamamen elektrona aktarılıp, aktarılan bu foton enerjisi ile elektron valans bandında bir boşluk oluşturarak iletim bandına geçmektedir. Bu olay oluştuğunda, fotonun malzeme tarafından tamamen soğrulduğunu söylenebilir. Elektron hareketini oluşturacak foton enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerjisine eşit olması gereklidir ve foton enerjisi,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

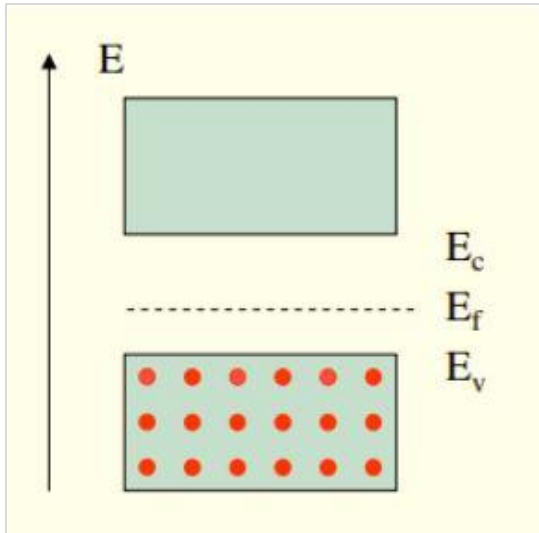
eşitliği ile ifade edilir.

İletim bandında yer alan bir elektron valans bandında yer alan boşluk ile birleşip sahip olduğu enerjiyi foton yayınımları ile dışarı verir ve bu da ışık yayan diyotların (Led),

yariletken lazerlerin temelini oluşturur. Fakat bütün yariletkenler ışık üretme kapasitesine sahip değildir. Çünkü bu özellik tamamen yariletkenin, kristalin yapısında bulunan elektron ve boşlukların özellikleri,  $E$  enerjisi ve  $k$  dalga vektörü ile belirlenir. Bir elektron ve boşluk ancak bu iki büyüklük korunursa birleşirler [22].

## 2.1. Katkılı ve Katkısız Yariletkenler

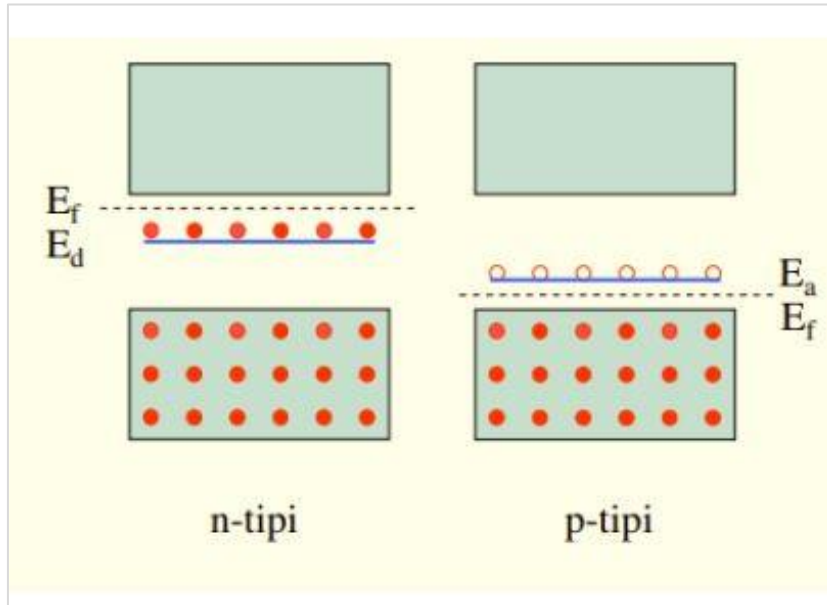
İçerisinde safsızlık yani kirlilik atomları veya örgü kusurları bulunmayan kristaller saf yariletkenler olarak adlandırılmaktadır.  $T=0$  K' de saf bir yariletkenin, valans bandında yer alan tüm enerji seviyeleri elektronlarla doludur, iletkenlik bandında yer alan tüm enerji seviyeleri ise tamamen boştur. Böylelikle Fermi enerjisi  $E_c$  (iletim bandı) ve  $E_v$  (valans bandı) arasında yer almaktadır. Sıcaklığın artmasıyla valans bandındaki elektronlar termal enerji kazanarak iletkenlik bandına geçmektedirler. Bu durumda, valans bandında boş bir deşik meydana gelmektedir. Böylelikle bir elektron-deşik çifti oluşmakta ve valans bandında bulunan deşiklerin sayısı ile iletkenlik bandında bulunan deşiklerin sayısı birbirine eşit olmaktadır. Eğer deşikler ve elektronların etkin kütlelerinin eşit olduğu varsayılırsa Fermi seviyesi bantların tam ortasında bulunur. Saf yariletkenlerin taşıyıcı konsantrasyonu sıcaklıkla birlikte artacağı için, iletkenlikleri de artacaktır. Böylelikle bu tarz yariletkenlerde hem elektronlar hem de deşikler iletkenliğe katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2.4.  $T=0$  K' de saf (katkısız) yariletken diyagramı [20]

Saf bir yariletkene, katkı atomları ilave edilirse, yariletkenin iletkenliği değiştirilebilmekte ve istenilen özellikte yeni bir yariletken elde edilebilmektedir.

Yarıiletkendeki baskın yük taşıyıcılarının elektronlar veya deşikler olması ilave edilen katkı atomlarının türüne göre belirlenmektedir. Eğer baskın yük taşıyıcıların elektronlar ise n-tipi yarıiletkenler, baskın yük taşıyıcıları deşikler ise p-tipi yarıiletkenlerdir [21].



Şekil 2.5. Katkılı yarıiletkenlerin Fermi enerji seviyeleri [20]

## 2.2. Yarıiletkenlerde Optik İşlemler

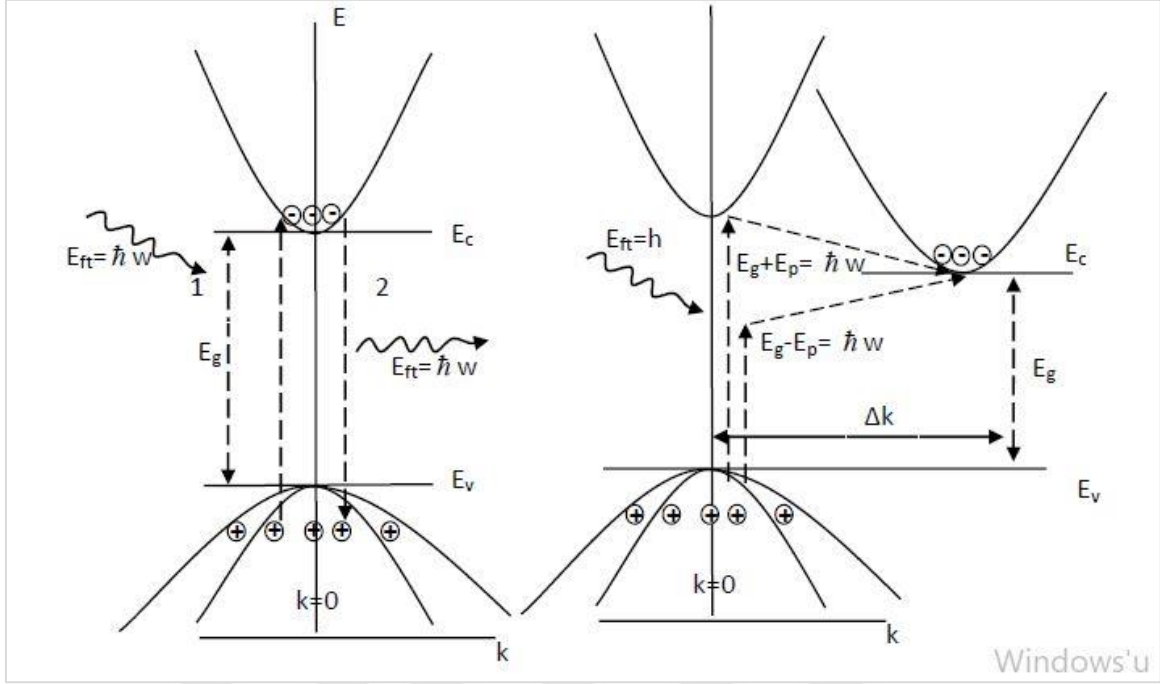
### 2.2.1. Elektron-deşik oluşumu ve rekombinasyonu

Tüm optoelektronik aygıtların çalışma prensibi, elektron-deşik çifti oluşumuna ya da rekombinasyon olayına dayanır. Elektronun enerjisi bakımından valans bandından iletkenlik bandına geçmesi ile çift oluşumu meydana gelir. Prensip olarak, yarıiletkene gelen herhangi bir enerjili parçacık, valans bandında bulunan bir elektrona en az yasak enerji aralığı kadar bir enerji aktarırsa çift oluşumu gerçekleşir. Bir yarıiletkeni aydınlatma elektron-deşik çifti oluşturmanın en kolay yoludur. Yeterli enerjisi olan fotonlar soğurulur. Valans bandında bulunan elektronlara bu enerji aktarılarak elektronları iletkenlik bandına çıkarır. Bu soğurma işlemidir. Bu işlemin zıttı olan işlem, yani elektron-deşik rekombinasyonu çiftin fazla enerjisini bırakmasıyla ilgilidir. Rekombinasyon ışıklı da ışımsız da oluşabilir. Işımsız geçişte fazla enerji genellikle fononlara aktarılır ve bu enerji ısı olarak açığa çıkar. Işımsız geçişte ise fazla enerji genellikle foton olarak açığa çıkar. Bu işlem bir ışık yayınlama işlemidir. Fotoluminesans foton gönderilerek üretilen

elektron-deşik çiftinin ışıklı rekombinasyonudur. Elektrolüminesans p-n eklemi veya benzer bir aygıtta elektrik alan ile ışıklı rekombinasyon işlemidir.

Eğer yarıiletkeninde fazla taşıyıcılar üretilirse sonunda rekombinasyona uğrarlar. Denge durumu rekombinasyon oranının üretim oranına eşit olduğu durumdur. Direk ve direk olmayan bant yapılı yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı boyunca taşıyıcıların geçişlerini içeren rekombinasyon işlemleri ile üretim işlemleri farklılık gösterir. Direk bant geçişli bir yarıiletkeninde valans bandı maksimumu ve iletkenlik bandı minimumu ( $k=0$ )'da bulunur. Dolayısıyla elektronun yukarı veya aşağı geçişlerinde momentum değişimi ya da bir fonon içermez. Sonuç olarak GaAs gibi bir yarıiletkeninde elektron iletkenlik bandına foton soğurarak çıkarılır. Bu elektronun çok kısa bir süre bu bantta bulunacak ve yasak enerji aralığına eşit bir foton yayınlamaya valans bandına geçip rekombinasyon işlemini oluşturacaktır. Dolayısıyla ile direk geçişli bant yapısına sahip yarıiletkenlerde ışıklı rekombinasyon ihtimali çok fazladır.

Direk geçişli bant yapısına sahip olmayan yarıiletkenlerde ise bu işlemler çok farklıdır. İletkenlik bandı minimumu  $k=0$ 'da olmadığından aşağı veya yukarı geçişler momentum değişimi dolayısıyla fonon içerir. Sonuçta, iletkenlik bandı minimumunda bulunan bir elektron ve  $k=0$ 'da bulunan bir deşik ile doğru enerjili bir fonon ve uygun momentum sağlamadan rekombinasyon işlemi gerçekleşemez.



Şekil 2.6. Direk geçişli ve direkt geçişli bant yapısına sahip olmayan bir yarıiletkende bantdan banda soğurma ve rekombinasyon işlemleri

Şekil 2.6'da a) Direkt geçişli yarıiletken için 1 ile gösterilen işlem  $\hbar\omega$  foton enerjisine sahip bir fotonun soğurulmasıyla iletkenlik bandına çıkan elektronu göstermektedir. 2 ile gösterilen işlem ise iletkenlik bandında bulunan elektronun  $\hbar\omega$  enerjisi salarak rekombinasyonunu göstermektedir. b) indirek geçişli bant yapısına sahip olmayan bir yarıiletken için soğurma işlemini göstermektedir. İşlem momentum korunumunu içerir. Ok yönleri ters çevrilirse iletkenlik bandında bulunan bir elektronun rekombinasyon işlemini gösterir.

### 2.2.2. Işımalı ve ışısız geçişler

Optik uyarma, injeksiyon, sürekli taşıyıcı üretimi ile yarı denge durumu oluşturulur. Elektron ve ya deşikler çiftler halinde oluşturulur ve yok olurlar. İnjesiyon seviyesine bağlı olarak denge durumunda fazla taşıyıcı yoğunluğu kristalde kurulur.  $\Delta n = \Delta p$ . Bu eşitlik aynı zamanda toplam yük nötralliği için kullanılır. Uyarma kesildiğinde fazla taşıyıcılar  $n_0$  ve  $p_0$  denge değerleri olan değerlerine geri dönerler. Fazla taşıyıcıların yok olması çoğu kez zamanla eksponansiyel olarak gerçekleşir.

$$n = n_0 + \Delta n \exp(-t/\tau) \quad (2.2)$$

Burada  $\tau$  fazla taşıyıcıların ömrüdür. Ömürleri iç ve dış parametrelerin kombinasyonuna bağlıdır. Genellikle fazla taşıyıcıların ışıklı veya ışısız rekombinasyonu ile fazla enerjinin fonon veya foton olarak açığa çıkmasıyla yok olur. Işısız rekombinasyon genel olarak tuzaklar, kusurlar ve yüzeyde meydana gelir. Malzemenin ışığa verimini azaltır.

### 2.2.3. Banttan banda rekombinasyon

Banttan banda gerçekleşen rekombinasyon en basit taşıyıcı rekombinasyonu işlemidir ve oranı momentum korunumu olmadan

$$R_{sp} = B_r n p \quad (2.3)$$

ile verilir.  $B_r$  banttan banda rekombinasyon oranıdır birimi  $\text{cm}^3 \text{sn}^{-1}$  dir..  $B_r$ 'ninin değeri yarıiletkenin yasak enerji aralığına, direk veya indirek olmayan geçişli bant yapısına sahip olmasına göre değişiklik gösterir. Yarıiletken indirek yasak enerji aralığına sahip ise  $B_r$   $10^{-11}$  ile  $10^{-9}$  arasında değer alır. Eğer yarıiletken indirek olmayan geçişli bant yapısına sahip ise  $10^{-15}$  ile  $10^{-13}$  arasında değişir.

### 2.2.4. Eksiton

Bantlar arası geçişle bir fotonun soğurulması yarıiletken ya da yalıtkanın içinde iletkenlik bandında bir elektron ve valans bandında bir deşik meydana getirir. Uzayda aynı noktada oluşturulan zıt yüklü parçacıklar karşılıklı Coulomb etkileşmesi ile birbirlerini çekerler. Bu çekici etkileşme ile elektron-deşik çiftinin oluşumu meydana gelir. Uygun koşulların sağlandığı durumda bağlı bir elektron deşik çifti de oluşturulabilir. Bu nötr bağlı çifte eksiton adı verilir. En basit ifadeyle eksiton birbiri etrafında sabit yörüngede hareket eden elektron ve deşik ile bir pozitronyum atomuna benzer küçük hidrojenik sistem olarak düşünülebilir. Birçok kristal yapıda eksitonlar gözlenir. Eksitonlar; serbest eksiton olarak da adlandırılan Wannier-Mott eksitonlar, sıkı bağlı eksiton olarak da adlandırılan Frenkel eksitonlar olmak üzere iki türü vardır. Frenkel eksitonları yalıtkan ve moleküler kristallerde, Wannier- Mott eksitonları ise yarıiletkenlerde gözlenir.

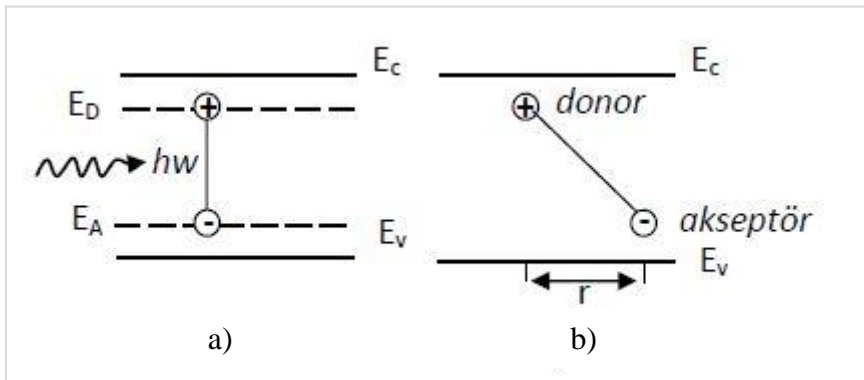
### 2.2.5. Donör-Akseptör ve Safsızlık-Bant Geçişleri

Yarıiletkende isteyerek veya istenmeden oluşan donör ve akseptör seviyeleri ışıklı geçişlere sebep olur. Hidrojenik donör ve akseptör seviyelerinden gerçekleşen geçişlerle yayımlanan foton enerjisi yasak enerji aralığına çok yakındır. Yayımlanan fotonun enerjisi,

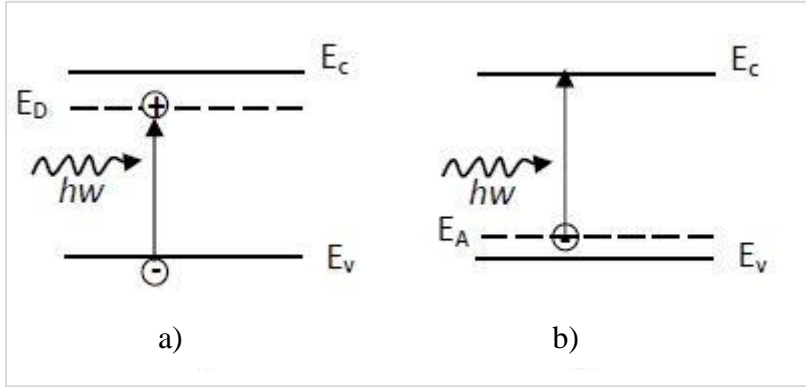
$$E = E_g - E_D - E_A + \frac{q^2}{\epsilon_0 \epsilon_r r} \quad (2.4)$$

ile gösterilir. Son terim donör ve akseptör atomları arasındaki coulomb etkileşimidir. Kusur seviyesinin işgal edilebilirliğine ve sıcaklığa bağlı olarak bir elektron foton soğurmasıyla akseptör seviyesinden donör seviyesine çıkabilir (Şekil 2.7). Genellikle donör-akseptör geçişi emisyon spektrumunda yayvan bir pik verir.

Bant aralığı yakın geçişi soğurma işleminin tamamlayıcısı olan önemli bir diğer hususta banttan safsızlığa olan geçiştir (Şekil 2.8). Yarıiletkenlerde donör ve akseptör bağlanma enerjisi yaklaşık olarak birbirine eşittir (elektron ve deşik etkin kütlelerinin yaklaşık olarak eşit olduğundan dolayı), iki tip safsızlık-bant (donör-bant ve akseptör-bant) geçişlerini ayırt etmek zordur. Bu durumda malzemenin iletkenlik tipini bilmek gereklidir. Ve malzemenin sıcaklığı da önemli bir faktördür.



Şekil 2.7. a) Donör-akseptör geçişinden dolayı foton soğurması b) kusur merkezleri arasındaki r mesafesinin gösterimi



Şekil 2.8. a) Donör-bant ve b) akseptör-bant soğurmaları geçişleri

Safsızlık-bant ve donör akseptör geçişleri arasındaki geçiş ihtimaliyetleri arasında fark vardır. Her iki geçişi de sağlayabilecek taşıyıcılar olabilir. Kuantum mekaniksel olarak hesaplamalarla bu geçiş ihtimaliyetleri belirlenebilir. Önemli olan parametre uygun işlem için taşıyıcı ömrüdür. İletkenlik bandında ve donör seviyesinde elektronlar, valans bandında ve akseptör seviyesinde deşikler var ise bantdan banda geçiş ihtimaliyeti safsızlık-bant geçişinden yaklaşık 4 kat daha fazladır [23].

### 3. ÇİNKO OKSİT (ZnO) VE ÖZELLİKLERİ

ZnO n tipi yarıiletkenidir, elektriksel iletkenliği temel olarak geçiş noktasındaki çinko fazlalığına bağlıdır. Elektriksel özellikleri hidrojen ile ısıtma işlemi uygulanarak, ya anyonik ya da katyonik değişim ile veya uygun katkılama işlemi ile değiştirilebilir [24]. Çinko oksit elektriksel olarak iletken ve görsel olarak şeffaftır. ZnO devre elemanları, gaz sensör uygulamaları, fotovoltailer [25], yüzey akustik dalga cihazları [26], ısıtıcılar ve ekranlar, optik dalga kılavuzları, entegre optikler, elektrik dönüştürücüler ve nanotellere temel adaydır. ZnO gibi oksit materyaller gaz sensörü uygulamalarında kullanılabilir. ZnO ayrıca çevresel korozyonlara karşı kimyasal ve mekanik olarak duyarlıdır [27]. ZnO çok fazla tercih edilen bir malzemedir, maliyeti düşüktür, zehirli değildir, yüksek bant aralığına sahiptir, kolayca katılabilir. Genellikle oksitlerin birçoğu kimyasal olarak kararlıdır ve havadaki oksijen ile tepkimeye girmezler [28].

ZnO ucuzdur, kimyasal açıdan kararlıdır, hazırlanması ve aşındırılması kolaydır, zehirli değildir bu da ZnO tabanlı optik cihazların üretimini cazip hale getirir. GaN tabanlı optoelektronik ve elektronik cihazların ticari başarısı, ZnO tabanlı cihazlara olan ilgiyi artırıyor [29-31].

ZnO tabanlı cihazlar daha düşük maliyette daha basit kristal büyütme teknolojisine sahiptir. ZnO'nun eksiton bağlanma enerjisi yüksek olduğu için bant kenarına yakın yoğun eksiton emülsiyonuna yol açar, çünkü bu eksiton enerji değeri,  $k_B T = 25$  meV olan oda sıcaklığında termal enerjinin 2,4 katıdır. ZnO diğer geniş bant aralıklı yarıiletkenlere kıyasla çok daha elverişlidir, bu malzeme işlevsel cihazların kullanıldığı nanoyapıların üretimine katkı sağladığı için imal edilmiştir [30].

ZnO tabanlı optoelektronik cihazlara yüksek eksiton enerjisi, düşük eşik gücü avantajı sağlar. ZnO yarıiletkeninin bazı metallerle katılması elektriksel özelliklerini geliştirebilir, bazı metallerle alaşım oluşturarak enerji bant aralığı genişletilebilir. ZnO ince filmlerinin alttaşlar üzerine başarılı bir şekilde büyütülebilmeleri ZnO'nun endüstriyel uygulamalarına büyük boyutlar kazandırmaktadır ve ZnO materyaline olan ilgi artmaktadır [32]. ZnO anahtar bir teknolojik materyaldir. ZnO kısa dalga boylu optoelektronik cihazlar için uygun bileşik yarıiletkenidir. ZnO kristalinin yüksek eksiton bağlanma enerjisi oda sıcaklığında yeterli eksitonik emülsiyon sağlayabilir [33,34]. ZnO çeşitli büyütme

morfolojiler grubuna sahip çok yönlü fonksiyonel bir materyaldir [35-42]. Nanotellerde ve ince filmlerde oda sıcaklığında UV lüminesans olduğu söylenebilir [43].

### 3.1. Fiziksel Özellikleri

Katkısız ZnO oda sıcaklığında beyaz renklidir. 300 °C' ye kadar ısıtıldığında sarıya döner. Farklı sıcaklıklarda farklı renkler de oluşabilir. Bu renk farklılıkları kristal yapıdaki %0,02-0,03 oranındaki boşluklardan kaynaklanır [44].

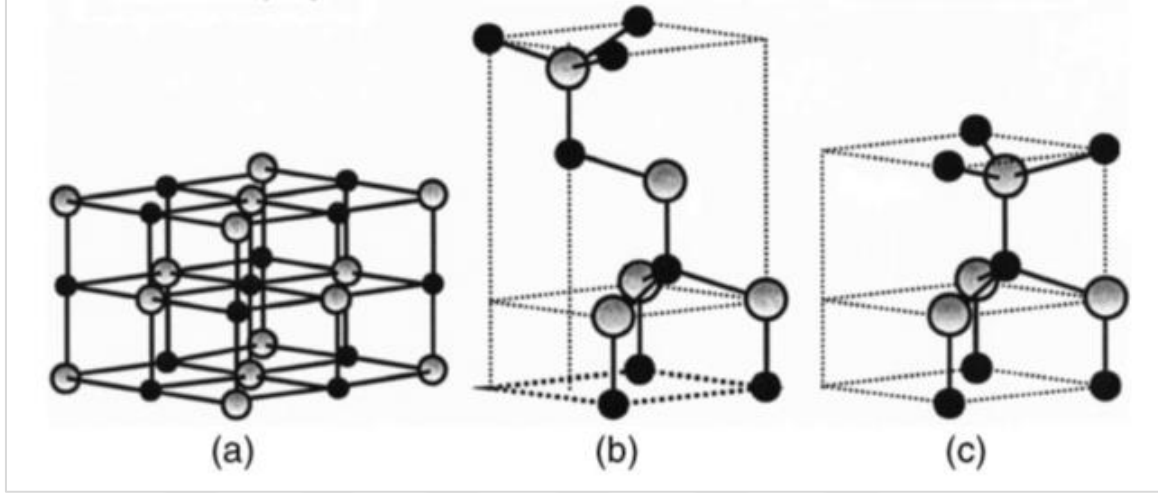
Çizelge 3.1. ZnO'nun bazı fiziksel parametre değerleri (Oda sıcaklığında) [32]

Parametre	Değer
Kristal Yapısı	Hegzagonal Wurtzit
Yasak Enerji Bant Aralığı	3,37 eV
Eksiton Bağlanma Enerjisi	60 meV
Isıl İletkenliği	25,2 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Örgü Sabitleri	a = 3,24 Å, c = 5,20661 Å
Örgü Enerjisi	965 Kcal/mol
Molekül Ağırlığı	Zn = 65,38 O = 16 ZnO = 81,38
Yoğunluğu	5,61 – 5,68 gr/cm <sup>3</sup>
Erime Noktası	1975 °C
Kırılma İndisi	1,95 – 2,10
Dielektrik Sabiti	$\epsilon_0 = 8,75$ ; $\epsilon_\infty = 3,75$
Elektron Etkin Kütlesi	0,24 m <sub>0</sub>
Boşluk Etkin Kütlesi	0,59 m <sub>0</sub>
Elektron Mobilitesi	200 cm <sup>2</sup> /Vs
Boşluk Mobilitesi	5 – 50 cm <sup>2</sup> /Vs

#### 3.1.1. Kristal yapısı

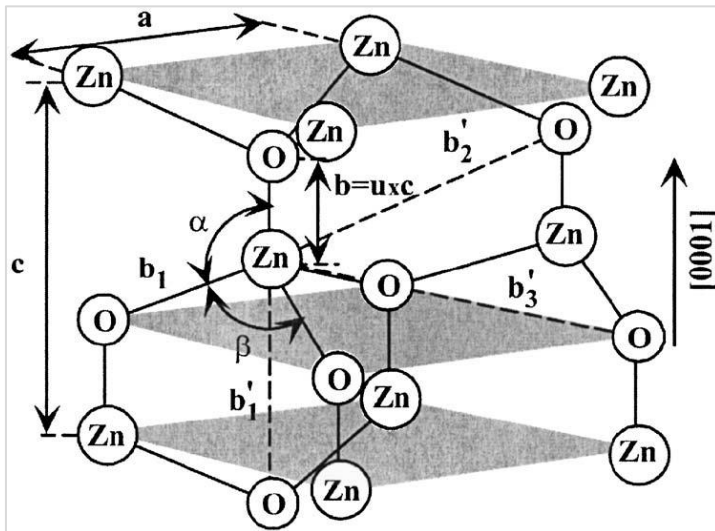
II-VI grubu ikili bileşik yarıiletkenlerinin çoğu her anyonun bir tetrahedralin dört katyonla çevrildiği kübik çinko sülfür veya hegzagonal wurtzit yapıda kristalleşir. Bu tetrahedral koordinasyon sp<sup>3</sup> kovalent bağlanma için örnektir fakat bu materyallerin önemli iyonik özelliği vardır. ZnO iyonikliği kovalent ve iyonik yarıiletken arasındaki sınırdaki bulunan bir II-VI bileşik yarıiletkenidir. ZnO'nun kristal yapıları şematik olarak wurtzit, çinko oksit ve kaya tuzudur. Bu yapılar Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Ortam koşullarında termodinamik

olarak kararlı olan faz wurtzittir. Çinko sülfür ZnO yapısı sadece kübik alttaşlar üzerinde büyütüldüğünde kararlı hale gelir, kaya tuzu yapısı yüksek basınçta elde edilebilir [30].



Şekil 3.1. ZnO kristal yapıları (a) kübik kaya tuzu, (b) kübik çinko sülfür, (c) hegzagonal wurtzit [30]

Wurtzit yapıları a ve c olan iki tane örgü parametresine ve hegzagonal birim hücreye sahiptir. Bu örgü parametreleri arasındaki oran  $c/a=1,6$  dır.  $C_{6v}^4$  veya  $P6_3mc$  uzay grubuna aittir. ZnO'nun wurtzit yapısı şekil 3.2'de gösterilmiştir [30].



Şekil 3.2. c taban yönünde ve a taban düzleminde örgü parametrelerine sahip hegzagonal wurtzit yapıdaki ZnO kristali

Burada  $u$  parametresi bağ uzunluğu veya  $c$  (ideal kristalde 0,375) ile bölünen en yakın komşu mesafesi  $b$  olarak tanımlanmaktadır. İdeal kristalde  $\alpha$  ve  $\beta$  bağ açılarıdır ve  $109,47^\circ$ dir [30]. Wurtzit yapısı üç grup halinde düzenlenmiş birbirini izleyen biatomik sıkı paket (0001) düzlemlerinden oluşmaktadır, örneğin Zn ve O çifti gibi [30].

### 3.1.2. Örgü parametreleri

Bir yarıiletkenin örgü parametreleri genellikle iletim bandının minimum deformasyon potansiyeli ile hareket eden serbest elektron konsantrasyonuna, yabancı atomların konsantrasyonuna ve kusurların konsantrasyonuna, dış zorlamalara ve sıcaklığa bağlıdır.

Herhangi bir kristalin örgü parametreleri en doğru biçimde yaygın olarak yüksek çözünürlükte X ışını kırınımı (HRXRD) ile ölçülür. Çizelge 3.2 wurtzit yapıları ZnO'nun ölçülen değerlerini göstermektedir. ZnO wurtzit yapısı oda sıcaklığında çeşitli deneysel ölçümlerle belirlenen örgü parametreleri teorik hesaplamalar ile uyum içindedir.  $a$  örgü sabiti  $3,2475 - 3,2501 \text{ \AA}$  arasında,  $c$  örgü sabiti  $5,2042 - 5,2075 \text{ \AA}$  arasında değerler almaktadır.  $c/a$  ve  $u$  parametreleri daha geniş aralıkta sırasıyla 1,593 ila 1,6035 ve 0,383 ila 0,3856 arasında değişir. İdeal wurtzit yapısının sapması örgü kararlılığı ve iyonikliğinden kaynaklanır.

Çizelge 3.2. ZnO'nun ölçülen parametreleri

$a$ (Å)	$c$ (Å)	$c/a$	$u$
3,2496	5,2042	1,6018	0,3819
3,2501	5,2071	1,6021	0,3817
3,286	5,241	1,595	0,383
3,2498	5,2066	1,6021	
3,2475	5,2075	1,6035	
3,2497	5,206	1,602	
		1,593	0,3856
		1,600	0,383

Hacim modülü ve taşıyıcı yoğunluğu ile ters orantılı, iletim bandının minimum deformasyon potansiyeli ile doğru orantılı olarak kafes genişlemesinden sorumlu olan serbest yük baskın faktör olarak bildirilmiştir [30].

### 3.1.3. Elektronik bant yapısı

Belirli bir yarıiletkenin bant yapısı potansiyel faydasını belirlemede çok önemlidir. ZnO'nun wurtzit, Çinko sülfür, kaya tuzu politipleri için bant yapısını hesaplamada çeşitli derecelerde karmaşıklığa ilişkin farklı teorik yaklaşımlar kullanılmıştır. Katılarda elektronik çekirdek seviyelerini ölçmek için X ışını veya yansıtma/soğurma veya emülsiyon teknikleri kullanılmıştır. Bu yöntemler temel olarak elektronik seviyeler arasındaki geçişleri tetikleyerek enerji farkını ölçer [30]. ZnO'nun elektronik yapısı tam dolu bir 2p O<sup>-2</sup> bandı ve boş 4s bandı (Zn<sup>-2</sup>) içermektedir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 3,37 ev'dir [45].

### 3.2. Elektriksel Özellikleri

Katkısız ZnO n tipi elektriksel iletkenlik gösterir. Bunun nedeni çinko fazlalığından dolayıdır. Çinko fazlalığı ZnO içinde çinko aralığına veya oksijen boşluğuna neden olur. Bu iki tip nokta hatası benzer elektriksel özelliklere sahiptir. Bununla birlikte her iki nokta kusuru, farklı tavlama sıcaklıkları ve atmosferleri altında farklı kusur reaksiyonları gösterir. Son zamanlarda baskın nokta kusurunun tavlama sıcaklığına bağlı olabileceği ortaya çıkmıştır. Farklı tavlama koşulları altında ZnO filmlerin kristal özellikleri, parlaklık özelliklerini etkileyen çeşitli nokta kusurlarını sergileyecek şekilde değişmektedir [46].

Çinko oksit farklı tekniklerle büyütülür. Bu büyüme tekniklerin çoğu yüksek n tipi olan ZnO üretir. Bu yüksek seviyeli n-tipi iletkenlik saydam iletkenler gibi bazı uygulamalar için çok kullanışlıdır fakat iletkenlik üzerinde daha iyi kontrol edilmesi istenmektedir. Özellikle n tipi zemini azaltma ve p tipi doping yapma, lazerler ve ışık yayan diyotlar için çok büyük imkânlar sağlar. Kendiliğinden oluşan n tipi iletkenlik yaygın olarak oluşmaktadır. Ve bu doğal kusur olarak ifade edilmektedir. Özellikle çinko aralıkları (Zn<sub>i</sub>) ve Oksijen boşluklarının (V<sub>o</sub>) donör olarak hareket etmesi beklenir ve yüksek taşıyıcı konsantrasyonların kaynağı olarak düşünülür. Doğal kusurların hiç birinin yüksek konsantrasyonlu sığ donör ile tutarlı özellik göstermediği araştırmalar ile ortaya çıkmıştır. Çinko aralıklarının yüksek oluşma enerjileri ve düşük difüzyon engelleri vardır. Oksijen boşluklarında asıl sorun ise sığ donörlerden ziyade derin olmalarıdır [47].

### 3.3. Optik Özellikleri

Yarıiletkenlerin optik özellikleri hem içsel hem dışsal etkiler ile bağlantılıdır. İletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki boşluklar arasında optik geçişler meydana gelir. Eksitonlar serbest ve bağlı eksitonlar olarak sınıflandırılmaktadır. Düşük kirlilikle yüksek kaliteli numunelerde serbest eksiton taban durumdan ziyade uyarılmış durumlar gösterir. Dışsal özellikler genellikle bant boşluğunda ayrı elektronik durumları oluşturan ve dolayısıyla hem optik absorpsiyon hem de emisyon süreçlerini etkileyen dopanlar ve kusurlar ile ilgilidir. Bağlı eksitonların elektronik durumları özellikle yarıiletken malzemenin bant yapısına bağlıdır. Teoride, eksitonlar nötr veya yüklü donör ve akseptörlere bağlanabilir.

ZnO'daki optik geçişler; optik soğurma, iletim, yansımaya, fotorefleksiyon, spektroskopik, elipsometri, fotoluminesans, katodoluminesans, kalorimetrik, spektroskopi gibi çeşitli deneysel tekniklerle incelenmiştir [30].

Yüksek kaliteli ZnO tek kristallerinin yeni var olanları düşük sıcaklıklı fotoluminesans, manyetoluminesans ve yansımaya ölçümlerinde içsel eksiton geçişlerini gözleme yolu açmıştır [48-50].

### 3.4. Mekanik Özellikleri

Malzemelerin mekanik özellikleri katılık, sertlik, piezoelektrik sabitleri, Bulk modülü, Young modülü, verim gücü gibi kavramları içerir [51]. Wurtzit ZnO kristali anizotropik olmasına rağmen kesme ses hızları arasında sadece küçük bir fark vardır. Kompozit malzemelerin elastik modüllerini belirlemek için kullanılan teknik ultrasonik ölçüm tekniğidir [52].

Bir optik teknik olarak, Brillouin saçılımı, bir malzemede, özellikle de bir kristal içindeki akustik fononlarda, ışığın etkileşimi yoluyla, elastik sabitlerin ve dolayısıyla kütle modüllerinin belirlenmesine izin verir. Enerji dağılımlı x-ışını kırınımı (EDX), açısal dağıtıcı x-ışını kırınımı (ADX) ve x-ışını emilim spektroskopisi (XAS) gibi çeşitli x-ışını kırınımı formları, kafes parametrelerinin basınca bağımlılığını belirlemek için de kullanılabilir [53].

Tetrahedral bağı yarıiletkenler arasında ZnO en yüksek piezoelektrik tensörüne sahiptir [54]. Bu özellik büyük bir elektromanyetik davranım gerektiren birçok uygulama için teknolojik açıdan ZnO'yu önemli bir malzeme haline getirmektedir. Piezoelektrik tensör, altıgen wurtzit fazında üç bağımsız bileşene sahiptir [55].

ZnO'nun doğal yapısı, düşük bir simetriye sahip olan ve c yönü boyunca spontan polarizasyonun varlığına neden olan wurtzittir. Mikro ve nanoiz yöntemleri, geniş bir yelpazedeki ölçekler ve sıcaklıklardaki ZnO sertliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sertlik ölçümleri genellikle kristalin (0001) yüzeyinde geleneksel piramidal veya küresel elmas ucu kullanılarak veya alternatif olarak keskin üçgen bir girinti ile gerçekleştirilir. Derinlik algılamalı girinti ölçümleri, yarıiletken malzemelerin sertlik ve basınca bağlı faz dönüşümü hakkında tam bilgi verir. Kristallerin kalitesi ve teorik yaklaşımlar, fiziksel özelliklerin belirlenmesi için birincil öneme sahiptir [56].

### 3.5. Manyetik Özellikleri

Manyetik malzemeler beş başlık altında incelenir. Bunlar: paramanyetik, diyamanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik ve ferrimanyetikdir [32]. Yarı iletkenlik özelliklerinin bir malzemedeki manyetik özellikler ile bütünleştirilmesi, kullanışlı cihazın başarılı bir şekilde üretilmesi için bir ön koşuldur [57]. Mn: ZnO nanopartiküller ve ince filmler p tipi katkılamada oda sıcaklığında ferromanyetizma özelliği gösterirken, n tipi katkı Co:ZnO filmler oda sıcaklığında ferromanyetizma özelliği gösterir [58].

### 3.6. Katkılanması

ZnO, çeşitli kısa dalga boyu optoelektronik cihaz uygulamaları için güçlü bir potansiyele sahiptir. Bu uygulamaları gerçekleştirmek için, yüksek kaliteli n-tipi ve p-tipi ZnO üretiminde güvenilir teknikler oluşturulmalıdır. Katkısız ZnO, Çinko geçişi ve oksijen boşluğu gibi içsel kusurlardan dolayı n-tipi iletim sergiler. n-tipi ZnO materyalini III grubu elementleri ile elde etmek kolaydır. Ancak p-tipi yarı iletken üretmek için ZnO'nun uyuşturulması zordur. P-tipi ZnO elde etmek için N, P, As, Sb ve Li gibi elementler deneysel olarak p-tipi katkı maddesi, darbe lazer biriktirme, magnetron püskürtme, kimyasal buhar biriktirme, moleküler ışın epitaksi, hibrid ışın biriktirme, metal organik kimyasal buhar biriktirme ve termal oksidasyon gibi farklı tekniklerle denenmiştir [59].

### 3.6.1. N-tipi katkılama

Wurtzit yapıya sahip ZnO, doğal olarak, Oksijen boşluğu ( $V_O$ ) ve Zn geçişi ( $Zn_i$ ) gibi içsel kusurlarından dolayı stokiyo-tremeden sapma nedeniyle n-tipi bir yarı iletken-dir. Katkısız ZnO yaklaşık  $10^{21} \text{cm}^{-3}$  lük çok yüksek elektron yoğunluğundan dolayı kendiliğinden n-tipi iletkenlik gösterir [60]. Katkısız ZnO'nun n tipi olduğu bilinse de  $V_O$  ve  $Zn_i$  tartışmalıdır. İlk temel çalışma, doğal kusurların hiçbirinin yüksek konsantrasyonlu sıg donör özellikleri göstermediği şeklindeydi [61]. Ancak, ZnO 'da yaklaşık 30–50 meV'lik bir iyonizasyon enerjisi ile  $V_O$ 'dan ziyade  $Zn_i$ 'nin baskın doğal sıg donör olduğunu öne sürmüştür [62].

ZnO'nun n-tipi katkılanması, p-tipi katkılanması ile karşılaştırıldığında nispeten daha kolaydır. III grubu elementlerinden Al, Ga ve In gibi III grubu elementleri Zn'nin yerine geçerek ve Cl ve I gibi VII grubu elementleri O'nun yerine geçerek n-tipi katkılama olarak kullanılırlar [63].

Al, Ga ve In ile katkılama birçok grup tarafından denendi ve yüksek kaliteli, yüksek iletken n-tipi ZnO filmleri elde edildi. Foto-dirençli MOCVD yöntemi ile Al-doped ZnO büyütüldü ve minimum  $6,2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  öz direnci olan yüksek iletken filmler elde edildi. Kimyasal-buhar biriktirme ile büyütülen Ga-katkılı ZnO filmlerin  $1,2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  kadar düşük öz direnç gösterdiği rapor edildi. Plazma destekli MBE yöntemi ile GaN şablonu üzerine Ga katkılı ZnO filmlerin üretimi yapıldı. Böylece, ZnO'nun n tipi katkılanması çok iyi gelişmiştir. Bu tür filmler, saydam omik kontakların yanı sıra ışık yayan diyotlarda n-tipi tabakalar olarak çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır [30].

Çizelge 3.3. Hesaplanan en yakın komşu bağ uzunlukları, negatif yüklü süstitüsyon katışıkları için kusur enerji seviyeleri ( $E_i$ ), pozitif yüklü AX merkezi oluşturmak için gereken enerji ( $\Delta E$ ) [64]

	Element	Bağ Uzunluğu(Å)	$E_i$ (ev)	$\Delta E$
	Li	2,03	0,019	0,21
1.Grup	Na	2,10	0,17	1,04
	K	2,42	0,32	1,38
	N	1,88	0,40	0,13
5.Grup	P	2,18	0,93	-0,46
	As	2,23	1,15	-0,18

### 3.6.2. P-tipi katkılama

GaN ve ZnSe gibi geniş bantlı yarı iletkenlerde p-tipi katkılama elde etmek çok zordur. Zorluklar çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Katkılar,  $Zn_i$  veya  $V_O$  ya da arka plandaki kirlilikler gibi düşük enerjili doğal kusurlarla telafi edilebilir. Katkının materyaldeki düşük çözünürlüğü de başka bir olasılıktır. Derin kirlilik seviyesi sığ akseptör seviyesinin oluşumuna önemli ölçüde direnç gösteren katkılama probleminin bir kaynağı olabilir [30]. Lityum (Li), sodyum (Na), potasyum (K), gümüş (Ag), gibi I. grup elementleri Zn'nin yerine geçerek veya azot (N), fosfor (P) ve arsenik (As) gibi V. grup elementleri O'nun yerine geçerek ZnO'nun p-tipi katkılanması yapılabilir [32]. Bununla birlikte bu elementlerin birçoğu derin akseptörleri oluşturur ve p-tipi ilettime önemli ölçüde katkıda bulunmamaktadırlar. Sığ akseptör seviyesine ulaşmada bazı zorluklar olsa da, p tipi ZnO için umut verici katkıların V. grup elementleri olduğuna inanılmaktadır.

Bir dizi teorik çalışma geniş bantlı yarı iletkenlerde katkılamanın temel mikroskopik yönlerini ele almıştır. Bu çalışmaların çoğu, katkılama çözünürlüğünün nasıl ele alındığı ile ilgilidir. Boşluklar, yarıklar gibi doğal kusurlar katkılamayı bozarlar, engel olurlar. Son zamanlarda, ZnO için çeşitli yer değişim kirlilikleri, pseudopotansiyel yönteminin ilk prensipleri kullanılarak p-tipi katkı olarak incelendi.

ZnO 'da p-tipi katkılama, I. Grup elementleri Zn'nin yerine geçerek veya V. grup elementlerinin Oksijenin yerine geçerek mümkün olabilir. Çizelge 3.3' de gösterildiği gibi I. Grup elementleri p tipi katkılamada daha iyidir, çünkü V. grup elementlerinin akseptör alıcı seviyeleri daha sığdır [30].

### 3.7. Uygulama Alanları

ZnO'dan birçok alanda yararlanılmaktadır. Daha çok ticari amaçlı tercih edilmekte ve sentetik olarak üretilmektedir ve üretim miktarı oldukça fazladır. ZnO kozmetik, tekstil, gıda, yazıcı mürekkepleri, yem sanayi, yer kaplamaları, kauçuk, sabun, eczacılık, boyalar, bataryalar, elektriksel ekipmanlar, çimento, yapıştırıcılar, diş dolgusu gibi malzemelerin yapımında kullanılmaktadır.

ZnO yüksek iyoniklik, yüksek yasak enerji aralığı, yüksek eksiton bağlanma enerjisi gibi özelliklerinden dolayı ticari amaçlı kullanımının yanı sıra bilimsel araştırmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce film bataryalar, güneş pilleri, UV dedektörler, ledler gaz, kimyasal ve biyolojik sensörler, piezoelektrik cihazlar, görüntü panelleri örnek olarak verilebilir.



#### 4. IŞIK YAYAN DİYOTLAR (LED'LER)

Led'ler ışık yayan yarıiletken p-n eklem diyotlardır. Bir p-n eklemde iletim yönlü akım oluştuğunda elektronlar ve deşikler p ve n yarıiletkenin birleştiği eklem bölgesinde karşılaşır. Bu durum kristal içindeki serbest elektronun, yarıiletken malzeme içine katılanmış ve son yörüngesinde bir elektron eksik olan iyonun bu son yörüngesindeki boşluğu doldurması olayıdır. Serbest halden bağlı hale geçen elektronun kaybettiği enerji yarıiletken malzemeye ya ısı olarak ya da ışık olarak gelir. Isı enerjisi yerine ışık enerjisi yani foton oluşabilmesi için p-n malzemenin direkt enerji bant geçişli olması gerekir.

Kızılötesi ve kırmızı renkli diyotlar ilk ışık yayan, küçük yoğunlukta ve düşük enerjili fotonlar yayabilen diyotlardı. Daha sonra sarı ve mavi ışık yayan Led'ler geliştirildi. Yarıiletken alaşım malzemeler kullanılarak farklı renkte ışık yayan ledler oluşturulmuştur. Işık yayan diyotların kullanım alanları oldukça fazladır. Aydınlatma, haberleşme, sinyalizasyon, otomotiv aydınlatması örnek olarak verilebilir [65].

Geleneksel UV ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında, UV Led'ler kompakt, sağlam, enerji verimli olmak gibi belirgin avantajlara sahiptir. Ayrıca, kullanım ömrünü, çıkış güçlerini artırma ve fiyatlarını düşürme konusunda çok parlak beklentileri vardır. Şu anda UV ışık kaynakları için en büyük pazar su dezenfeksiyonudur. Üç farklı su dezenfeksiyonu yöntemi vardır: klorlama, ozonizasyon ve UV tedavisi. Klorlama 1908'den beri geniş bir ölçekte tanıtıldı. Ozonizasyon işleminde, arıtılmış suda hiçbir tat ve koku oluşmaz, ancak hala ozonizasyon klorinasyondan çok daha az kullanılmaktadır. UV su arıtımı, klor arıtmasından daha ekolojiktir ve kullanımı geniştir. Temiz su birçok gelişmekte olan ülkede önemli bir konudur. 2007 Dünya Sağlık Örgütü raporuna göre, dünya genelinde 1,1 milyar insan şu anda kesinlikle kalitesiz su içiyor ve yılda 1,5 milyondan fazla insan kirli suyun neden olduğu ishal hastalıklarından ölüyor.

Geleneksel olarak, 253,7 nm'de cıva lambalarının emisyonu su dezenfeksiyonu için kullanılır. Mevcut UV Led'lerin çıkış gücü, hem bakteri hem de virüslerin dezenfeksiyonu için oldukça yeterlidir. Virüslerin dezenfeksiyonu genellikle bakterilerden daha yüksek bir UV dozu gerektirir. Dezenfeksiyon verimliliği için optimum dalga boyu seçimi de önemlidir. UV Led tedavisi, çeşitli yüzeylerin dekontaminasyonu ve gıda endüstrisinde ve tıpta dezenfeksiyon için de kullanılabilir. Kişisel kullanımda havayı dezenfekte etmek için

ultraviyole antiseptik bir maske 1992 yılında UV Led'lerinin geliştirilmesinden önce patent almıştır. Led'lerin uygulanması böyle bir cihazı gerçekten taşınabilir ve etkili kılar. Derin UV Led tabanlı arıtma ekipmanının kirlilik algılama sistemleri ile kombinasyonu, kirlenme seviyesinin belirli bir değerin altında azaltılmasını ve bakımını sağlamak için otomatik bir geri bildirim sağlar.

UV Led spektroskopik çalışmalarda uyarma için prospektif bir ışık kaynağıdır. Led'lerin uygulanması, spektroskopik sistemlerin boyut, ağırlık ve enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır ve tehlikeli kimyasal ve biyolojik etmenler tespiti için taşınabilir, sağlam ve otonom cihazların üretilmesini sağlar. Bu tür cihazlar, tehlikeli madde konsantrasyonunun izlenmesi veya terörist saldırılarda ajanların ani salınımının tespit edilmesi için kullanılabilir. Led modülasyon spektroskopisi için çok uygun bir ışık kaynağıdır. Bir UV Led'in çıkış gücü, sürüş akımının modülasyonu ile 300 MHz frekansına kadar kolayca modüle edilebilir. Bu özellik, onlarca yıl önce çeşitli sistemlerde uyarma dinamiklerini takip etmek için geliştirilmiş olan, zamana bağlı lazer spektroskopisinin piyasaya sürülmesinden önce bile frekans alanı floresans ömrü ölçümlerinde başarıyla kullanılmaktadır. Frekans alanı floresans ömrü ölçüm tekniğinde, malzeme modüle yoğunluk ışığı ile uyarılır. Fotoluminesans yanıtı, sonuç olarak, aynı zamanda, belirli bir faz kayması ve değiştirilmiş bir modülasyon derinliği ile modüle edilir. Tehlikeli maddelerin tespitinde, floresan ömrünü çıkarma yeteneği, tespit edilecek maddenin emisyon spektrumları genellikle geniş ve örtüştüğü için floresan spektroskopisi için değerli bir takviyedir. Yaygın emisyon dalga boyu seçimi ile Led'lerin uygulanması seçici uyarma için etkili fırsatlar sunar. Tüm bu özellikler, tehlikeli kimyasal ve biyolojik etmenlerin saha tespiti için kompakt, sağlam, düşük enerji tüketimi taşınabilir bir cihazda kullanılabilir

InGaN/GaN tabanlı mavi ve beyaz ışığın önemli gelişmelerinden sonra UV bölgesi içerisinde yayılan Led'lerin geliştirilmesi için önemli girişimlerde bulunmaktadır. UV ışınımının uzun dalga boyu kısmı toplamda 400 nm ila 10 nm arasında üç bölgeye ayrılmıştır. Bunlar: Uzun dalga boyları UV-A (400–320 nm), orta dalga boyları aralığı UV-B (320-290 nm) ve kısa dalga boyları aralığı UV-C (290–200 nm). Daha kısa emisyon dalga boylarını elde etmek için geniş bant aralıklı AlGaN, AlInGaN veya InAlN bileşikleri kullanılır. UV Led'lerin gelişimi, zaten çok büyük pazarlara sahip olan InGaN tabanlı mavi, yeşil ve beyaz Led'lerin gelişiminin gölgesinde ilerler. InGaN ve geniş bant aralıklı III-nitridlerin büyümesindeki birçok problem benzerdir, bu nedenle InGaN'nin çalışma ve

teknolojisinde edinilen bilgi ve tecrübe, UV Led'lerin gelişimine verimli bir şekilde aktarılmaktadır. UV-A bölgesinde yayılan Led'ler endüstriyel ölçekte üretilmektedir.

UV-A bölgesinde yayılan Led'ler, derin UV Led'lerden daha yüksek çıkış gücüne ve daha uzun ömre sahiptir ve endüstriyel ölçekte çok sayıda uygulama bulmuştur. 300 - 365 nm aralığında yayılan UV Led'leri ayrıca çeşitli polimerleri, yazıcı mürekkeplerini, yapıştırıcıları, cilaları ve kaplamaları sertleştirmek için de kullanılır. UV-B bölgesinde yayılan Led'ler, fototerapi ve foto kemoterapi için tıpta kullanılır. 311–313 nm dalga boyları, sedef hastalığının fototerapisi için en etkili olanıdır. Led'ler vitiligo, egzama ve diğer cilt hastalıklarını iyileştirmek için de kullanılabilir.

Banknotlar, kredi ve kimlik kartları, pasaportlar ve ehliyet gibi hassas belgelerin sahteciliğinin önlenmesine yardımcı olmak için genellikle yalnızca UV aydınlatması altında görünen filigran veya lifler bulunur. Filigranları kontrol etmek için UV flüoresan lamba bazlı cihazlardan çok kompakt Led tabanlı UV ışık kaynakları çok daha kullanışlıdır. Led lambalar aynı zamanda adli tıpta, saha koşullarındaki kaya ve minerallerin tanımlanmasında ve diğer uygulamalarda da kullanılır. Önemli başarılarla rağmen, derin UV Led'ler hala kompaktlık, düşük enerji tüketimi, kolay çıkış modülasyonu gibi esasen yeni özellikler sağlayan yıkıcı bir teknolojidir. Sonuç olarak, bu UV kaynakları için çeşitli, tamamen yeni uygulamalar gelecekte ortaya çıkabilir. Örneğin, son zamanlarda ek UV-B radyasyonunun bitkilerdeki fenolik bileşiklerin içeriğini arttırdığı ve hasattan sonra depolama sırasında onları korumaya yardımcı olduğu gösterilmiştir. UV Led'lerinin iyileştirilmesi bu teknolojiyi uygun maliyetli hale getirebilir [66].

#### **4.1. ZnO Tabanlı Led'ler**

ZnO, ucuz, kimyasal olarak kararlı, hazırlanması ve aşınması kolay ve toksik değildir, bu da ZnO tabanlı optik cihazların üretimini cazip bir ihtimal haline getirir. GaN tabanlı optoelektronik ve elektronik cihazların ticari başarısı, ZnO tabanlı cihazlara olan ilgiyi artırır. Son zamanlarda, p-tipi ZnO üretimi, mono-doping grup V elemanları (N, P, As ve Sb) ve iyon implantasyonu, darbeli lazer birikimi (PLD), moleküler ışın epitaksi (MBE) gibi çeşitli teknolojilerle birlikte doping III-V elemanları tarafından büyük ilerleme kaydetmiştir. Birçok araştırmacı, n-tipi bir GaN tabakası üzerine biriken p-ZnO veya iletken oksitlerin, AlGaIn, p-tipi GaN katmanlarında biriken n-ZnO kullanarak

homojunction ZnO Led'lerinin ve heteroeklem Led'lerinin gelişimi üzerine çalışmalar yapmıştır. ZnO tabanlı Led'ler laboratuvardan fabrikaya geçmiş durumdadır. Birçok şirket pazar için ultraviyole ve beyaz Led'ler geliştirmektedir. Renkli ZnO tabanlı Led'ler, tam renk potansiyelini gösteren Start-up şirketi MOXtronics tarafından üretilmiştir. Bu Led'lerin verimliliği yüksek olmasa da, iyileştirmeleri hızlıdır ve yayıcılar GaN rakiplerinden daha iyi performans gösterme potansiyeline sahiptir [66].

#### 4.1.1. Heteroeklem Led'ler

ZnO ultraviyole (UV) ışık yayan diyotlar (Led'ler) ve lazer diyotlar için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Kararlı, yüksek kaliteli p-tipi ZnO'nun tekrarlanabilir üretimi ZnO tabanlı homojunction Led'lerin gelişimini engelleyen bir zorluktur. p-GaN, p-Si, p-NiO, gibi p tipi malzemeleri kullanarak heterojonksiyon cihazlar üretilmektedir. Bunlar arasında GaN, benzer enerji bandı yapısı ve ZnO ile küçük kafes uyumsuzluğu nedeniyle en uygun olanı olarak kabul edilmiştir. n-ZnO/p-GaN heterojonksiyonunun aşamalı bant uyuşması (Tip II) kaçınılmaz olarak arayüzeyde elektron deşik rekombinasyonu için bağlantı noktasını geçebilen ve cihazın performansını düşüren düşük enjekte edilmiş taşıyıcılarla sonuçlanan bir enerji bariyerine neden olur. Bu sorunu çözmek için, taşıyıcı injeksiyonunu iyileştirmek için tek boyutlu ZnO nanorod'lar (NRs) uygulanır. ZnO NRs / p-GaN Led'leri, p-GaN tabakasının doğal olarak yüksek direnci nedeniyle düşük ışık çıkışından zarar görür.

Yüksek dirençlilik, p-GaN tabakası içinde zayıf bir akım yayılmasıyla sonuçlanabilir ve homojen olmayan ışık yayılımı sağlar. Ayrıca, yüksek akım seviyesinde birleşim ısıtma etkisi n-ZnO/p-GaN heteroeklem Led'ler için ticari uygulama gerçekleşmesini engelleyen cihaz çalışması, başarısızlığa yol açar.

ZnO, UV Led'lerde ve lazer diyotlarda ümit verici uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Yüksek kaliteli p tipi ZnO'nun üretimi oldukça zordur. P tipi malzeme üzerine büyütülen n tipi ZnO'lu heteroeklem Led'ler hakkında pek çok araştırmacı çalışmalar yapmıştır. MBE n-ZnO / MOCVD p-GaN heteroeklem ışık yayan diyotunu bildirildi. MOCVD ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üzerinde 1-µm kalınlığında katkısız GaN tampon katmanı ve MOCVD ile 500-nm kalınlığında Mg doplu p-GaN katmanı büyütüldü ve p-GaN katmanında MBE ile 300 nm kalınlığında n-ZnO büyüttüler. 570 nm'de zirveye ulaşan

geniş sarımsı yeşil bir emisyon gözlemlendi.  $Al_2O_3$  substratı üzerinde bir n-ZnO: Ga / p-GaN: Mg heteroyapısı üretildi. Katkısız ZnO (tampon tabakası) ve yaklaşık % 1 Ga ile katkılı n-ZnO filmleri, sırasıyla % 100  $O_2$  atmosferinde,  $800^{\circ}C$  ve  $700^{\circ}C$ 'de 75W radyo frekansı (rf) gücünde büyütüldü. I-V karakteristikleri, oda sıcaklığındaki n-ZnO: Ga / p-GaN: Mg heteroyapısından elde edilen EL emisyonlarını 430 nm, 440 nm ve 480 nm'de geniş bantlı sarı ışıkla birlikte gösterdi.

Tavlanmış n-ZnO / p-GaN heteroyapı Led'in emisyonunun kökeni araştırıldı. MOCVD (GaN katmanı) ve rf püskürtme (ZnO katmanı) ile  $Al_2O_3$  substratları üzerinde n-ZnO / p-GaN heterojen Led'i üretildi. İmalattan sonra, ZnO filmleri 30-120 dakika boyunca  $800^{\circ}C$ 'de hava ve azot ortamında bir termal fırın içinde tavlandı. Led için  $N_2$ 'de tavlanmış, tepe noktası dalga boyu 400nm olan mavi bölgede oda sıcaklığı EL gözlemlendi ve  $N_2$ 'de tavlanmış Led için, EL emisyon spektrumunda 400 ila 700 nm arasında geniş bir bant tespit edildi [59].

#### 4.1.2. ZnO nanomalzemeli heteroeklem ledler

Taşıyıcıların zenginleştirilmiş radyasyon rekombinasyonu gibi gelecek vaat eden optik özelliklerinden dolayı ZnO nanomalzemeleri kullanan optik cihazlar büyük ilgi görmektedir. Çeşitli ZnO nanomalzemeleri farklı yöntemlerle büyütülmüştür. Led'ler optik bağlantı ve yüksek yoğunluklu veri depolama, yüksek çözünürlüklü elektronik ekranda büyük potansiyel uygulamaları sergileyen % 2,5 verimlilikle harici bir kuantum verir. ZnO tabanlı Led'lerin verimliliği yüksek olmasa da gelişmeleri hızlıdır ve yayıcılar GaN rakiplerinden daha iyi performans gösterme potansiyeline sahiptir. ZnO tabanlı LED'ler gelecek için büyük umutlar veriyor, ancak ZnO tabanlı Led'lerin ticari kullanıma geçişi için mevcut aşamadan daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyan bazı ciddi sorunlar vardır. Eşik değerine sahip p-n kavşağı ve Led'ler için arıza gerilimleri gereklidir. Ek olarak, diyot benzeri davranış ve ışık emisyonu gözlenmiştir, ancak özelliklerin mekanizması belirsizliğini korumaktadır [59].

#### 4.2. Nitrat Tabakalar

III-nitrat yarıiletkenlerin sahip olduğu fiziksel özelliklerinden dolayı elektronik ve optoelektronik teknolojisinde pek çok kullanım alanları vardır. Bu materyaller ( $AlN$ , GaN

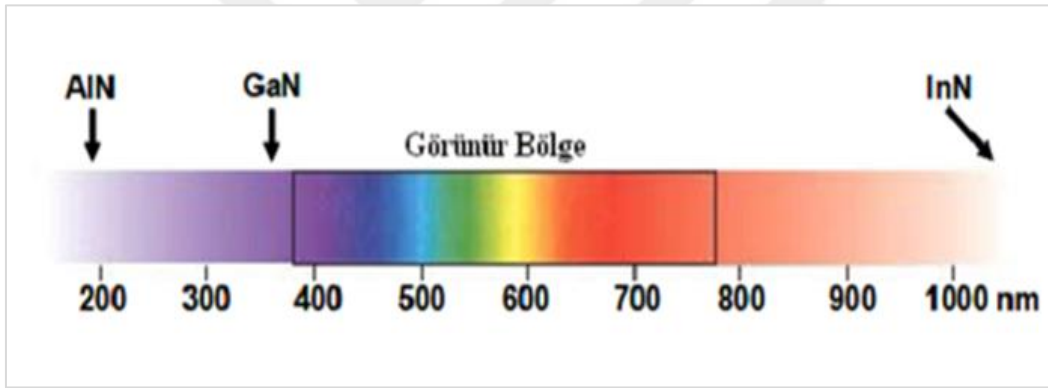
ve InN) wurtzite yapıda kristallenir. Doğrudan bant aralığına sahip nitratların en önemli özelliklerinden biri de AlGa<sub>N</sub>, InGa<sub>N</sub>, InAlN ve AlGaInN gibi üçlü ve dörtlü bileşiklerinin üretilmesidir. Bu bileşiklerin enerji bant aralıkları, 0,7 eV (InN), 3,4 eV (Ga<sub>N</sub>) ve 6,1 eV (AlN)'dir. Çok geniş dalga boyu aralığına sahiptirler. Bu özelliği III-nitrat yarıiletkenlerin, görünür ve morötesi bölgede işlem yapan ışık yayan diyotlar (Led), lazer diyotlar, fotodetektörler, optiksel modülatör, anahtarlamalar vb. gibi birçok optoelektronik aygıtın üretilmesinde ve geliştirilmesinde çok önemli olduğunu göstermektedir. Nitrat temelli Led'ler yüksek parlaklığa sahiptir. Pek çok ülkede birçok pratik uygulama alanı bulmuştur. Örnek verecek olursak, trafik lambalarında, reklam panolarında, trafik işaretlerinde, stadyumlarda, alışveriş merkezlerinde, büyük caddelerde düz ekran televizyonlarda nitrat temelli Led'lerin kullanılması güç tüketimi, maliyet ve verimlilik açısından şuan kullanılan cihazlara nazaran daha avantajlı olduğu bilinmektedir. Görünür ışık ve morötesi ışık kaynaklarının kullanım alanları tıp, tarım, spektroskopik ölçüm sistemleri gibi çok geniş alanda yer bulmaktadır.

III-nitrat grubu yarıiletkenler aynı zamanda elektronik teknolojisi için yoğun olarak araştırılan malzeme gruplarından birisidir. Al(In)Ga<sub>N</sub>/(In)Ga<sub>N</sub> yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT) yapıların yüksek frekanslı ve yüksek güçlü mikrodalga uygulamaları için istenen geniş bant aralığı, kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyon alanına sahip olması, ısı iletkenliğinin iyi olması, HEMT yapıların askeri ve ticari alanda (elektronik gözetimlerde, yüksek hızlı iletişimlerde, gemi ve uçak radarlarında, uydu iletişimlerinde, telsizlerde ve elektronik savaşlarda karıştırıcı olarak) kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak bu alanda var olan teknolojinin rekabetinden dolayı Ga<sub>N</sub> tabanlı elektronik cihazların gelişimi, optoelektronik uygulamalar kadar hızlı gerçekleşmemektedir. Nitratların sahip olduğu büyük bant aralığı, birim alandaki akım yoğunlukları ve maksimum alan şiddetleri diğer yarıiletken cihazlara göre oldukça fazladır [67].

Safir üzerine Ga<sub>N</sub> büyütülmesi çalışmaları ilk olarak 1969 yılında Hidrat Buhar Epitaksisi (HVPE) yöntemiyle başlamıştır (Çizelge 4.1.). 1971'de ilk metal yalıtkan-yarıiletken (MIS) ışık yayan diyot yapısı gösterildi fakat 1989 yılına kadar Ga<sub>N</sub> üzerine çok az sayıda araştırma yayınlanabilmiştir. 1992'den bu yana III grubu nitratları üzerine yapılan çalışmalar hızlı bir yükseliş göstermektedir. Çiftli hetero yapılı Led'lerden, yüksek elektron mobiliteli transistörlere (HEMT) kadar çoğu yapı nitratlı bileşiklerle elde edilmiştir. Ga<sub>N</sub> malzemesini elde etmek için zaman içerisinde farklı yöntemler

geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmı avantajları veya dezavantajları nedeni ile katı (bulk) GaN elde etmede kullanılırken bir kısmı da ince film teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ince GaN filmleri elde etmede kullanılmaktadır. Bu yöntemler; Moleküler Demet Epitaksisi (MBE), Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi (MOVPE), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Hidrat Buhar Fazı epitaksisi (HVPE), “Sublimation Sandwich Tekniği” olarak sayılabilir [68].

Nitrat tabanlı bileşiklerdeki wurtzite kristal yapısı geniş bant aralıklarını kapsar. AlN için 6,2 eV, GaN için 3,4 eV olan bu değer InN da 0,7-1,0 eV'e kadar iner. Geniş bant aralıklarından dolayı GaN gibi yarıiletken malzemeler güçlü bağ yapılarından dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılırlar [68]. Şekil 4.1.'de nitrat yarıiletkenlerin dalga boyu spektrum dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.1. III Grubu nitratların dalga boyu spektrumu [68]

GaN geniş ışık kapasitesine sahip, mekanik dayanımı yüksek ve sert yapılu bir bileşiktir. Saf halde kolay kırılğan yapılu değildir. Safir ve SiC gibi altaşlar üzerine ince film olarak depozit edilebilir. Si ile katkılandırılarak n- tipi GaN, magnezyum ile katkılandırılarak p- tipi GaN elde edilebilir. Aynı zamanda GaN'a silisyum veya magnezyum ile katkılama yapma farklı GaN elde etme yöntemleri gerektirebilir. Katkılama yapma örgü yapısında bazı kusurlara sebep olabileceği için oluşabilecek gerilme zorlanımları GaN'ı kırılğan hale getirebilir. GaN'ın örgü sabiti ve ısıl iletkenliği gibi bazı özellikleri safir, SiC ve Si gibi farklı altaşlar kullanılarak ince film olarak büyütülmesine imkân verir.

Çizelge 4.1. Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi [68]

Yıl	Gelişmeler	Araştırmacılar
1969	Safir üzerine GaN (HVPE yöntemi ile)	Maruska ve ark.
1971	Safir üzerine MIS LED (HVPE) Safir ve SiC üzerine GaN (MOCVD yöntemi ile)	Pankova ve ark. Mankova ve ark.
1983	Safir üzerine AlN tabaka (MBE yöntemi ile)	Yoshida ve ark.
1986	Safir üzerine AlN tampon kullanılarak çok düzgün yüzeyli GaN elde edildi (MOCVD)	Amona ve ark.
1989	p-tipi GaN, Mg katkılı GaN, GaN p-n birleşimli LED (MOCVD)	Amona ve ark.
1992	Isıl işlem ile Mg aktivasyonu safir üzerine AlGaIn/GaN iki boyutlu elektron gazı (2DEG) (MOCVD yöntemi ile)	Nakamura ve ark. Khan ve ark.
1993	AlGaIn/GaN heteroyapıda piezoelektrik etkinin teorik çalışmaları	Bykhovski ve ark.
1994	InGaIn/AlGaIn DH mavi LED safir üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı (MOCVD)	Nakamura ve ark. Khan ve ark.
1995	Safir üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı (MBE)	Özgür ve ark.
1996	Katkılı kanallı AlGaIn/GaN HEMT(MOCVD) ilk mavi renkli lazer diyot	Khan ve ark. Nakamura ve ark.
1997	Piezoelektrik etkinin deneysel sonuçları SiC üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı LiAlO <sub>2</sub> üzerine GaN (MBE yöntemi ile) LiAlO <sub>2</sub> üzerine GaN (MOCVD yöntemi ile)	Asbeek ve ark. Binari ve ark. Hellman ve ark. Kryliouk ve ark.
1998	GaN/Al <sub>0.15</sub> Ga <sub>0.85</sub> N mor ve UV-LED (MBE)	Guha ve ark.
1998	Silisyum üzerine InGaIn/GaN LED (MBE)	Bojarcezuk ve ark.
1998	İlk GaN/AlGaIn MQW LED (353 nm)	Han ve ark.
1999	Silisyum üzerine InGaIn/GaN LED (MOCVD)	Tran ve ark.
2000	Silisyum üzerine AlGaIn/GaN-2DEG-(MOCVD)	Kaiser ve ark.
2001	Silisyum üzerine AlGaIn/GaN HEMT (MBE)	Semond ve ark.
2001	İlk 340 nm UV-A LED	Adivarahan ve ark.
2001	İlk 315 nm LED	Khan ve ark.
2001	İlk 305 nm UV-B LED	Khan ve ark.
2002	LiAlO <sub>2</sub> üzerine GaN (HVPE yöntemi ile)	Chen ve ark.
2003	Silisyum üzerine InGaIn/GaN MQW yapısında optik pompalama yolu ile lazer aktivitesi	Dikme ve ark.
2008	AlInN/GaNDBR üzerine mavi led	Ishikawa ve ark.
2008	150mm(001) Si üzerine InGaIn/GaN mavi Led	Schulze ve ark.
2004	ELO AlGaIn üzerine UV LED	Amano ve ark.
2005	LiAlO <sub>2</sub> üzerine InGaIn/GaN LED yapısından elektrolüminesans elde edildi. (MOCVD)	Dikme ve ark.
2006	İlk AlN deep UV-LED (210 nm)	Taniyasu ve ark.
2008	UV-LED için SiC üzerine AlN ve AlGaIn	Amano ve ark.

GaN'ın büyütüleceği uygun alt taş malzemenin bulunmasının zor olması, tabakaların çoğunlukla n- tipi iletkenlik göstermesi, yüksek erime sıcaklığı ve yüksek denge buhar basıncına sahip olduğu için tek kristal halinde büyütülmesinin oldukça zor olması, GaN alt

taşları temin etmenin güç olması gibi durumlarından dolayı GaN'ın diğer alttaşlar üzerine büyütülmesi ile ilgili gerekli inceleme ve araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda mekaniksel ve kimyasal dayanıklılığa sahip aynı zamanda maliyeti düşük olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün alt taş olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e ait parametreler Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e ait temel parametreler [68]

Parametreler	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kristal yapısı	Hekzagonal-Rombohedral-Trigonal
Koordinasyon geometrisi	Oktahedral
cm <sup>3</sup> 'deki atom sayısı	2,35x10 <sup>22</sup>
Erime sıcaklığı	2030 °C
Yoğunluğu	3,98 g/cm <sup>3</sup>
Kırılma alanı	4x10 <sup>5</sup> V/cm
Özdirenç	10 <sup>11</sup> -10 <sup>16</sup> Ωcm
a örgü sabiti	0,476 nm
c örgü sabiti	1,3 nm
a için ısı iletkenlik katsayısı	5,0x10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup>
c için ısı iletkenlik katsayısı	9,03x10 <sup>-6</sup> C <sup>-1</sup>

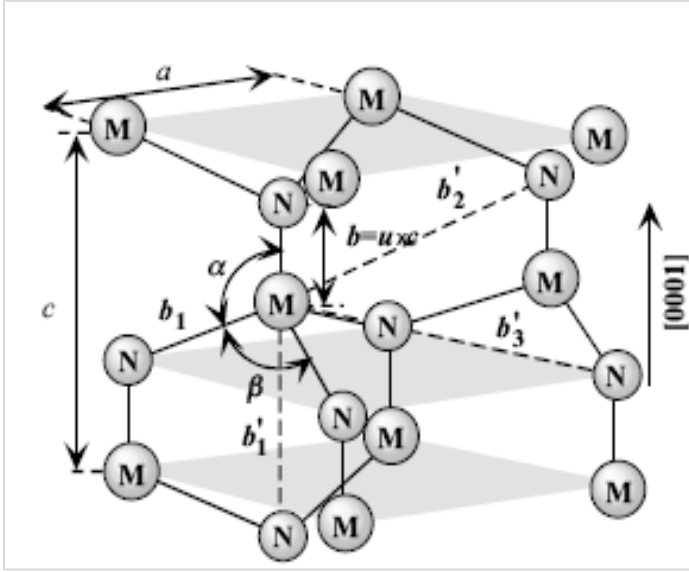
Oluşan bazı olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, GaN ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alt taş arasına düşük sıcaklıklarda AlN tampon tabaka büyütülmektedir. AlN tampon tabaka oluşturmanın sebeplerinden biri GaN ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> arasındaki örgü uyumsuzluğunu ve ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkı gidermek, diğeri ZnO ve GaN arasında oluşabilecek GaO<sub>x</sub> oksit tabakalarının oluşmasını engellemektir. Ayrıca AlN tampon tabaka uygulamasının GaN'ın yüzey yapısını düzenlemeye katkı sağladığı da gösterilmiştir [68].

#### 4.2.1. Nitratların kristal yapısı

III-nitrat yarıiletkenler, wurtzit, çinko sülfür ve NaCl (kaya tuzu) yapıda kristalleşirler. AlN, GaN, InN yapıların NaCl yapıda kristalleşebilmesi için çok yüksek dış basınca ihtiyaç vardır. GaN ve InN çinko sülfür yapı sadece Si, SiC, MgO, GaAs gibi kübik alt tabakalar üzerinde heteroepitaksiyel büyütme ile kararlı hale gelir. AlN, GaN, InN bulk yapılar için termodinamik olarak en kararlı yapı ise hegzagonal yapı olan wurtzit yapısıdır. Wurtzit yapıda bağ başına bağlanma enerjisi AlN için 2,88 eV (63,5 kcal/mol), GaN için

2,20 eV (48,5 kcal/mol) ve InN için 1,93 eV (42,5 kcal/mol)' dur [69]. Wurtzit ve çinko sülfür arasında hesaplanan enerji farkı  $\Delta E_{W-ZB}$ , AlN için -18.41 meV/atom, GaN için -9,88 meV/atom ve InN için -11,44 meV/atom' dur. Enerji farkının küçük olmasına rağmen wurtzit yapının çinko sülfür ve kaya tuzu yapılarına göre kristallenmesi termodinamik açıdan daha uygundur.

Wurtzit yapı, iki adet sıkı paket altıgen yapının iç içe geçmesi ile oluşur. Her birim hücrede 4 tane atom yer alır. Tetrahedral bağ yapısına sahip (atomlar arasındaki açı  $109^\circ$ ) wurtzit yapıda en yakın komşu sayısı 4, ikinci en yakın komşu sayısı 12' dir. Wurtzite yapı a ve c örgü parametresine sahip olup ideal bir wurtzit yapı için  $c / a = 1,633$  değerindedir. Bu yapı için bir diğer parametre ise anyon ve katyon arasındaki bağ uzunluğu b 'nin (veya en yakın komşular arası bağ uzunluğu) c ' ye oranı olan u parametresini verir. İdeal bir wurtzit yapı için  $u = 0,375$  değerindedir.



Şekil 4.2. Wurtzite metal nitrat yapısının şematik gösterimi

Tüm wurtzit III-nitratlarda deneysel olarak gözlenen  $c / a$  değerleri ideal değerlerden daha küçüktür. Bu değerlerdeki değişikliğin sebebinde iki durum dikkate alınabilir: Bunlar  $c / a$  oranının veya  $u$  değerinin değişimidir. Burada  $c / a$  oranı ile  $u$  parametresi arasında güçlü bir korelasyon olduğu belirtilmektedir.  $c / a$  oranı azaldığında dört tetrahedral uzaklığı hemen hemen sabit tutmak için tetrahedral açıların bozulumu yoluyla  $u$  parametresi artar. Eşit bağ uzunluğunun değişmemesi için aşağıdaki ilişkinin sağlanması gerekir.

$$u = \frac{1}{3} \frac{a^2}{c^2} + \frac{1}{4} \quad (4.1)$$

$$b=cu \quad b_1 = \sqrt{\frac{1}{3}a^2 + \left(\frac{1}{2} - u\right)^2 c^2} \quad (4.2)$$

c doğrultusunda en yakın komşu bağ uzunluğu b ve c doğrultusu dışında olan en yakın komşu bağ uzunluğu b<sub>1</sub> aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$b'_1 = c(1 - u) \quad b'_2 = \sqrt{a^2 + (uc)^2} \quad \text{ve} \quad b'_3 = \sqrt{\frac{4}{3}a^2 + c^2\left(\frac{1}{2} - u\right)^2} \quad (4.3)$$

şeklindedir. Bağ açıları  $\alpha$  ve  $\beta$

$$\alpha = \pi / 2 + \arccos \left[ \left( \sqrt{1 + 3 \left(\frac{c}{a}\right)^2 \left(-u + \frac{1}{2}\right)^2} \right)^{-1} \right] \quad (4.4)$$

$$B = 2 \arcsin \beta = 2 \arcsin \left[ \left( \sqrt{\frac{4}{3} + 4 \left(\frac{c}{a}\right)^2 - u + 1/2} \right)^{-1} \right] \quad (4.5)$$

eşitlikleri ile verilir.

Kristal örgü parametresi genellikle oda sıcaklığında yüksek çözünürlüklü Xışını kırınım (HRXRD) tekniği ile belirlenir. Aynı zamanda bu teknik üçlü veya dörtlü bileşiklerde kompozisyon oranının belirlenmesinde kullanılan bir tekniktir. Bununla beraber, epitaksiyel tabakalar yabancı alttabakalar üzerine büyütüldüğünde zorlamalar, örgü parametresi hesapları da dikkate alınmalıdır. Örgü parametresi, serbest elektron yoğunluğu, yabancı atom ve kusurların yoğunluğu, dış zorlamalar (örnek olarak alttabakanın neden olduğu zorlamalar), sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır [70].

#### 4.2.2. Nitratların mekanik özellikleri

Materyallerin mekanik özellikleri sertlik, sağlamlık, piezoelektrik sabitleri ve gerilme gibi kavramlarla ilişkilidir. Hekzagonal kristallerde beş adet bağımsız elastik sabit vardır. Bunlar  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{33}$  ve  $C_{44}$  tür..  $C_{11}$  ve  $C_{33}$  elastik sabitleri sırasıyla [1000] ve

[0001] yönlerinde boyuna moda karşılık gelir.  $C_{44}$  ve  $C_{66} = (C_{11} - C_{12}) / 2$  elastik sabitleri sırasıyla [0001] ve [1000] yönlerinde yayılan enine modların ses hızından belirlenir.  $C_{13}$  elastik sabiti ise [0011] gibi daha az simetrik olan yönde yayılan moda karşılık gelir. Elastik sabitleri ile ilgili olan bulk modülü  $B$  ;

$$B = \frac{(C_{11}+C_{12})C_{33}-2C_{13}^2}{C_{11}+C_{12}+2C_{33}-4C_{13}} \quad (4.6)$$

eşitliği ile verilir. Young modülü  $E$  eşitliği ise

$$E = 3B / (1-2\nu) \quad (4.7)$$

ile verilir.

Burada  $\nu = C_{13} / (C_{11} + C_{12})$  olup poisson oranını ifade eder.

III-nitrat yarıiletkenleri yüksek ısıl iletkenliğine sahiptir. Bundan dolayı termal özelliklerin anlaşılması için titreşim modlarının bilinmesini gerektirir [71]. Nitratlarda sınır ve merkez bölgesi fonon modlarının belirlenmesi için kızılötesi yansıma (Infrared Reflection) ve Raman Spektroskopisi kullanılır. Nitratların vurtzit kristal yapısı  $C_{6v}^4$  simetrisine sahip olduğu için grup teorisi  $\Gamma$  bölge merkezinde sekiz tane fonon normal modları oluşur.  $2A_1$ ,  $2E_1$ ,  $2B_1$ ,  $2E_2$ .  $A_1$  ve  $B_1$  modları  $c$  eksenine boyunca atomik yerdeğiştirme,  $E_1$  ve  $E_2$  modları ise  $c$  eksenine dik (taban düzlem) atomik yerdeğiştirmeyi ifade eder.  $A_1$  ve  $E_1$  kolları Raman ve Infrared' in her ikisi için aktif,  $E_2$  kolları sadece Raman-aktif.  $B_1$  ise aktif değildir, sakin moddur. Bunlar arasında  $A_1$  ve  $E_1$  mod kümesi akustik, kalan altı mod kümesi ise optik kolları oluşturur.  $A_1$  ve  $E_1$  modlar boyuna ve enine olarak iki bileşene ayrılır. Böylece optik modları boyuna optik (LO) ve enine optik (TO) olarak, akustik modlar ise boyuna akustik (LA) ve enine akustik (TA) olarak gruplandırılır [72].

#### 4.2.3. Nitratların optik özellikleri

Yarıiletkenlerin içsel ve dışsal etkilere bağlı olan özelliği optiksel özellikleridir. İçsel optiksel geçişler iletkenlik bandındaki elektronlar ile valans bandındaki boşluklar (deşik) arasında coulomb etkileşim ile meydana gelen eksitonik etkilerini içerir. Eksitonlar serbest

ise yani hiçbir merkezle etkileşmiyorlarsa, bağlı nötr veya iyonize olmuş sıg safsızlık merkezleri, derin safsızlık merkezleri ya da yarıiletken örgüsündeki diğer kusurlar gibi çekici merkezlere bağlı eksitonlar olarak sınıflandırılırlar. Düşük safsızlık konsantrasyonlu yüksek kaliteli numunelerde serbest eksitonlar taban durumu geçişlerine ilave olarak uyarılmış durumlar sergileyebilirler. Bağlı eksitonların elektronik durumları yarıiletken materyale özellikle yarıiletkenin bant yapısına bağlıdır. elektrolüminesans, fotolüminesans, optik soğurma, geçirgenlik, yansıma, fotoyansıma, spektroskopik elipsometre, zaman çözümlü fotolüminesans, katodolüminesans, kalorimetrik spektroskopi gibi deneysel tekniklerle kullanılarak III-nitratların optiksel özellikleri belirlenir [72].

#### 4.2.4. Nitratların elektriksel özellikleri

III-nitratlar doğrudan ve büyük bant aralığına sahip oldukları için çeşitli elektronik ve optoelektronik uygulamalarda tercih edilen materyallerdir. Sahip olduğu avantajlar büyük bant aralıklı olması yüksek kırılma voltajı, büyük elektrik alanlara dayanma yeteneği, düşük gürültü oluşumu, yüksek sıcaklık ve yüksek güçte çalışması şeklinde sıralanabilir. İletkenlik bant minimumunda küçük etkin kütleler, oldukça düşük alan mobilitesine, yüksek uydu enerji dağılımına ve yüksek fonon frekansına neden olur. Nitrat içeren yarıiletkenlerde elektron iletimi düşüktür. Ve yüksek elektrik alan durumları vardır. Yeteri kadar düşük elektrik alanlarda, elektronlar tarafından kazanılan enerji, elektronların ısı enerjisiyle kıyaslandığında daha küçüktür. Bu sebeple elektronların enerji dağılımları düşük bir elektrik alan tarafından etkilenmez. Elektron mobilitesini belirleyen saçılma oranı elektron dağılım fonksiyonuna bağlı olduğundan elektron mobilitesi uygulanan elektrik alandan bağımsızdır ve ohm yasasına uyar. Dış alanın etkisi ile elektronların kazandığı enerji elektronların ısı enerjisi ile karşılaştırılabilir noktaya kadar arttırıldığı zaman elektron dağılım fonksiyonu denge durumundan büyük ölçüde değişiklik gösterir. Bu elektronların elektron sıcaklığı örgü sıcaklığından daha büyük olduğu için sıcak elektron olarak isimlendirilir.

Elektriksel özelliklerin belirlenmesi için kullanılan yöntemler yüksek hızlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri, hall etkisi, Shubnikov de Haas etkisi (SdH) yöntemleridir. Hall etkisi tekniği en çok kullanılan tekniktir. Bu teknik yarıiletken maddelerin mobilitesi, taşıyıcı yoğunluğu, tipi hakkında bilgi verir. SdH yöntemi yüksek manyetik alan etkisi altında elektriksel dirençtir. Bu yöntemle taşıyıcı yoğunluğu, etkin kütle, taşıyıcı mobilitesi

belirlenebilir. Bu iki ölçüm omik davranışın sergilendiği, yeterince düşük elektrik alanlarda kullanılır. I-V ölçümlerinin bu iki teknikten farklıdır. I-V ölçümleri ile sıcak elektron durumunun söz konusu olduğu yüksek elektrik alanlı deneysel ölçüm yapılır. Bu teknik ile taşıyıcı sürüklenme hızı ve mobilitesi elektrik alanın şiddetine bağlı olarak belirlenir [72].



## 5. İNCE FİLM KAPLAMA VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

İnce film oluşturmak için depolanacak ince filmlerin özellikleri, filmlerin kullanım alanları, kaynak ve alttaş malzemelerin sıcaklık optimizasyonu, homojenite ve kalınlık, biriktirme hızı ve ticari maliyetler gibi durumlar uygun kaplama tekniğini belirlemede de dikkate alınan faktörlerdir. Bu sebeplerden dolayı ince filmlerin mikro/nano yapısı ve istenilen bileşim/sitokiyometri, kaynak ve alttaş malzemelerin yarattığı sınırlamalardan dolayı uygun biriktirme tekniğinin seçilmesi ile elde edilebilir.

Kaliteli ince film oluşturabilmek için uygun vakum ortamı gerekmektedir. Vakum ortamında tercih edilen en yaygın yöntem fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme metodu (PVD) malzemelerin buharlaştırılarak farklı yüzeyler üzerine biriktirilmesinde kullanılan çoğu vakum biriktirme yöntemini kapsayan genel bir metottur. Bu metot yüzeyde kimyasal reaksiyon içermeyen bir kaplama metodudur [73].

### 5.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniği (MOCVD)

Bir dizi opto-elektronik ve yüksek hızlı elektronik cihaz imalatında MOCVD büyük bir teknolojik öneme sahiptir. Bileşik yarıiletken film büyümesinin ilk gösterimi ilk 1968'de bildirildi ve başlangıçta "Safir üzerinde Silikon" büyüme teknolojisinin bileşik yarıiletken eşdeğeri olmaya yönelikti. O zamandan beri, hem ticari hem de bilimsel ilgi büyük ölçüde izolatör substratlar yerine yarı iletken üzerinde epitaksiyal büyümeye yöneltmiştir. MOCVD tekniğinin tercih edilmesindeki nedenlerden biri katkılı ve katkısız bileşik yarıiletkenlerin epitaksiyal birikimiyle, kolay taşınabilen yüksek saflıkta organometalik bileşiklerin kolayca yapılabilmesidir. Kaynak kimyasalların ısıl bozulması yani pirolizi için büyük bir itici güç yani büyük bir serbest enerji değişimi vardır. Bu nedenle diğer epitaksiyal tekniklerle büyümesi zor olan çeşitli malzemeler bu teknik ile büyütülebilir. MOCVD'nin çok yönlülüğü, 540 nm ila 1600 nm aralığında ticari olarak kullanışlı ışık yayan cihazlar ve daha az bir aralıkta 950 nm ila 1600 nm aralığında dedektörler için tercih edilen epitaksiyal büyüme tekniği haline geldi. Bunlar laboratuvar ölçeğinden önemli ölçüde daha büyük miktarlarda satılan çeşitli In, Ga, Al, As ve P kombinasyonlarından oluşan katkılı epitaksiyal alaşım katmanları gerektiren GaAs veya InP alttaşları kullanan cihazlardır. Tabii ki, MOCVD'nin mevcut ve tarihsel sınırlamalarından bazıları nedeniyle

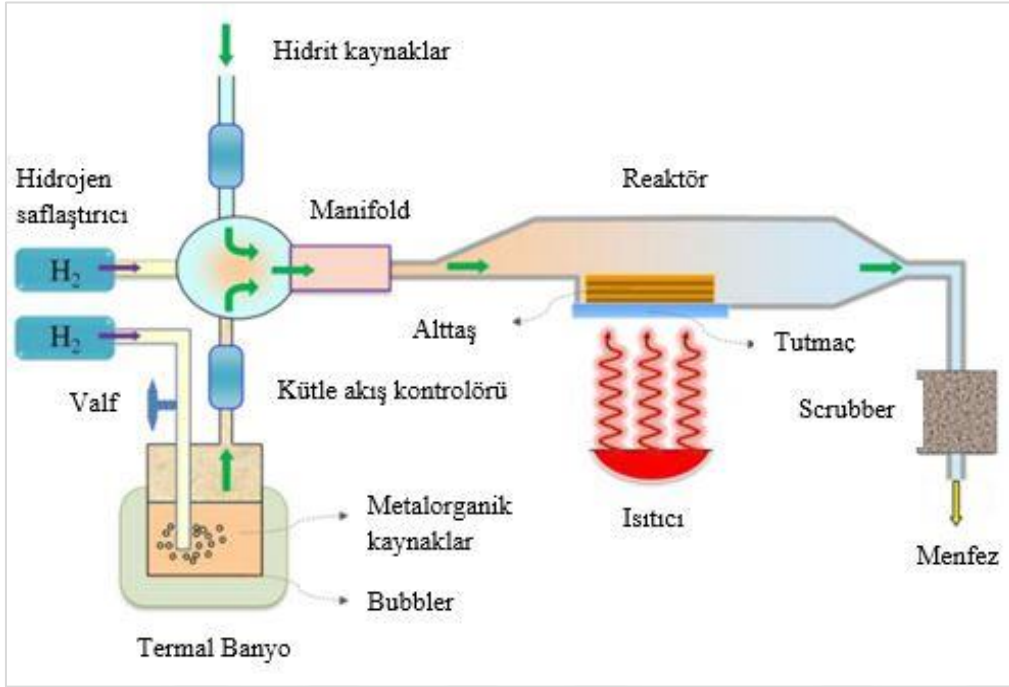
diğer epitaksiyal teknikleri kullanmaya devam eden başka bileşik yarıiletken uygulamaları da vardır [74].

MOCVD sistemi bir alttaş üzerine buhar fazdaki metal organik öncüller ve  $AsH_3$ ,  $NH_3$ ,  $PH_3$  gibi hidritlerin epitaksiyel olarak büyütülmesini sağlayan bir sistemdir. MOCVD büyütme tekniği VPE (buhar faz epitaksi) büyütme tekniğine göre çok daha gelişmiştir. VPE tekniğinde daha çok homoepitaksiyel büyütme yapılır MOCVD tekniğinde ise heteroepitaksiyel büyütme yapılır. Homoepitaksiyel büyütme film ve alttaşın aynı malzemeden oluşması, heteroepitaksi film ve alttaşın farklı malzemelerden oluşmasıdır. MOCVD sisteminin büyütme oranının yüksek, yüzey kalitesinin iyi, arayüz durumlarının iyi ve yüksek verimli olması gibi özellikleri MBE, VPE gibi diğer büyütme tekniklerine oranla daha üstündür.

Metalorganik (veya organometalik) ve hidrit kaynaklar ile III-V yarıiletken bileşiklerin büyütülmesi ilk kez 1960'da Didchenko ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Didchenko ve ekibi büyütme sırasında  $InP$  elde etmek için  $In$  kaynağı olarak trimetilindiyum ( $TMI_n$ ) ve  $P$  kaynağı olarak fosfin ( $PH_3$ ) kullanmışlardır. Daha sonra 1970'lerde Manasevit birçok metalorganik kaynaktan çeşitli yarıiletken bileşikler elde etmişlerdir ve bu tekniğe metalorganik kimyasal buhar biriktirme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) olarak adlandırmışlardır. İsimlendirme MOCVD veya OMCVD şeklinde kısaltılabilir. Çalışılan basınç değerini belirtmek amacıyla MOCVD kelimesinin önüne atmosferik basınç için AP (atmospheric pressure) veya düşük basınç için LP (low pressure) şeklinde kısaltmalar yapılabilir. Aynı zamanda bu büyütme yöntemi bazı kaynaklarda tarafından metalorganik buhar faz epitaksi (MOVPE veya OMVPE) olarak da yer almaktadır. MOCVD, buhar faz epitaksinin gelişmiş bir üst modelidir. VPE ile daha çok homoepitaksiyel büyütme mümkün iken bu teknik yüksek kalitede heteroepitaksiyel büyütme için geliştirilmiştir. Bu teknik ile konsantrasyonları farklı, katkılama düzeyleri farklı ve hatta alt taşın farklı bir katkılama tipinde epitaksiyel tabakalar büyütülebilmektedir.

MOCVD sisteminde III-V grubu bileşenleri içeren bir büyütme süreci; çelik veya kuvars bir reaktör içine belirli miktarlarda V grubu hidritler ile III grubu metal organiklerin alınması ile başlar. Reaktörün içinde radyo frekansı (rf) ve yüksek sıcaklığa maruz kalan bir karbon tutmaç (susceptor) ve bu tutmacın üzerinde de bir alttaş yer almaktadır. Alttaşın ısınması

öncüllerin ayrışmasında tepkimenin katalizörler tarafından hızlandırılmasını sağlar. Bu etkiyle gaz fazındaki bileşikler ve katı yüzeydeki bileşiklerin kimyasal tepkimeleri ile epitaksiyel tabakalar üretilir.



Şekil 5.1. MOCVD büyütme tekniğinin şematik gösterimi

MOCVD tekniği ile küçük boyutlu yapıların yüksek kalitede, hassas ve hızlı bir şekilde üretebilmesi bu tekniği tercih edilir hale getirmiştir. Yüksek saflıkta bileşikler yapılabilmesi de bu tekniği MBE tekniğine göre daha alternatifli kılmıştır. Ayrıca MOCVD tekniğinin büyütme hızı MBE tekniğinden daha yüksektir ve seri üretime yatkındır. MOCVD tekniği kullanılarak atomik seviyelerde çok katmanlı yapılar üretilir. MOCVD tekniği ile sadece örgü uyumlu yapılarda değil III-Nitrit tipi örgü uyumsuz yapılarda da büyütme yapılabilmesi bu tekniğin avantajlarından biridir. Bu tekniğin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan bazıları; büyütme sırasında kullanılan dâhili elektron dinamiği üzerinde bulunan karakterizasyon tekniklerini kullanamaması, bu yüzden büyütülen numunenin kalınlığı, yüzey morfolojisi gibi analizlerin yapımında zorlanılır. Bir başka dezavantajı arsin ve fosfin gibi oldukça zehirli, yanıcı, alevlenebilir ve aşındırıcı olan ürünlerle uğraşılıyor olmasıdır. Bir diğer dezavantajı çalışma sıcaklığının çok yüksek olmasıdır. Yüksek sıcaklık yapıların bozulmasına, heteroyapıdaki yarıiletken türlerinin birbirleriyle karışmasına, altaşın yapı atomlarının büyütülen tabakalara istenmeden de olsa karışmasına sebep olabilir [75].

Bu tez çalışmasında kullanılan safir alttaş üzerine büyütülen yapı Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan AIXTRON 200/4 RF-S model MOCVD sistemi ile büyütülmüştür.



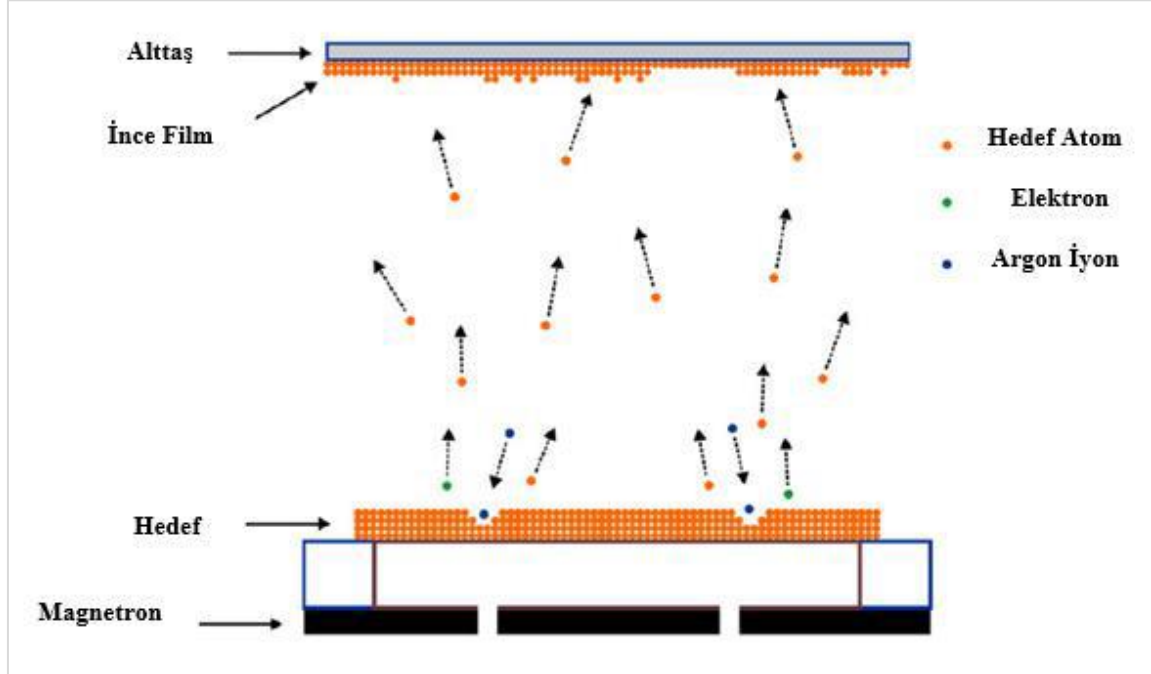
Resim 5.1. AIXTRON 200/4 RF-S model MOCVD sistemi

## 5.2. RF Magnetron Püskürtme Sistemi

Rf püskürtme, herhangi bir inorganik yalıtkanın veya herhangi bir metalin nispeten yüksek hızlarda, dakikada bin angstromda biriktirme yapabilen bir işlemdir. Püskürtülmüş filmler nispetende olsa herhangi bir boşluk içermez ve şu anda bilinen biriktirme teknikleriyle elde edilebilecek en yüksek kaliteyi sağlar. Rf püskürtme sistemlerinde, ince bir film olarak biriktirilecek malzemenin yığın kaynağını taşıyan Rf katotundan yaklaşık bir inç mesafede, su soğutmalı, topraklanmış bir plaka üzerinde yarı iletken substratları tutmak yaygın bir uygulamadır [76].

Püskürtme sistemi, hedef malzemedan koparılan atomların, vakum ortamında bir alttaş üzerine ince film oluşturmak için kullanılan bir sistemdir. Bu sistemde reaktif iyonlar yüksek gerilim altında hızlandırılır ve hedef malzeme hızlandırılan bu iyonlar ile bombardıman edilir. Bu işlem sonucunda hedef malzemedan koparılan moleküller alttaş üzerine biriktirilir. Sistemin düşük sıcaklıklarda biriktirme yapabilmesi büyük bir

avantajdır. Bu sebeple her çeşit alttaşa biriktirme yapılabilir. Hedef malzemeden bir molekülün sökülüp bir alttaş yüzeyine yerleşmesi Şekil 5.2’te gösterilmiştir



Şekil 5.2. Püskürtme sisteminin şematik diyagramı

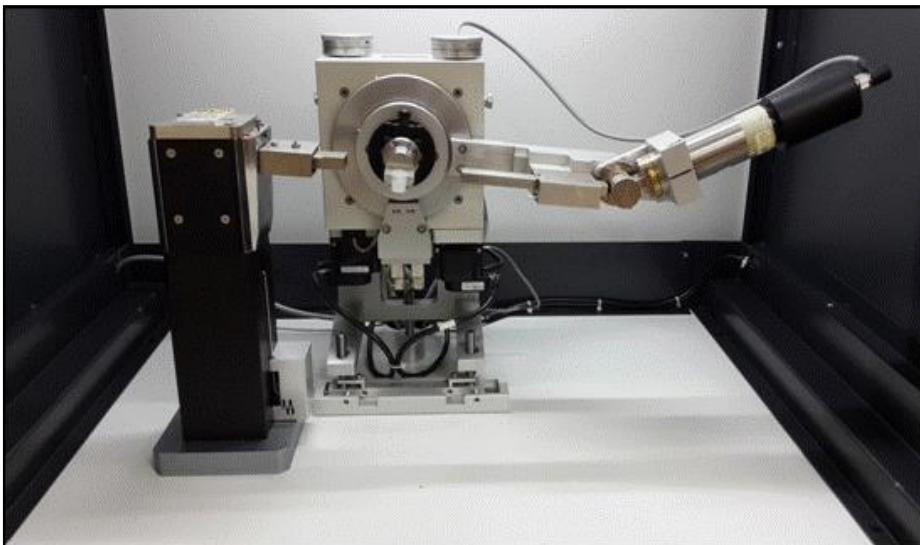
Püskürtme yöntemi kullanılarak çeşitli türlerde iletken, yarıiletken ya da yalıtkan malzemeler elde etmek mümkündür. DC Magnetron Püskürtme yöntemi ile iletken, RF Magnetron Püskürtme yöntemi ile yalıtkan malzemeler oluşturulur. Bu tez çalışmasında ZnO biriktirme işlemi Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan Magnetron Püskürtme (Sputtering) Sistemi kullanılarak yapılmıştır (Resim 5.2). Bu püskürtme sisteminde 2 Rf güç kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağı bulunmaktadır. Taşıyıcı kol sayesinde istenilen numune biriktirme odasına yerleştirilebilmektedir. Bu sayede 10 adet numuneyi aynı anda vakum bozulmadan elde etme şansı verir. Bu sputtering sisteminde hedef ile alttaş arasındaki mesafe 120 mm’ye kadar artırılabilir. Aynı zamanda bu sistemde 800 °C’ye kadar ısıtılabilen rezistif bir alttaş ısıtıcısı bulunmaktadır. Sistem içerisine iki adet gaz girişine imkân sağlayan gaz akış kontrol ünitesi vardır. Yükleme odasında alttaş yüzey temizliğini yapabilen bir ters-püskürtme birimi yer almaktadır. Sistemin temel basıncı  $\sim 10^{-8}$  mbar’dır [77].



Resim 5.2. BESTEC püskürtme sistemi

### 5.3. X-ışınları Kırınımı (XRD)

Röntgen tarafından bulunan X-ışınları, atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleriyle doğal veya yapay yolla kapalı bir tüp içinde katottan salınan elektronların hızlandırılıp anottaki metalin bombardıman edilmesiyle oluşur. Yüksek enerjili elektronlar hedefteki metal içerisinde yüksek ivmeyle yavaşlamak zorunda kalırlar ve enerjilerini foton yayımlayarak dışa atarlar. Bu olay ardışık devam eder ve bu fotonlardan x-ışınları meydana gelir. Oluşan x-ışınlarından karakteristik olanları seçilir. Seçilen bu karakteristik x-ışınları ile XRD tekniği kullanılır. Bu teknikle alaşımların analizleri yapılır [77].



Resim 5.3. XRD cihazının görünümü

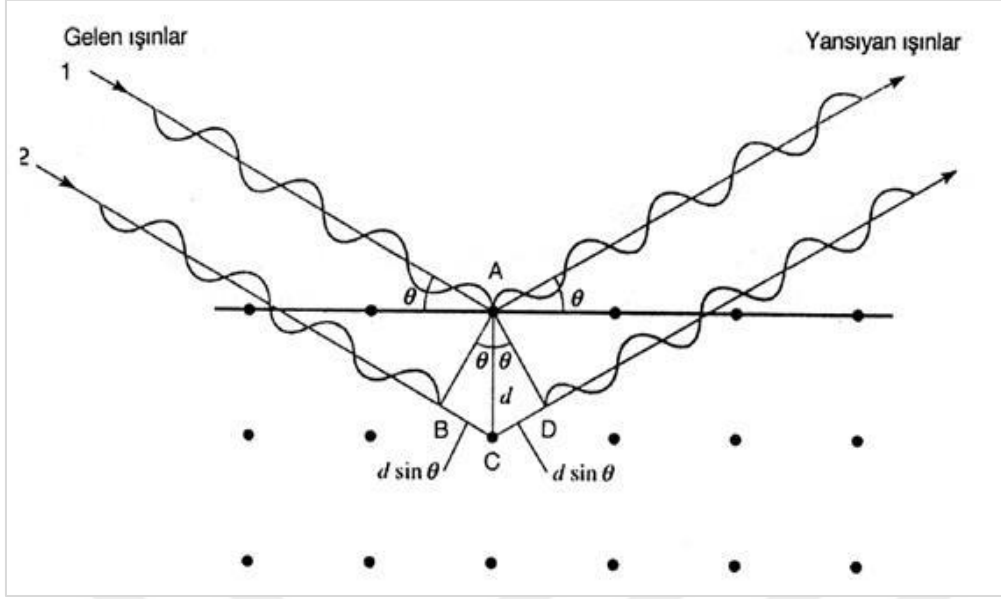
XRD tekniği yarıiletken ince filmlerin yapısal karakteristiklerini, kalitesini, örgü sabitlerini belirlemek için tercih edilen malzemede hasara yol açmayan yöntemdir. Bu teknik kullanılarak malzemelerin kimyasal bileşimi, tabaka yönelimi, epitaksiyel tabakaların kalınlığı, tabakalar arası geçişler, gerilmeler ve dislokasyonlar hakkında bilgilere sahip olunur. Bragg yasası kullanılarak açıklananan kristal düzlem üzerinden saçılan ışınlar yapıcı girişim yaparak difraksiyon deseni oluşturur. Bragg yasası;

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

eşitliği ile verilir. Burada  $\lambda$  kullanılan x-ışınının dalga boyu,  $d$  örgü düzlemleri arasındaki mesafe,  $n$  yansıma mertebesi ve  $\theta$  ise yansıma veya gelme açısıdır. Paralel iki kristal düzlemden yansıyan x-ışınlarının aldıkları yollar arasındaki mesafeye göre maximum kırınım ve minimum kırınım oluşur. Mesafe kullanılan x-ışınının dalga boyunun tam katıysa maksimum kırınım (yapıcı), yarım katıysa minimum kırınım (yıkıcı) meydana gelmektedir [78].

Çalışmamızda kullanılan X-ışını dalga boyu  $\lambda_{\text{Cu}}=1,5418 \text{ \AA}$ 'dır. X-ışını deseninden  $2\theta$  saçılma açısı belirlenir ve örgü düzlemleri arasındaki  $d$  mesafesi 5.1 eşitliği kullanılarak hesaplanır;  $d$  mesafesinin bilinmesi ile kristal düzleminin yönelimi ve örgü parametresi belirlenerek yapısal bilgiler tayin edilir. Aynı zamanda X-ışını kırınım desenindeki pik pozisyonlarının ( $\theta$ ) ve pik yarı genişliğinin belirlenmesi sonucunda filmlerdeki partikül büyüklükleri de bulunabilmektedir.

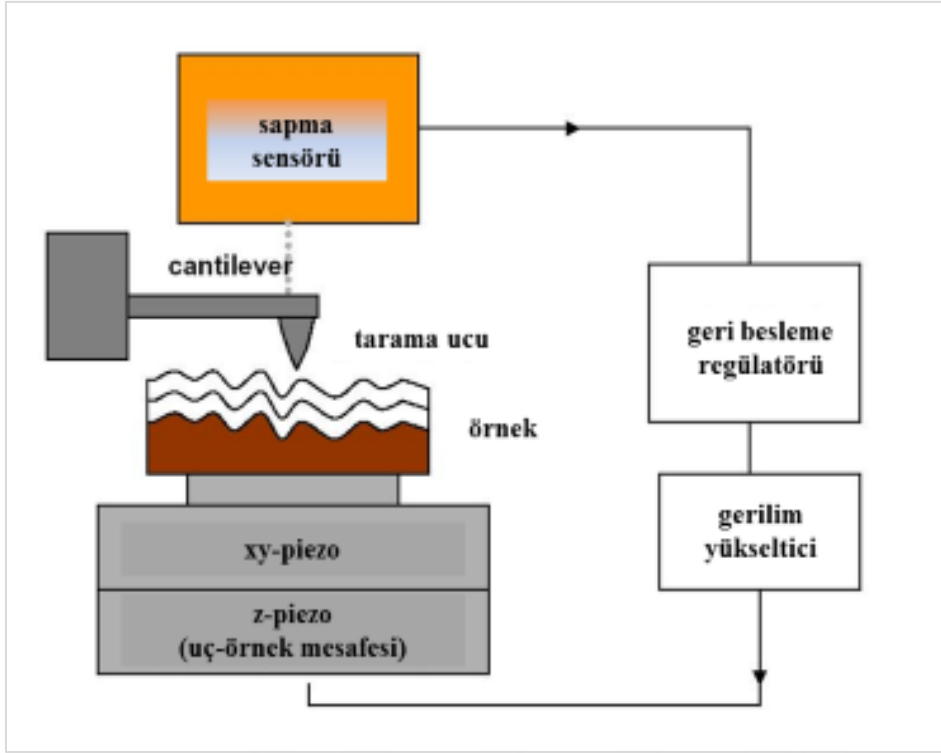
X-ışını demeti ilk olarak yüksek kalitede bir kristale çarparak kırınımına uğrar. Kırınan demet örnek kristal üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse çok dar bir kırınım deseni oluşur. Örnek kristalin geniş aralıkta yapısal dizilimini veren dönme eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir  $\omega$  açısıyla döndürülür. Kırınan demet şiddeti kaydedilir. Yüksek kalitedeki kristallerin birkaç arc-saniye genişliğinde pikleri mevcuttur. Bu teknik özellikle kalın alttaşlar üzerine büyütülmüş ince tabaka filmler için oldukça yararlı bir tekniktir [79].



Şekil 5.3. Bragg yasasının gösterimi

#### 5.4. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

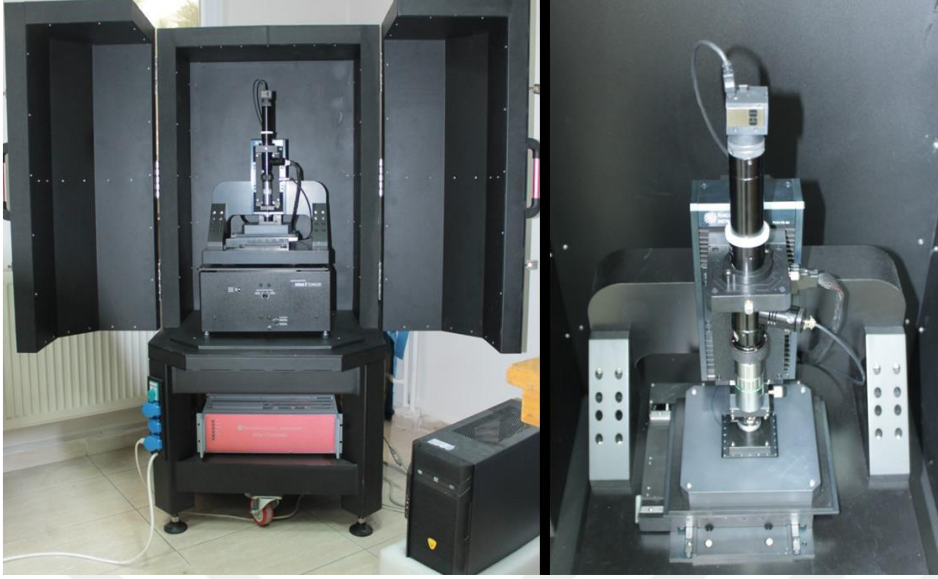
Atomik kuvvet mikroskobu, atomik incelikte keskin uçlu bir iğne (tip) vasıtasıyla yüzey morfolojisini angstrom( $\text{\AA}$ ) mertebesinde 100-150 mikrona kadar ölçebilen bir tekniktir. Oldukça hassas bir iğnenin yüzeyi taramasıyla atomlar arası kuvvetler nanonewton hassasiyetinde ölçülmektedir. İğne cantilever isimli yaya tutturulmuştur. İğne ile incelenen malzeme arasındaki kuvvet farkları algılanır. Uç ile yüzey arasındaki etkileşimler cantileverin sapmasına neden olur ve bu sapma bir sensör ile ölçülerek numunenin yüzey topografisi elde edilir



Şekil 5.4. AFM çalışma prensibinin şematik gösterimi

AFM, atomik ve nano değerlerde ölçülen yüzeyin özelliklerini haritalamak için, numune yüzeyine göre araştırma ucunun (tip) uzaysal pozisyonunu kontrol etmemizi sağlayan, piezoelektrik güç çeviricilerin kullanımını temel alan bir tekniktir [77]. AFM tekniği ile yüzeyin görünümü ve yüzeyde bulunan moleküller arasındaki ilişkiler, maddeyi oluşturan parçacıkların büyüklükleri, şekli ve bu parçacıkların birbiriyle etkileşimleri, aşınma, korozyon, pürüzlendirme, sürtünme, kaplama, elektriksel yük, nano mekanik özellikler gibi yüzey topografisi, yüzey morfolojisi ve yüzey etkileşim özellikleri hakkında bilgi edinilebilir [80]. AFM tekniğinin avantajları arasında numune hazırlığının gerekmemesi, yüzeye zarar vermemesi, hızlı ve düşük maliyetli olması sıralanabilir. Tarama alanı, derinlik, görüntü kalitesi ucun eğrilik yarıçapına bağlı olması ve piezoelektrik malzemeden etkilenmesi ise AFM tekniğinin dezavantajıdır [81].

AFM oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir ve hızla gelişmekte olan nanoteknoloji için vazgeçilmezdir. Elektronik, telekomünikasyon, biyoloji, kimya, otomotiv, uzay-havacılık ve enerji gibi endüstrilerde bu teknik tercih edilmektedir. İnce ve kalın kaplamalar, seramikler, kompozitler, camlar, metaller, polimerler ve yarıiletken malzemeler AFM tekniği kullanılarak ölçülebilen malzemelerdir [77].



Resim 5.4. Atomik kuvvet mikroskobu

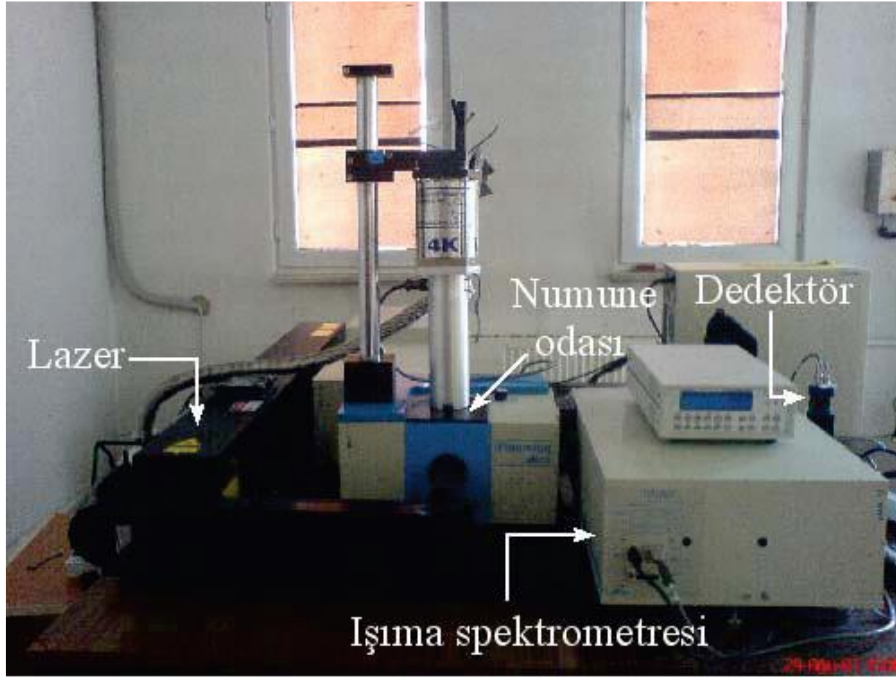
### 5.5. Fotolüminesans Sistemi (PL)

Fotolüminesans sistemi çok yönlü, numuneye zarar vermeyen, kolay bir ölçüm yöntemidir. Basit bir lüminesans sisteminde optik uyarma için bir ışık kaynağı, bir spektrometre ve uygun bir dedektör yer alır. Fotolüminesans ölçümleri, elektriksel uyarma gerektirmez ve numune hazırlanması kolaydır [82].

Malzeme üzerine ışık gönderildiğinde, ışığın bir kısmı yüzeyden geri yansır, diğer kısmı ise ortama iletilir. Ortama giren ışının bir kısmı soğurulabilir veya saçılır. Kalan kısım ortam içinden geçer. Soğurulan ışık ısı olarak açığa çıkar veya farklı bir frekansta foton olarak tekrar yayınlanır. Bu olay fotolüminesans olayıdır. Fotolüminesansın meydana gelebilmesi için malzeme üzerine düşen fotonların enerjisinin, malzemenin yasak bant aralığına eşit ya da daha yüksek olması gereklidir.

Fotolüminesans tekniği kullanılarak malzemenin kalitesi, yasak enerji aralığı, katkı ve safsızlık atomlarının türü gibi bilgilere ulaşılır. Fotolüminesans tekniği sahip olduğu avantajlardan dolayı çok fazla tercih edilen bir yöntemdir. Bu tekniğin numuneye verdiği herhangi bir zarar yoktur. Ölçüm için hazırlanan numunenin boyutunda ve kalınlığında bir sınırlamaya gerek yoktur bu yüzden ölçüm öncesinde herhangi bir hazırlık gerektirmez. Ölçümler sıcaklığa duyarlıdır, basınç değişimlerine karşı duyarlı değildir. Ölçümler hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Fonon ve saçılma etkileri düşük

sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde daha az olacağından daha iyi bir spektrum elde edilebilir. Yüksek sıcaklıkta yapılan ölçümlerde, numunenin ısınmaya karşı nasıl performans göstereceği saptanabilir. Çalışma için oda sıcaklığında yapılan ölçümler yeterlidir [83].



Resim 5.5. Fotolüminesans sistemi

## 5.6. UV-Visible Spektrometre

İnce film yarıiletken yapıların optik sabitlerinden enerji bant aralıkları, kırılma indisi, gibi sabitleri soğurma ve geçirgenlik spektrumlarının ölçüm ve analizinden belirlenebilmektedir. Bir yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonları soğurup, küçük enerjili olanları geçirdiği bilgisi ışığında, soğurma spektrumu kenarının, yasak enerji değerine karşılık gelebileceği söylenebilir [32].



Resim 5.6. Perkin Elmer marka UV-Vis spektrometresi (Gazi Fotonik)

### 5.7. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi

p-n eklem diyotun uçlarına uygulanan gerilim ile p-n eklem diyotun üzerinden geçen akım arasındaki ilişkiyi gösteren eğri diyotun I-V karakteristik eğrisidir. Doğru ve ters besleme altında p-n eklem diyot farklı davranışlar sergiler.

Dışarıdan bir voltaj uygulanırsa p-n eklem diyot beslenmiş olur. Böylece p-n eklemden denge durumu bozulur,deşikler ve elektronlar arasındaki difüzyon ve sürüklenme akımlarındaki denklilik bozulur. Böylece diyot üzerinden net bir akım geçer.

Farklı gerilimler altında numuneye uygulanan akım, kapasitans ve kondüktans ölçümleri ile bazı fiziksel parametreler hesaplanabilir. Bunlar; materyalin dielektrik özellikleri, enerji bant aralığı, ara yüzey durumların sayısı, doyma akımı, bariyer yüksekliği, taşıyıcı yoğunluğu (kalınlığa bağlı), iletkenlik, özdirenç, idealite faktörü (n), seri dirençtir. I-V karakteristik ölçümleri ışık altında ve karanlık ortamda yapılabilir. Ölçüm sonucunda alınan verilerle akım-gerilim grafiği çizilerek numunenin elektriksel özellikleri belirlenebilmektedir [80].



Resim 5.7. I-V ölçüm sistemi

### 5.8. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi

Bu sistemle filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, Hall mobilitesi, öz direnci ve iletkenlikleri hesaplanmaktadır. Elektrik alan altında bulunan yük taşıyıcılarına hareket doğrultusuna dik bir manyetik alan uygulandığı zaman yük taşıyıcıları hareket doğrultusuna ve uygulanan manyetik alana dik bir etki oluşturur. Farklı işaretli yük taşıyıcıları bir potansiyel farkın oluşmasına neden olur. Bu potansiyel Hall voltajı olarak adlandırılır. Oluşan bu potansiyel;

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d} \quad (5.2)$$

ile verilir. Burada  $R_H$  Hall katsayısı olarak adlandırılır. Etkin yük taşıyıcısı yük değeriyle aynı değerliliktedir. Dolayısıyla elektriksel iletinin elektron akımı ile sağlandığı metal örnekler için  $R_H$  Hall katsayısı negatif değerini alır ve aşağıdaki eşitlik ile gösterilir.

$$R_H = \frac{1}{n|e|} \quad (5.3)$$

mobilité

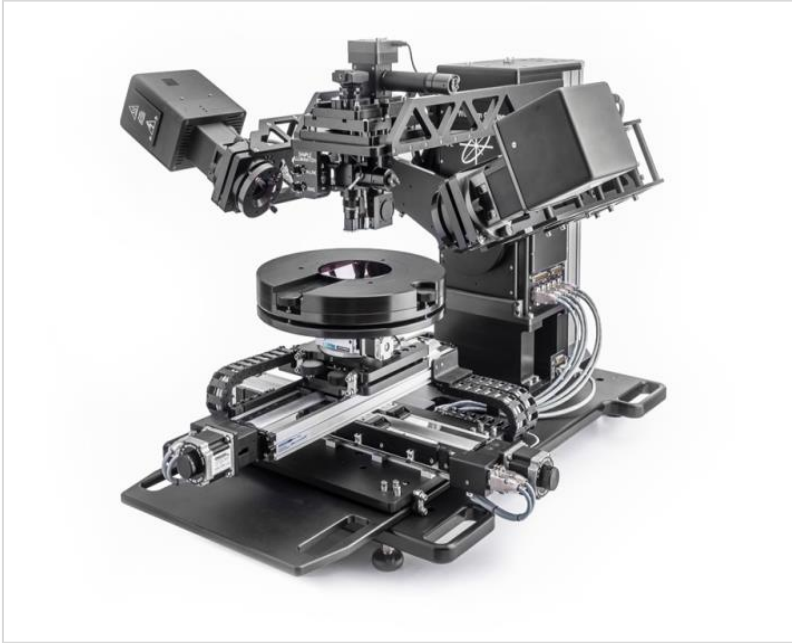
$$\mu_e = |R_H| \sigma \quad (5.4)$$

ile gösterilir [84].

## 5.9. Spektroskopik Elipsometre

Elipsometre, bir malzemedeki ışığın geçmesi veya yansıması esnasında polarizasyonundaki değişimi ölçülerek yüzey hakkında bilgi verir. Kullanılan ışığın dalga boyu aralığı genellikle morötesi bölgeden kırmızıaltı bölgeye kadar olmaktadır. Tüm katı maddelerde (metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar) kullanılmaktadır. Bu cihaz ile film kalınlığı, bulk malzemelerin ve ince filmlerin optik sabitleri, yüzey ve ara yüzey pürüzlülüğü, katkılama oranı ve malzemeyi oluşturan bileşenleri belirlenir.

Spektroskopik elipsometre, doğrusal kutuplu ışığın malzemedeki yansıdıktan sonra eliptik kutuplu hale dönüşümünü sağlayan ve yansıyan ışığın dedekte edilerek filmlerin kalınlıklarını ve  $n$ ,  $k$ ,  $\epsilon_1$  ve  $\epsilon_2$  gibi optik sabitlerin belirlenmesinde kullanılan sistemdir. Üretilen ZnO, GaN ve AlN ince filmlerin kalınlıklarının belirlenmesinde kullanılan spektroskopik elipsometre (J.A. Woollam, Inc. RC-2 model)) Resim 5.8’de görülmektedir. Ölçümde elde edilen deneysel verilerin teorik modele göre arıtmaları yapılarak kalınlık değerleri elde edilmektedir.



Resim 5.8. Spektroskopik elipsometre

## 6. YAPILARIN BÜYÜTÜLMESİ, KARAKTERİZASYONLARI: BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında farklı püskürtme güçleri altında üretilen n-ZnO/AlN/p-GaN yakın uv mavi ışık yayan diyotların (led) elektriksel, optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelendi. Bu araştırmalar için püskürtme yöntemleriyle büyütülen p-n eklem yapıları hazırlandı. Numunelerin elektriksel, optik, yapısal ve morfolojik özellikleri, Akım-Voltaj (I-V) ölçümleri, X-ışını kırınımı (XRD), Fotoluminesans (PL), Elektrolüminesans (EL) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) sonuçları değerlendirilerek belirlendi.

### 6.1. Yapıların Büyütülmesi

Büyütme metodlarının birçoğunda, büyütülen tabakaların karakterizasyonu için iki yöntem kullanılır. Bunlar, yerinde yani büyütme sırasında yapılan, diğeri ise büyütme bittikten sonra yapılan karakterizasyonlardır.

Büyütme sırasında kullanılan karakterizasyonlar önemlidir, çünkü etkinin kaynağı anında görülür ve etkili çözüm üretmek kolaydır. Moleküler demet epitaksi metodu (MBE), MOCVD sistemine kıyasla yerinde karakterizasyon tekniğinde daha çok kullanılır. Çünkü ultra yüksek vakum ortamı oluşturma yetersizliği ve büyütme süresince reaksiyonda kullanılan kimyasalların ve reaksiyon artığı ürünlerin reaktör çeperlerine dolması gibi problemleri olabilmektedir. Yerinde karakterizasyon için kullanılan moleküler demet epitaksi metodu elektron demeti ve kütle spektrofotometrisi gibi metodlardan ziyade MOCVD sisteminde genellikle ışık tabanlı metodlar tercih edilmektedir. Fotonlar gaz fazı olduğu sürece bulunurlar ve yapıyı moleküler değişime uğratmazlar. Elipsometrik ölçümler numunede bir hasara yol açmadığı için, yüksek basınç ve çeşitli geometrik tasarımlarla uyumlu olduğundan büyütülen yüzeyin karakterizasyonunda MOCVD'ye uyum sağlayan bir methoddur. Belirli bir açıda gelen ışık demetinin polarizasyon bağımlılığını gösteren durum elipsometrik ölçümlerdir. Ölçüm sonucu doğrudan ilgili yapının dielektrik fonksiyonuyla alakalıdır. Numunenin yüzeyi hakkında bilgi bulundursa bile külçeden gelen katkıyla yüzey katkısını ayırt etmek zordur. Bundan dolayı morötesi ışık kullanılarak büyüyen yüzey hakkında bilgi edinebilmek için nüfuz derinliğini 10 nm civarında olmalıdır.

Yansıma anizotropisi (reflectance anisotropy-RA) veya yansıma farkı spektroskopisi (reflectance difference spectroscopy-RDS) tekniği yerinde karakterizasyon için tercih edilen bir başka methoddur. Yüzeğe gönderilen polarize ışığın yandıktan sonraki polarizasyonunu ölçen bir methoddur. Bu özelliği ile elipsometrik ölçümlerden farkı yüzeğe geliş açısının farklı olmasıdır. III-V yarıiletken alaşımların kübik simetrisi olduğu için yüzeğe veya arayüz gibi düşük simetrik bölgeler bu simetriye zarar verebilirler.

Sanayi üretimlerinde, akademik çalışmalarda kullanılan başka bir method yansıma ölçümleridir. Yapılan bu akademik çalışmada da tercih edilen alt taş ve üzerine büyütülen epitaksiyel tabakaların kırılma indisi farkından yararlanılmaktadır. Yansıma ölçümünde alt taşta monokromatik ışık (lazer) yollanır. Bu ışık alt taşta doğru giderken, her bir arayüzde belirli bir kısmını geri yansıtır. Çünkü ortamın kırılma indisi ( $n_G$ ), epitaksiyel tabakanın kırılma indisi ( $n_2$ ) ve alttaşın kırılma indisi ( $n_1$ ) birbirleri ile aynı değildir. Ünitesi gelen ışığın şiddetini ölçtüğü için büyütülen yüzeyin özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

Aynı zamanda yüzeğe yollanan ve yüzeyden yansıyan veya arayüzden yansıyan monokromatik ışıklar birbiri ile girişim deseni meydana getirirler. Oluşan bu girişim deseni zamana karşı girişim şiddetini vermektedir. Bu bilgiye büyütülen tabakanın parmak izi diyebiliriz. Eğer ortamın, büyütülen tabakanın ve alt taşın kırılma indisleri biliniyorsa epitaksiyel büyütme için önemli ve gerekli olan epitaksiyel tabakanın büyüme oranı (hızı) ve toplam film kalınlığı elde edilen bilgiler kullanılarak hesaplanabilmektedir [78].

Bu tez çalışmasında Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma merkezinde bulunan 200/RF-S MOCVD sistemi kullanılarak 20 nm kalınlığında AlN tabakası epitaksiyel olarak c düzleme sahip safir alttaş üzerine büyütülmüştür. Bu tabakanın üzerine yine MOCVD tekniği ile p- tipi malzeme elde etmek amacıyla Mg katkılanarak 575 nm GaN büyütmesi yapılmıştır. Elektron alışverişini düzenlemek, örgü uyumsuzluğunu engellemek için alttaş ile GaN tabakası arasında AlN çekirdeklenme tabakası büyütülmüştür. GaN büyütmesinden sonra GaN üzerine, yapıdaki stres oluşumunu azaltmak ve değerlilik bant kaymasını optimize etmek amacıyla 400 nm kalınlığında AlN tabakası büyütülmüştür. Üretilen numune kestirilip rf magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak 200 nm kalınlığında 5 farklı numune için 25 W, 50 W, 75 W, 90 W, 100 W güç değişkenleri altında ZnO büyütmesi yapılmıştır. Aşındırma işlemi yapılarak p-n eklemi

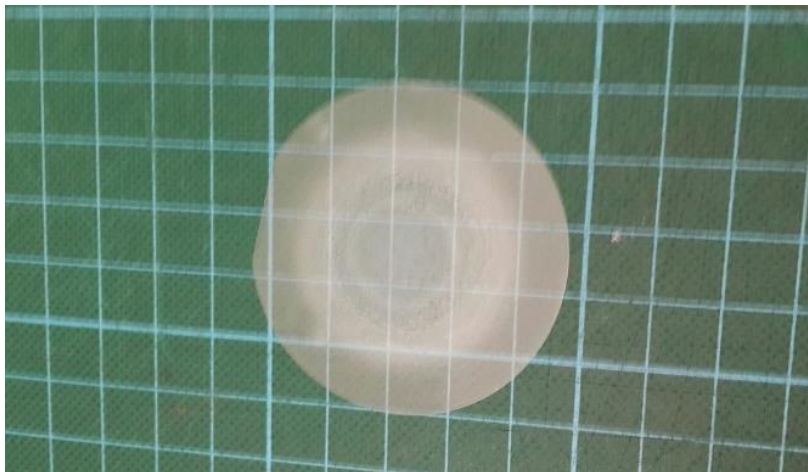
oluşturulup kontak yapımıyla malzeme üretimi tamamlanmıştır. Yapılan işlemler ayrıntılı bir şekilde diğer bölümlerde ele alınmıştır.

### 6.1.1. AlN/GaN/AlN yapısının MOCVD yöntemi ile büyütülmesi

Safir alttaş reaktör içine yerleştirilerek işleme başlandı. Reaktörün içi 3 kez Azot ile doldur boşalt işlemi, vakumlama işlemi yapılarak ortamın temizliği sağlandı. 18 dk süren doldur boşalt işlemi bittikten sonra Hidrojen geçişi başladı. Büyütme hidrojen ortamında olduğu için içerisinde hidrojen bulunmalıdır. İşlemin yapılacağı sıcaklığa gelinceye kadar sıcaklık artışı devam etti ve artan sıcaklıkla beraber yüzeyde toz kalıntıları varsa yok edildi, ön temizlik sağlandı. Bu işlem 20-25 dk sürdü. Büyütme işlemi, safir alttaşın yüzeyinde kalan kirleticileri yok etmek amacıyla H<sub>2</sub> atmosferi ve 100 mbar basınçla 1100 °C sıcaklıkta 10 dk süresince kusturma (desorption) işlemi ile başlar. Daha sonra çekirdeklenme tabakası olarak adlandırdığımız AlN tabakası 50 mbar basınç ve 640°C’ de 20 nm kalınlığında büyütüldü. Bu tabakanın büyütülmesinden sonra GaN tabakası 200 mbar basınç, 815 °C’ de 575 nm kalınlığında büyütüldü. Son olarak ara tabaka olan AlN tabakası 35 mbar basınç ve 865 °C’de 400 nm kalınlığında büyütülerek büyütme işlemi tamamlandı. Büyütme işleminden sonraki numunenin şekli aşağıda gösterilmiştir.

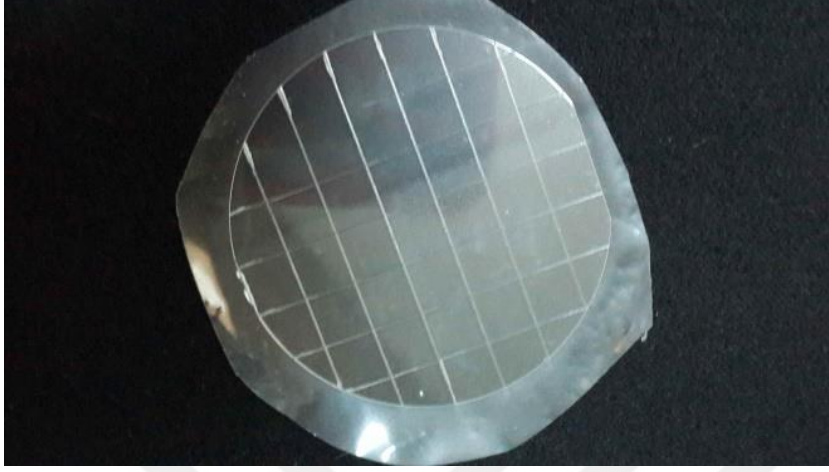
Çizelge 6.1. Numune parametreleri

Tabaka	Sıcaklık (°C)	Basınç (mbar)	Kalınlık (nm)
AlN	640	50	20
GaN	815	200	575
AlN	865	35	400



Resim 6.1. Üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlN/GaN/AlN numune resmi

Gerekli ölçümler yapıldıktan sonra üretilen numune Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma merkezinde kestirildi. Numunenin kesilmiş hali aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Resim 6.2. Üretilen  $Al_2O_3/GaN/AlN$  numunenin kesilmiş hali

Daha sonra bu numuneler adlandırılarak farklı püskürtme güç değişkenleri altında (25 W, 50 W, 75 W, 90 W, 100 W) Gazi Üniversitesi Fotonik Laboratuvarında Magnetron püskürtme sistemi kullanılarak 200 nm kalınlığında ZnO büyütmesi yapıldı.

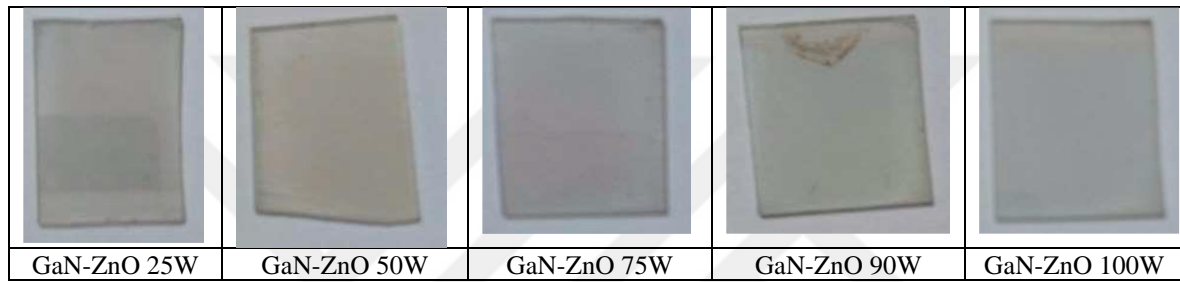
### **6.1.2. $AlN/GaN/AlN/ZnO$ yapısının rf magnetron püskürtme yöntemi ile büyütülmesi**

ZnO büyütmesi için hedef numune olarak 4 inch çapında % 2 oranında  $Al_2O_3$  ihtiva eden ZnO kullanıldı. Hedef malzeme ile alttaş arası uzaklık hemen hemen 35 mm değerinde ele alındı. Biriktirme işlemi süresince basınç  $10^{-3}$  mbar civarında tutulup, kalınlık sistemdeki kalınlık-ölçer ile kontrol edildi. İnce filmler 25 W, 50 W, 75 W, 90 W, 100 W farklı püskürtme güçlerinde büyütüldü. Basınç  $2.10^{-3}$  mbar civarında sabitlenip, kalınlık kontrol edilerek 200 nm kalınlığında ince filmlerin büyütülmesi yapıldı. Biriktirme işlemi tamamlanana kadar Ar/O oranı 70/30 oranında kaldı.

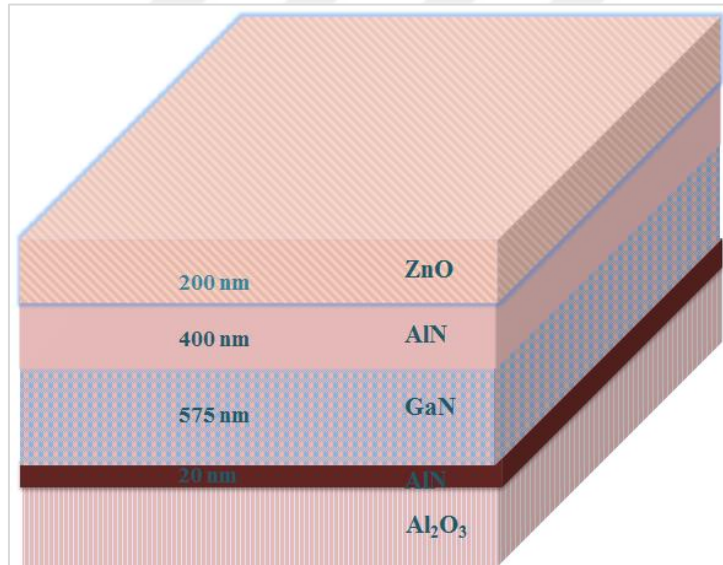
ZnO kaplamalarının, kaplama koşulları çizelge 6.2'de, numune resimleri resim 6.3'te ve numunelerin şematik gösterimi şekil 6.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. ZnO kaplama parametreleri

ZnO Numune ismi	Güç (watt)	Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)	Kalınlık (nm)
GaN-ZnO 25W	25	500	200
GaN-ZnO 50W	50	500	200
GaN-ZnO 75W	75	500	200
GaN-ZnO 90W	90	500	200
GaN-ZnO 100W	100	500	200



Resim 6.3. ZnO kaplamaları yapılan numuneler



Şekil 6.1. Numunelerin şematik gösterimi

ZnO kaplama işlemi tamamlandıktan sonra aşındırma işlemi ve kontak yapımı için Fransa Epitaksiyel Araştırma ve Uygulama Laboratuvarına (CRHEA-CNRS) gönderildi. Laboratuvarda yapılan işlemler detaylı bir şekilde diğer bölümde ele alınmıştır.

### 6.1.3. Aşındırma işlemleri ve kontak yapımı

Yapının en üst kısmında 200 nm kalınlığında n-ZnO katmanı yer almaktadır. p-n eklemine oluşturabilmek için n- ZnO katmanı ile birlikte p-GaN katmanından kontak alınmalıdır. p-GaN katmanına ulaşabilmek için üst kısımda bulunan ZnO ve AlN tabakalarına aşındırma işlemleri uygulanmıştır. Beş farklı püskürtme güç değişkenleri (25 W, 50 W, 75 W 90 W, 100 W) altında büyütülen numuneler için aşındırma işlemi ilk olarak yüzey üzerinde desenli bir kaplama oluşturmak için fotorezist-yayma işlemi ile başladı. Bu işlem spincoater ile numunelerin sırasına göre 2,43µm, 2,30µm, 2,45µm, 2,29µm, 2,43µm kalınlık üzerinde 2750 ile 4000 rpm döndürme sayısı arasında 3 saniye sürdü. Sonrasında 2 dakika boyunca 115<sup>0</sup>C'de fırınlanıp 1 dakika soğutma işlemi yapıldı. 7 sn desen oluşumu 36 sn iyileştirme yaparak Aligner maske oluşturma cihazı kullanılarak maske deseni cihaz üzerine çıkarıldı. Bunun için pozitif litografi uygulandı. Desenin dışında kalan boş alanlar ıslak aşındırma yöntemi ile 200 ml H<sub>2</sub>O içerisine 1ml H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> karışımı ile aşındırıldı. 25 W numune 45 sn boyunca 5µm aşındırıldı, 50 W numune 30 sn boyunca 2-3µm aşındırıldı, 75 W numune 45 sn boyunca 5µm aşındırıldı, 90 W numune 30 sn boyunca 2-3µm aşındırıldı, 100 W numune 45 sn boyunca 5µm kalınlığında aşındırıldı. Daha sonra desenin dışındaki alan için bu kez plazma aşındırması yapıldı. Bu işlem ile dışta kalan alan aşağı doğru iyice eritilmektedir. 25 W numune 1400 sn, 50 W numune 1400 sn + 800 sn + 500sn = 2700 sn, 75 W numune 2x 1250 sn, 90 W numune 1400 sn + 800 sn + 400 sn = 2600 sn, 100 W numune 1400 sn boyunca 3mTorr basıncında 20W Rf gücü, 200W mikrodalga, 152 V ön gerilim değerlerinde Cl<sub>2</sub> (13sccm) / CH<sub>4</sub> (2sccm) / Ar (2sccm) kimyasallarına maruz bırakılarak aşındırıldı. Sonra asetone ve propan ile 10 dk ultrasonik banyoda bekletildi. Bu işlemlerden sonra numunelerin karakterizasyonlarına bakılarak GaN'a ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edildi. GaN'a ulaşamadığı görüldü. Bir diğer aşama olarak ara değerlerde aynı işlemler yinelenildi. Numuneler için aynı değerlerde plazma aşındırma işlemleri yeniden yapıldı, sadece uygulama süreleri değiştirildi. 25 W numune için 2x1500 sn, 50 W numune için 2x1500 sn, 75 W numune için 2x 1600 sn, 90 W numune için 2x1250 sn, 100 W numune için 2x1250 sn boyunca plazma aşındırması yapıldı. Sadece 75 W olan numunede 6030Å-6700Å kalınlığında GaN' a ulaşıldı. Diğer numuneler için aynı işlemler tekrarlandı. 25 W numune için 2x1600 sn, 50 W numune için 660 sn, 90 W numune için 2x1500 sn, 100 W numune için 2x1600 sn boyunca plazma aşındırmasına maruz bırakıldı. Bu kez 25 W olan numune 6030Å-6500Å kalınlığında, 50 W olan numune 6300Å-6600Å kalınlığında GaN tabakasına ulaştı. 90 W ve 100 W olan numunelerde GaN'a

ulaşılamadığı için yine aynı değerlerde işlemler yapıldı. 90 W numune için 2x1500 sn plazma aşındırması uygulandığı halde yine GaN tabakasına ulaşılamadı. 660 sn boyunca aynı işlem tekrar uygulandı ve 6300Å-6600Å kalınlığında GaN tabakasına ulaşıldı. 100 W numune için 2x 1600sn boyunca plazma aşındırmaya maruz bırakıldı. 6030Å-6500Å kalınlığında GaN tabakasına ulaşıldı. GaN tabakasına ulaşılan tüm numunelere 3 sn boyunca 3500-4000 rpm spincoater ile fotorezist uygulandı. 2 dk süresince 115°C fırınlanıp 1 dk soğutuldu.

Aşındırma tamamlandıktan sonra kontak yapımına geçildi. GaN üzerine p tipi kontak, ZnO üzerine n tipi kontak yapıldı. GaN üzerine Aligner maske ile maske deseninin tersini çıkarmak için 2,5 sn negatif fotolitografiye maruz bırakıldı. 115°C'de 1,5 dk tavlandı. GaN üzerine 1,5µm'lik alanda elektron demeti buharlaştırma yöntemi (e-beam) ile Ni (200Å) / Au (2000Å) alaşım kontak yapıldı. 10 dk boyunca aseton-propan2 ultrasonik temizleme yapıldı. 475°C'de 5 dk Azot ortamında tavlandı. ZnO üzerine n kontak yapımı için önce gerekli temizleme işleminden sonra Aligner maske ile kontak şekli yüzeye oturtulup 2,5 sn negatif fotolitografi uygulandı. 115°C'de 1,5 dk tavlandı. ZnO üzerine 1,5µm'lik alanda elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile Ti (300Å) / Au(2000Å) alaşım kontak yapıldı. 10 dk boyunca aseton-propan2 ultrasonik temizleme işlemi ile birlikte kontakların yüzeye buharlaştırılması tamamlandı. Yapılan işlemler çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. 25W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri

	Yapılan İşlemler	Kullanılan Cihaz	Uygulamalar	Uygulama Süresi	Kalınlık
1.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		2,43µm
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Islak Aşındırma	Asit	H <sub>2</sub> O/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 200ml/1ml	45sn	5µm
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	1400sn	
	Maskenin Yüzeğden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
2.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeğden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
3.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1500sn	
	Maskenin Yüzeğden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
4.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1600sn	
	Maskenin Yüzeğden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8			6030Å-6500Å

Çizelge 6.4. 50W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri

	Yapılan İşlemler	Kullanılan Cihaz	Uygulamalar	Uygulama Süresi	Kalınlık
1.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		2,30µm
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Islak Aşındırma	Asit	H <sub>2</sub> O/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 200ml/1ml	30sn	2-3µm
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2700sn	
	Maskenin Yüzeğe Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
2.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeğe Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
3.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1500sn	
	Maskenin Yüzeğe Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
4.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	680sn	
	Maskenin Yüzeğe Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8			6300Å-6600Å

Çizelge 6.5. 75W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri

	Yapılan İşlemler	Kullanılan Cihaz	Uygulamalar	Uygulama Süresi	Kalınlık
1.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		2,45µm
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Islak Aşındırma	Asit	H <sub>2</sub> O/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 200ml/1ml	45sn	5µm
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13ssc) /CH <sub>4</sub> (2ssc) /Ar (2ssc)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
2.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13ssc) /CH <sub>4</sub> (2ssc) /Ar (2ssc)	2x1500sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
3.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13ssc) /CH <sub>4</sub> (2ssc) /Ar (2ssc)	2x1600sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8			6030Å-6700Å

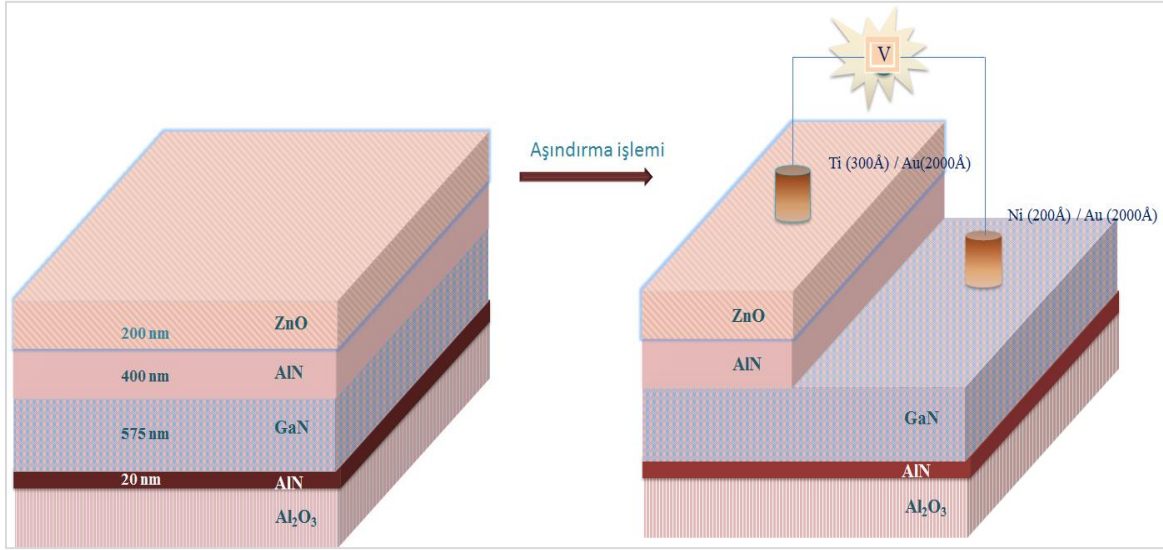
Çizelge 6.6. 90W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri

	Yapılan İşlemler	Kullanılan Cihaz	Uygulamalar	Uygulama Süresi	Kalınlık
1.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		2,29µm
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Islak Aşındırma	Asit	H <sub>2</sub> O/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 200ml/1ml	30sn	2-3µm
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2600sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
2.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
3.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1500sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
4.Aşama	Maskenin Yüzeye Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	660sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8			6300Å-6600Å

Çizelge 6.7. 100W püskürtme gücü altında büyütülen numunenin aşındırma parametreleri

	Yapılan İşlemler	Kullanılan Cihaz	Uygulamalar	Uygulama Süresi	Kalınlık
1.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		2,43µm
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Islak Aşındırma	Asit	H <sub>2</sub> O/H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 200ml/1ml	45sn	5µm
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
2.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1250sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8	İşlemler yeterli değil		
3.Aşama	Maskenin Yüzeğe Yerleşimi	Spincoater	3 sn 2750 rpm döndürme, 2 dk 115°C fırınlama, 1 dk soğutma		
	Desen Oluşumu	Aligner		43sn	
	Plazma Aşındırma	ECR-RIE	Cl <sub>2</sub> (13sscm) /CH <sub>4</sub> (2sscm) /Ar (2sscm)	2x1600sn	
	Maskenin Yüzeyden Ayırımı	Çözücü	Asiton/Propan-2	10dk	
	Değerlendirme	Dektak 8			6030Å-6500Å

Yapılan işlemlerin şematik gösterimi şekil 6.2’de gösterilmiştir.



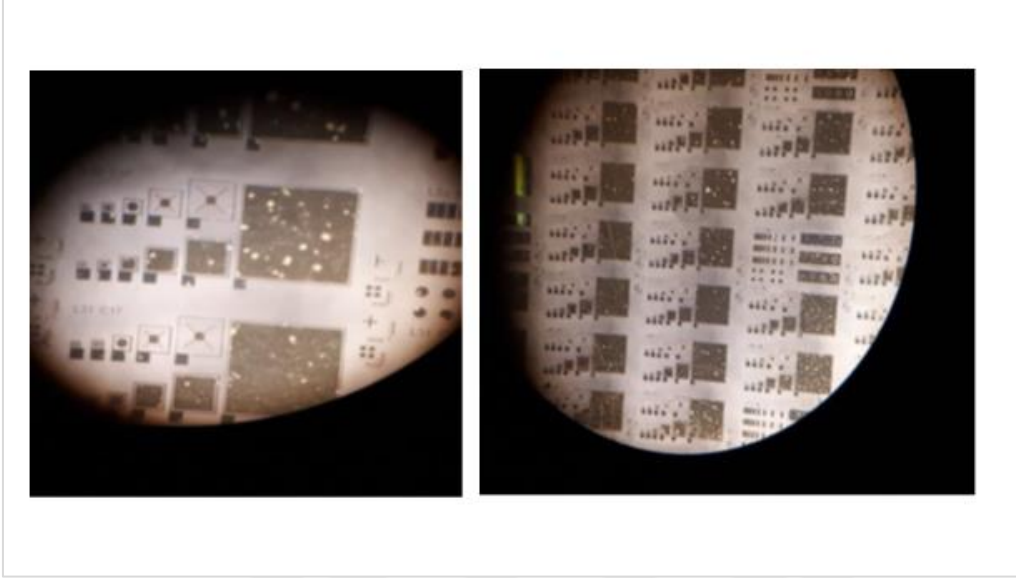
Şekil 6.2. Yapının aşındırma işlemi öncesi ve sonrası şematik gösterimi

Yapılan kontak işlemlerin parametreleri çizelge 6.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8. Kontak parametreleri

Numune	Kontak Tipi	Kullanılan Alaşım	Kullanılan Yöntem	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Kalınlık (Å)
25 W	n-tipi	Ti/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	300Å /2000Å
	p-tipi	Ni/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	200Å /2000Å
50 W	n-tipi	Ti/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	300Å /2000Å
	p-tipi	Ni/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	200Å /2000Å
75 W	n-tipi	Ti/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	300Å /2000Å
	p-tipi	Ni/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	200Å /2000Å
90 W	n-tipi	Ti/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	300Å /2000Å
	p-tipi	Ni/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	200Å /2000Å
100 W	n-tipi	Ti/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	300Å /2000Å
	p-tipi	Ni/Au	Elektron Demeti Buharlaştırma	475	5	200Å /2000Å

Çalışma sonucunda oluşturulan Led'lerin farklı boyutlardaki görselleri Resim 6.4' te gösterilmektedir.



Resim 6.4. Optik mikroskop ile farklı led boyutları



Resim 6.5. Led boyutları ve led ışığı

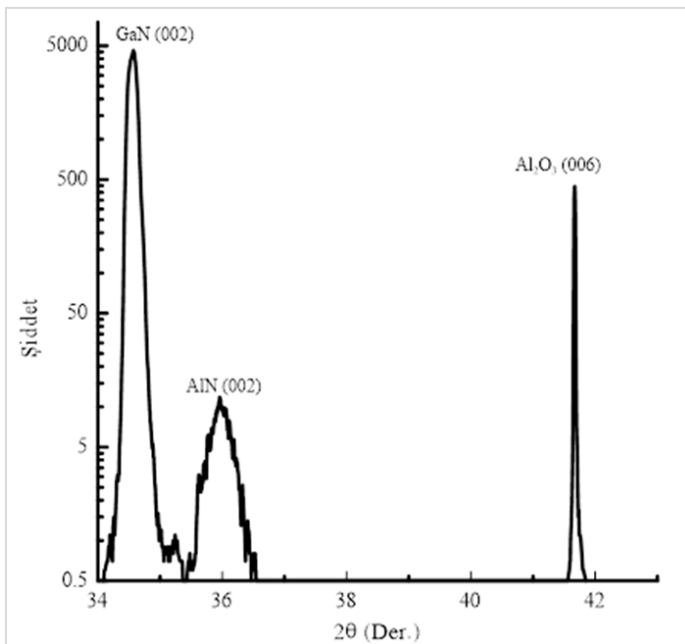
## 6.2. Yapıların Karakterizasyonları

### 6.2.1. XRD analizleri

II-VI yarıiletkenlerin çoğu çinko oksit veya hekzagonal wurtzite yapıda kristalleşir. Bu yarıiletkenler geniş bant aralıklıdır. Wurtzite kristal yapısının iki anyon ve iki katyon olmak üzere birim hücresinde dört atomı vardır. Tetrahedral bağlanma biçimi tipik sp<sup>3</sup> kovalent bağlanmasına örnektir. Ancak bu malzemeler aşırı iyonik karaktere sahiptirler. Örneğin; ZnO % 62 gibi oldukça yüksek iyonik karakter sergilemektedir [30]. Bu durum bağ yapısının oldukça kuvvetli olmasını sağlar ve yarıiletkenin yüksek güç elektroniği uygulamalarında kullanılır. Bilindiği üzere hekzagonal yapının a ve c olmak üzere iki adet örgü parametresi vardır ve ZnO yarıiletkeninin c/a oranı 3,250 / 5,206 olan bir yarıiletkendir [85].

XRD tekniği ile yarıiletken ince filmlerin yapısal karakteristikleri, kalitesi, örgü sabitleri, malzemelerin kimyasal bileşimi, tabaka yönelimi, epitaksiyel tabakaların kalınlığı, tabakalar arası geçişler, gerilmeler ve dislokasyonlar belirlenir.

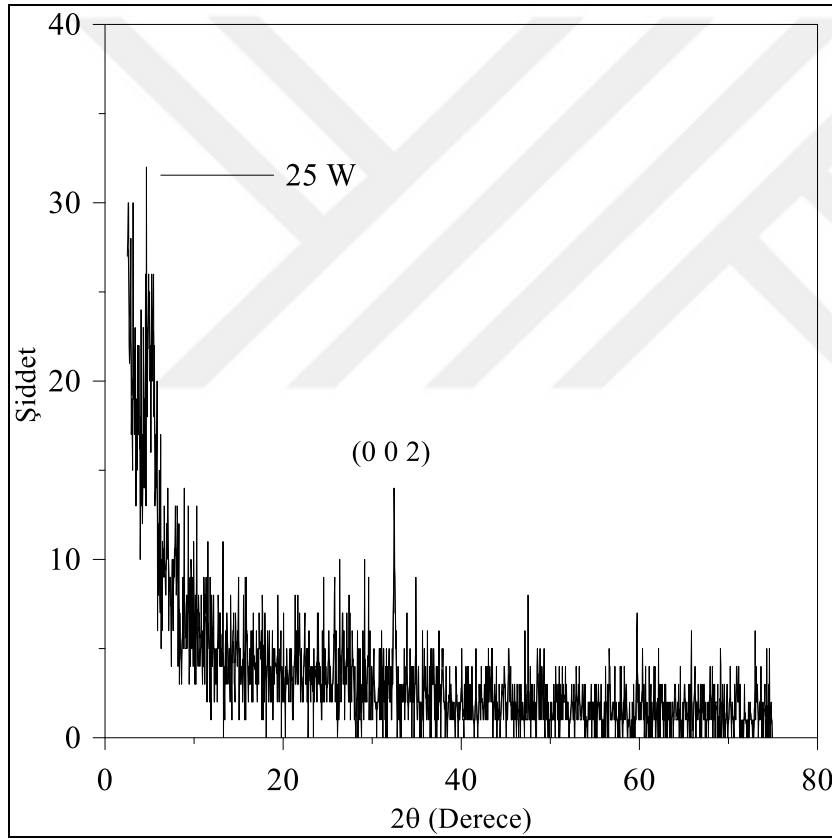
Şekil 6.3'de üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlN/GaN/AlN yapısına ait XRD kırınım deseni gösterilmektedir.



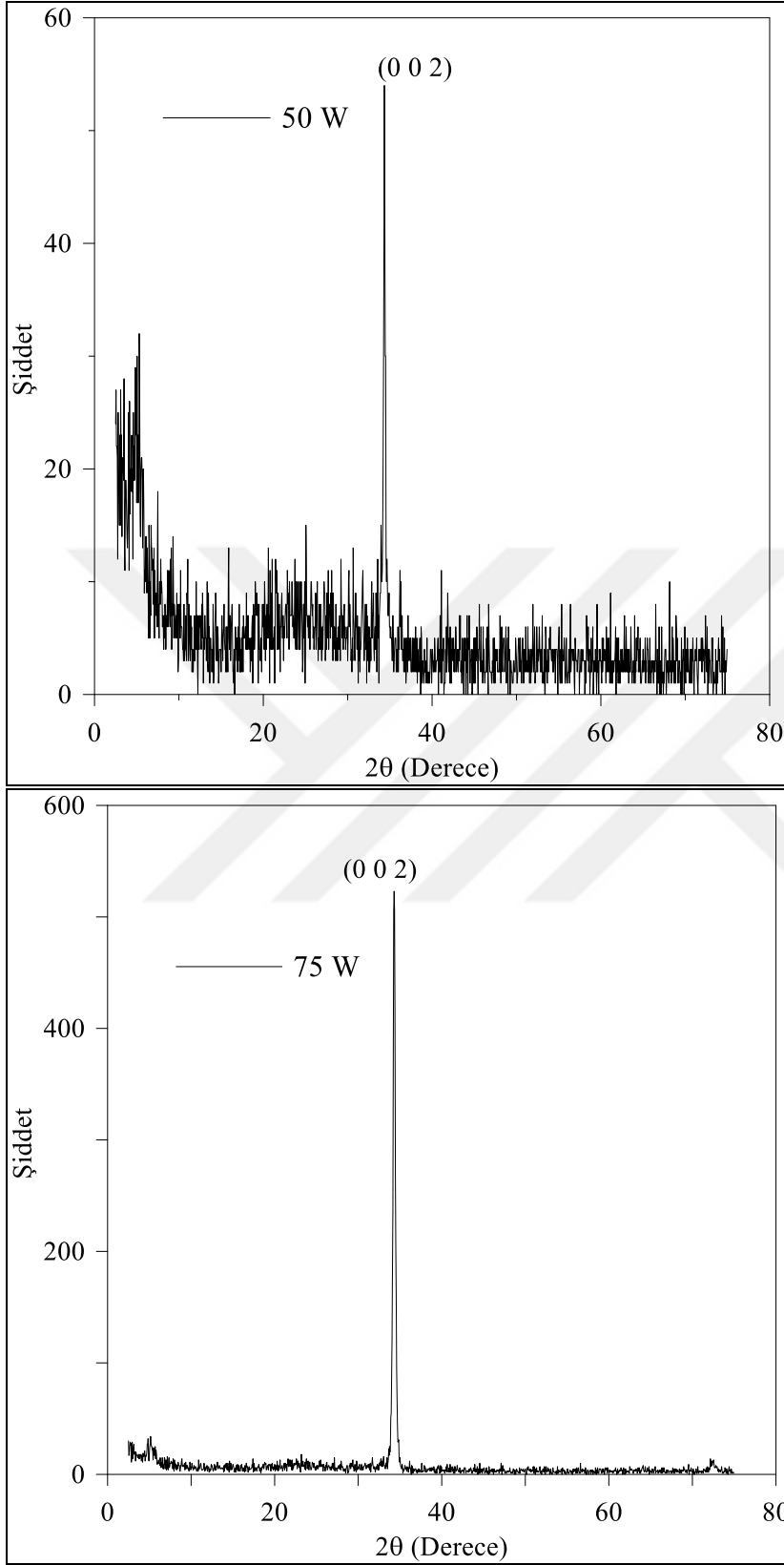
Şekil 6.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, GaN, AlN tabakaların XRD kırınım deseni

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün  $41,67^\circ$ 'de (006) yöneliminde, GaN'ın  $34,68^\circ$ 'de (002) ve AlN'ın ise  $35,84^\circ$ 'de (002) yöneliminde olduğu gözlenmiştir. Literatürle uyumlu olduğu gözlenmiştir. (JCPDS No: 89-7522) [86]. Piklerin ortalama yarı genişlik değeri (FWHM) AlN için  $0,39^\circ$ , GaN için  $0,30^\circ$  pik şiddetlerinden görüldüğü gibi ideal şartlarda yapıldığı gözlenmiştir. Kırınım deseni ince filmin kristal kalitesinin iyi olduğunu, yapının istenen özellikte elde edildiğini göstermektedir.

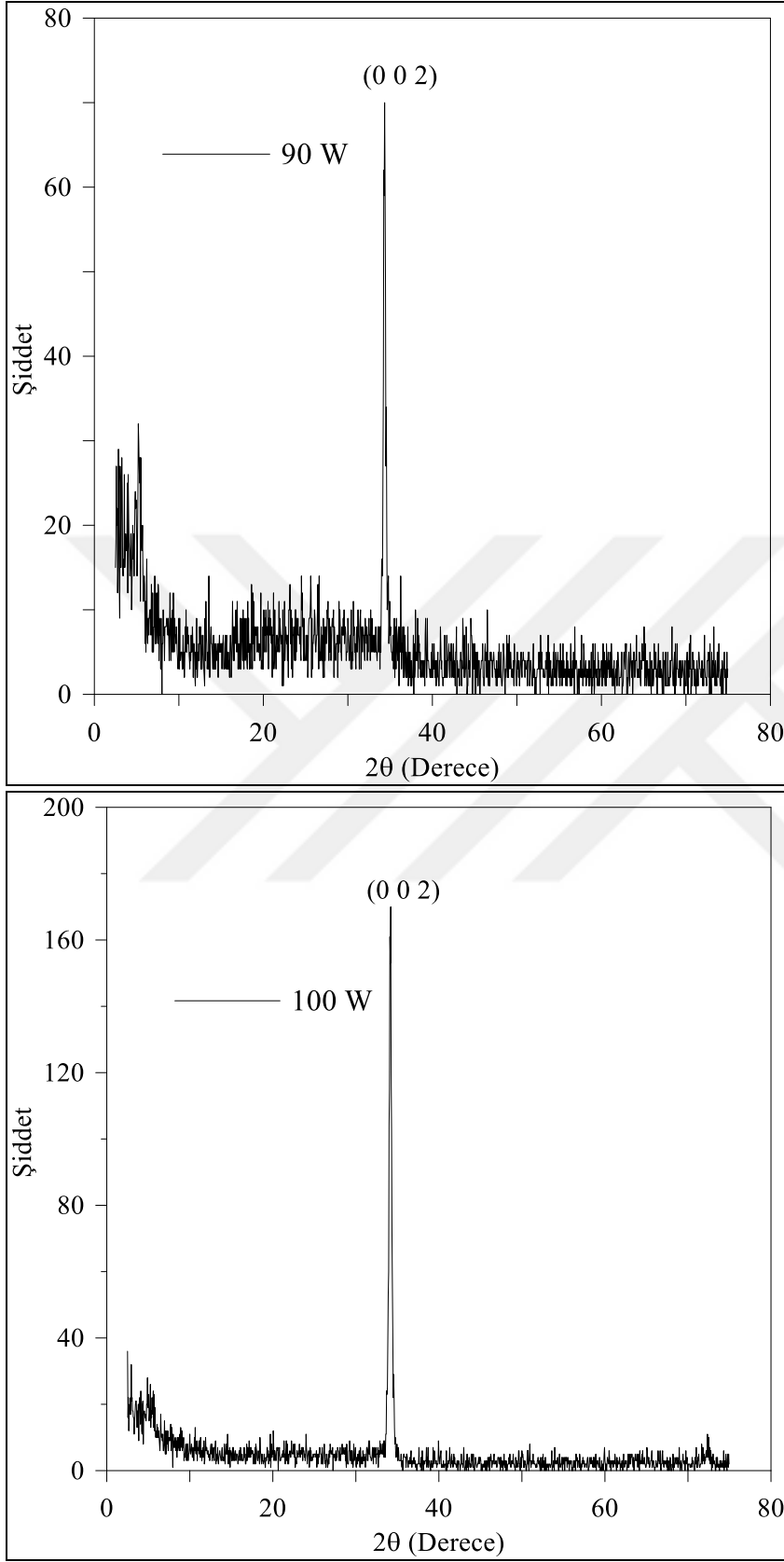
25 W, 50 W, 75 W, 90 W, 100 W püskürtme güçlerinde büyütülen ZnO yapısının XRD kırınım desenleri şekil 6.4' te gösterilmektedir.



Şekil 6.4. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının XRD kırınım deseni



Şekil 6.4. (devam) AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının XRD kırınım deseni



Şekil 6.4. (devam) AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının XRD kırınım deseni

25 W rf gücü altında büyütülen numunenin gösterdiği pik belirgin oluşmamıştır. Daha yayvan bir görünüm sergilemektedir. 32,46<sup>0</sup>'de pik göstermiştir.

50 W rf gücü altında büyütülen numune 34,32<sup>0</sup>'de pik göstermiştir.

75 W rf gücü altında büyütülen numune 34,41<sup>0</sup>'de pik göstermiştir. En şiddetli pik bu değerde görülmüştür.

90 W rf gücü altında büyütülen numune 34,47<sup>0</sup>'de pik göstermiştir.

100 W rf gücü altında büyütülen numune 34,58<sup>0</sup>'de pik göstermiştir. Elde edilen pikler ZnO'nun karakteristik pikiyle yakın yerlerde çıkmıştır. JCPDS: 00-036-1451 ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürde benzer piklerin oluştuğu çalışmalar mevcuttur [87].

Rf gücü arttıkça pikin daha dar hale gelmesi Çizelge 6.9'da FWHM değerlerinden anlaşılmaktadır. 75 W püskürtme gücünde büyütülen numunenin daha iyi kristalleştiğini ve sıfır veya minimum kusur ve dislokasyona sahip olduğu söylenebilir. Bu muhtemelen alt katmanların yeterince kalın olmasından ve tepe noktasının ZnO ile yerleştirildikten sonra algılanamamasından dolayı olabilmektedir. Bir başka önemli husus, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katı çözeltilisinin yalıtım katmanı olarak çalışabilen tepe noktasının görünmemesidir. AlN (20 nm) çekirdeklenme tabakasının yokluğunda bu oluşum kaçınılmaz olacaktır. Bunun nedeni, GaN'nin normalde bir Ga polar durumda var olması ve GaN katmanının sınır teşkil eden Ga atomlarının, ZnO katmanının büyümesi sırasında sağlanan oksijen için büyük bir yakınlığa sahip olmasıdır.

Filmlerin ortalama parçacık boyutu aşağıda verilen Scherrer denklemi ile hesaplandı.

$$D = \frac{\lambda_{0,94}}{B \cos \theta} \quad (6.1)$$

D=Parçacık Boyutu

B=maksimum şiddetin yarı genişliği

$\lambda$ =X-ışını dalgaboyu

Püskürtme gücü 25 W'dan 100 W'a yükseldikçe, FWHM 0,014'ten 0,008'e düştüğü ve parçacık boyutları 10,31 nm'den 18,23 nm'ye yükseldiği gözlemlendi. Ancak, 75 W gücünde büyütülen film en şiddetli pike sahip olandır. Bu da yapının kristalize olduğunu gösterir. Farklı püskürtme güçlerinde büyütülen filmlerin ortalama parçacık boyutları eşitlik 6.1'de verilen Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplandı. Bu, 100 W püskürtme gücüne sahip ZnO filmin tüm ZnO filmleri arasında en iyi kristal kalitesine sahip olduğunu gösterir.

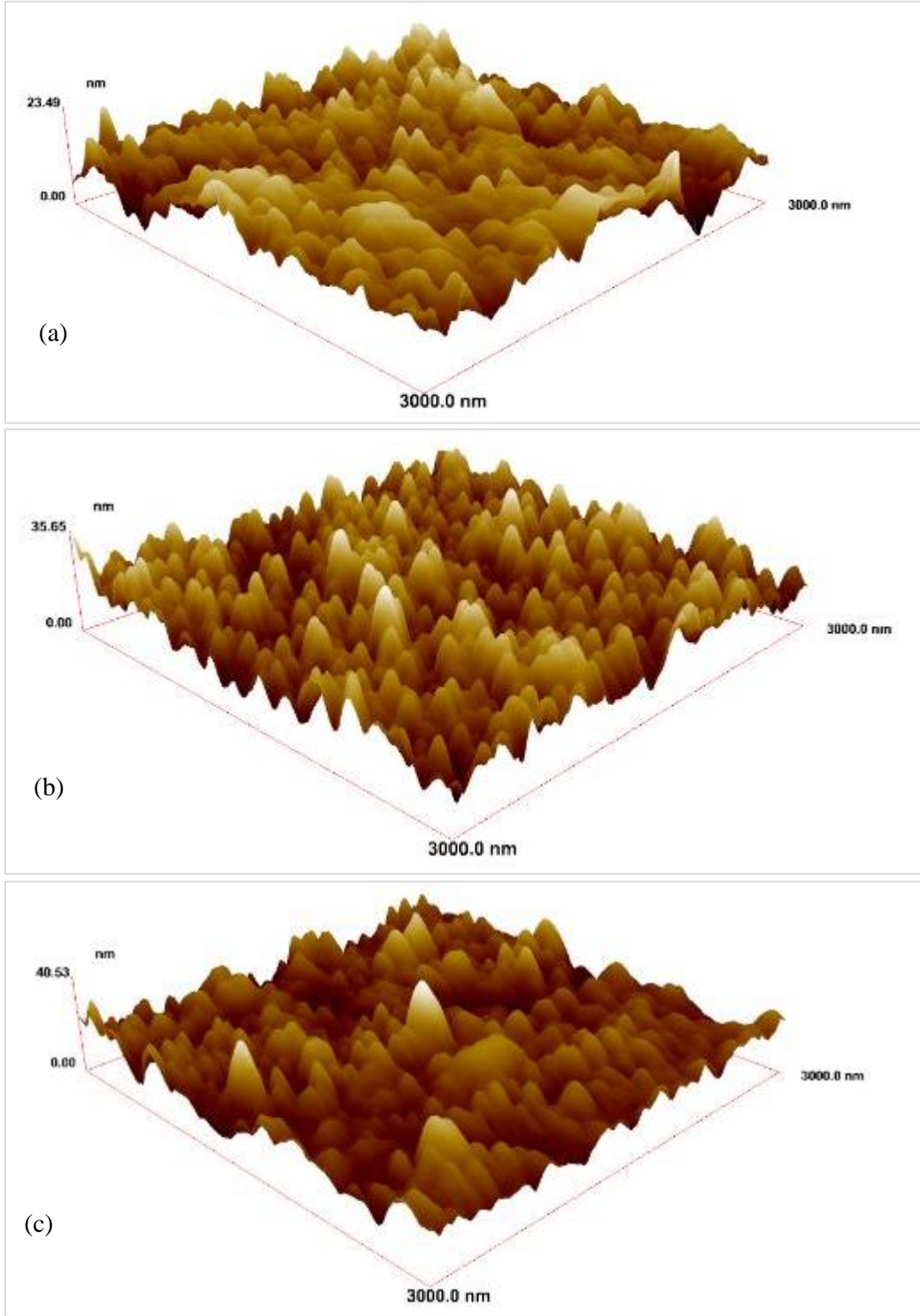
Çizelge 6.9. Farklı güç değişkenleri altında büyütülen ZnO filmlerin yapısal parametreleri

Güç Değişkeni(W)	$2\theta$ (°)	FWHM(°)	Parçacık Boyutu(nm)	Dislokasyon yoğunluğu ( $\times 10^{-3} \text{nm}^{-2}$ )
25W	32,46	0,014	10,31	9,41
50W	34,32	0,013	11,16	8,03
75W	34,41	0,011	13,19	5,75
90W	34,47	0,0096	15,12	4,37
100W	34,58	0,008	18,23	3,01

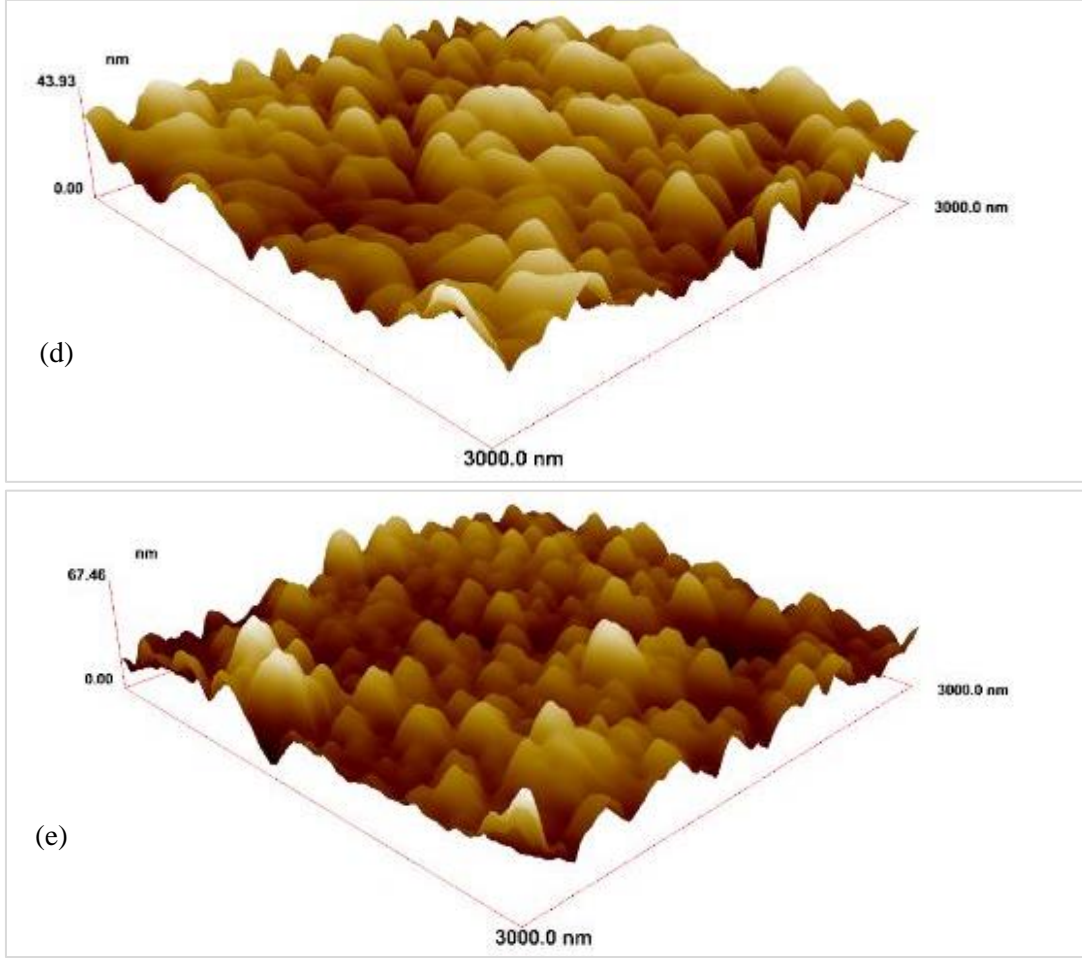
(002) yönelimine sahip olan ince filmlerin  $2\theta$  değerleri  $32,46^\circ$ ,  $34,32^\circ$ ,  $34,41^\circ$ ,  $34,47^\circ$ ,  $34,58^\circ$  dir. Rf gücü arttıkça piklerin ortalama yarı genişlik değerinde (FWHM) daralma görülmektedir. Bu durum ZnO'nun püskürtme gücü arttıkça arayüz boyunca basınç geriliminden kurtulduğunu gösterir. Ayrıca Çizelge 6.9'dan da görüldüğü gibi püskürtme gücünün artmasıyla dislokasyon yoğunluğu ( $\delta=1/D^2$ ) düşmektedir, bu da malzemenin yüksek mukavemete sahip olması dolayısıyla esnekliğin düşmesi anlamına gelmektedir. Püskürtme gücü malzemenin sertliğinin bir ölçüsü de denilebilir.

### 6.2.2. AFM analizleri

Resim 6. 6 (a, b, c, d, e)'deki 3 boyutlu  $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ 'lik bir alanın AFM görüntüsü incelendiği zaman ZnO ince film tabakalarının yüzeye, düzgün şekilde ve homojen kaplandığı görülmektedir. Püskürtme gücünün artmasıyla boşluk azaldığı için yapı daha sıkı olmuştur. Daha önceki bölümdeki XRD sonuçlarına göre filmlerin sadece (002) yönelimine sahip oldukları gösterildi. Bu, AFM görüntülerinden de görüldüğü üzere, ZnO tabakalarının yüzeye dik büyüdüğünü ve sütunlu büyümenin belirginleştiği anlamına gelmektedir.



Resim 6.6. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 3d AFM görüntüleri a) 25W b) 50W c) 75W d) 90W e)100W



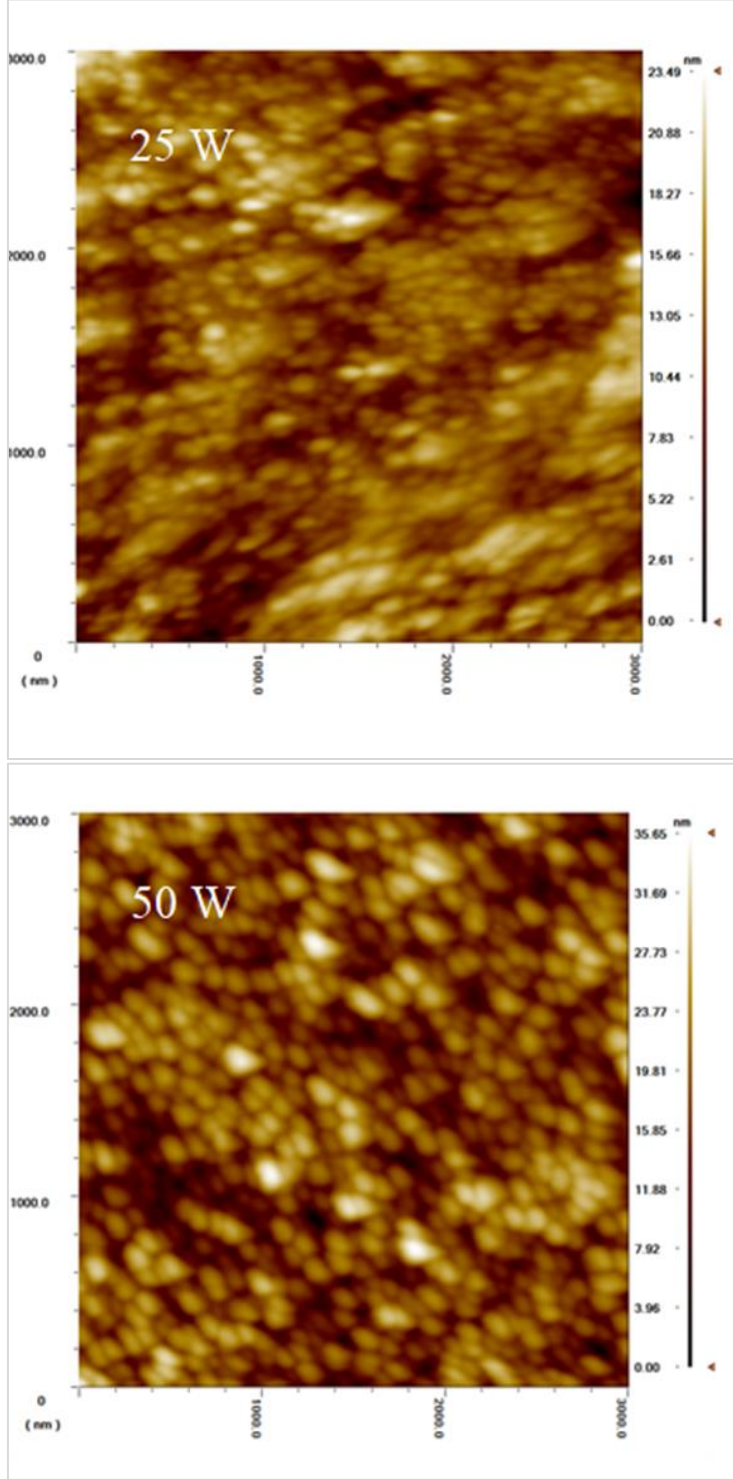
Resim 6.6. (devam) AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 3d AFM görüntüleri a) 25W b) 50W c) 75W d) 90W e)100W

Yüzey pürüzlülüğü AFM ile yüzey morfolojisinin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri kullanılarak belirlenmiştir. Filmlerin yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.10’da gösterilmiştir. Bu çizelgeden de görüldüğü gibi püskürtme gücü arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinde çok belirgin bir artış meydana gelmiştir ve XRD’den elde ettiğimiz parçacık boyut değerleri de bunu desteklemektedir.

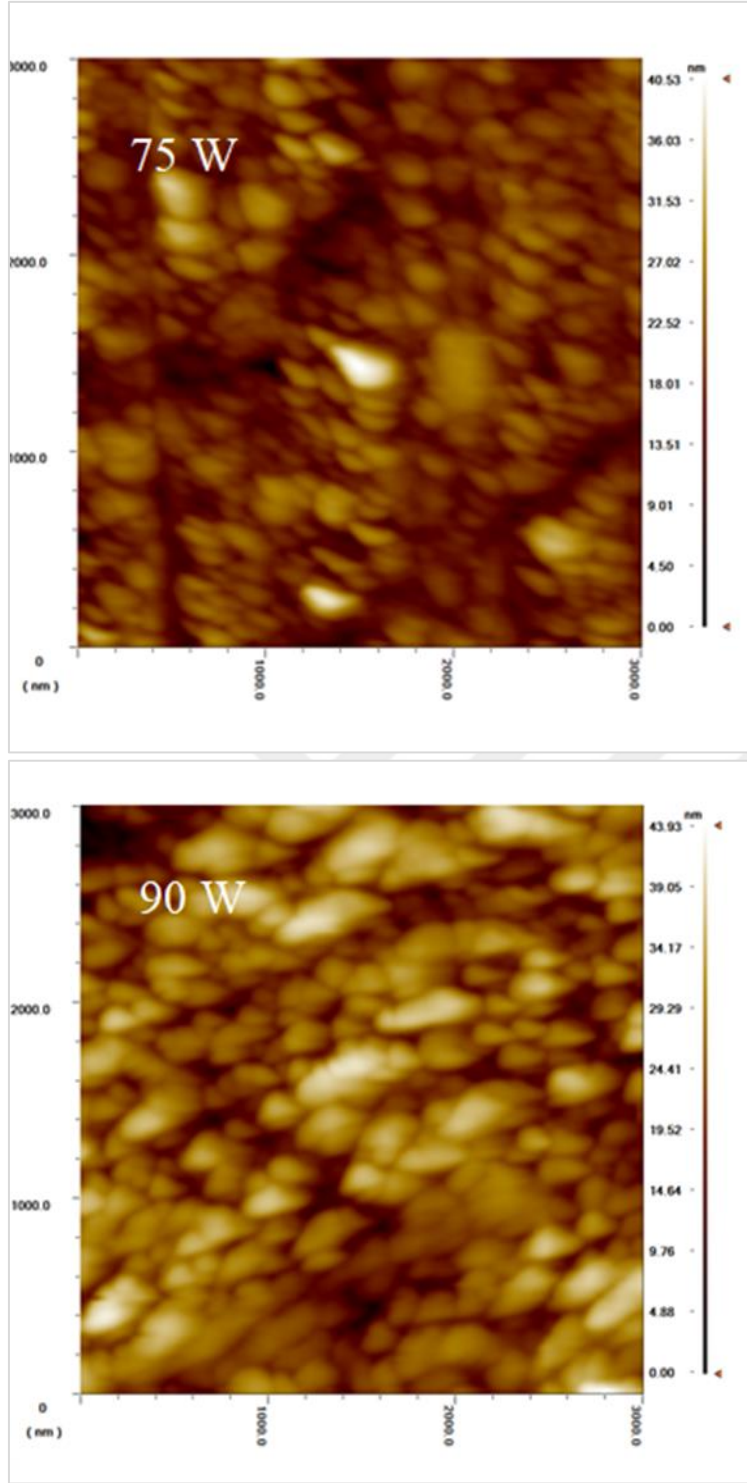
Çizelge 6.10. ZnO ince filmlerin AFM ölçümlerinden elde edilen pürüzlülük (rms) parametreleri

Püskürtme gücü Değişkenleri (W)	Rms (nm)
25W	3,04
50W	5,14
75W	4,36
90W	6,30
100W	8,61

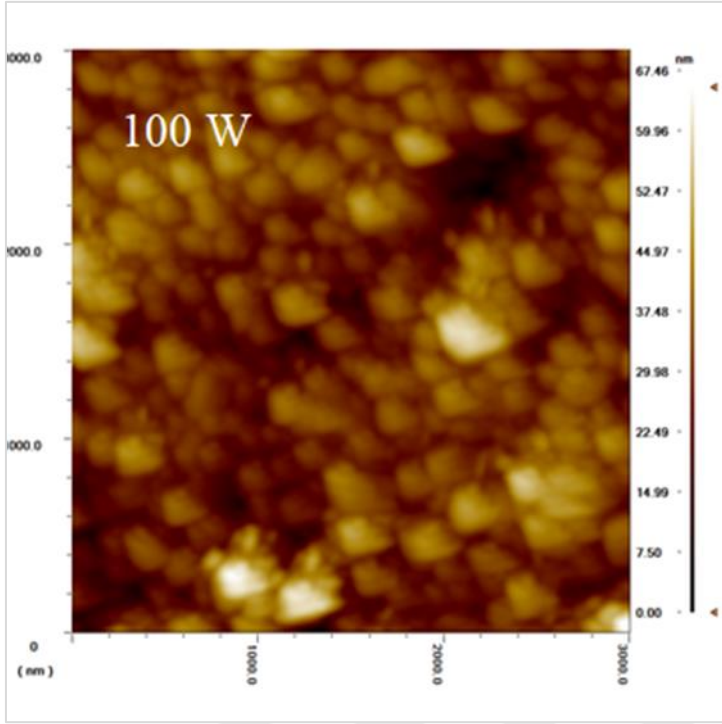
Farklı püskürtme güçlerinde büyütülen numunenin 2D AFM görüntüsü resim 6.7’de gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün kök kare ortalama (RMS) değeri nanometrelerde yüzey homojenliğini anlamak için önemli bir parametredir.



Resim 6.7. AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 2d AFM görüntüsü



Resim 6.7. (devam) AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 2d AFM görüntüsü



Resim 6.7. (devam) AlN/GaN/AlN/ZnO yapısının 2d AFM görüntüsü

25 W için rms 3,04 nm olarak bulunmuştur. Yapıdaki tane oluşumu diğer numunlere göre daha az belirgin ve daha dağınık görünümündedir.

50 W için rms değeri 5,14 nm olarak bulunmuştur. Yapıda tane oluşumu sütunlu görünüme benzemeye başlamıştır ve sınırları daha keskindir.

75 W için rms değeri 4,36 nm olarak bulunmuştur. 50 W'ta üretilen filme göre yapının sütunlu görüntüsü biraz da olsa bozulmuş ve sütun genişlikleri artmıştır.

90 W için rms değeri 6,30 nm olarak bulunmuştur. Yapıda yer yer kümelenmeler mevcuttur. Artan püskürtme gücüyle tane boyutu büyümüş ve sütunlu görüntü tekrar belirginleşmiştir.

100 W için rms değeri 8,61 nm olarak bulunmuştur. Püskürtme gücünün artması ile birlikte rms değerindeki artış parçacık büyümesi ile doğru orantılıdır ve en büyük değeri 100 W'ta görülmektedir.

Sonuç olarak, AlN alt tabakalar üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin yüzey kalitesi püskürtme gücüyle orantılı olarak artmaktadır. AFM görüntülerindeki film yüzeylerinde

görülen konik özellikler yüzey pürüzlülüğünün sebebidir. Optik uygulamalar için tercih edilen kaplamalarda yüzey pürüzsüzlüğünün oldukça istenen bir parametre olduğuna dikkat etmek önemlidir. Çünkü pürüzlülüğe bağlı yüzey saçılmasından kaynaklanan yansıma kaybını azaltır.

Hall etkisi ölçüm sistemi HMS-3000 Manual Ver 3,5 sistemi kullanılarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu sistemle filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, Hall mobilitesi, öz direnci ve iletkenlikleri hesaplanmıştır. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için taşıyıcı yoğunluğunun işaretine bakılmıştır. Donör (verici) veya n-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti negatiftir, akseptör (alıcı) veya p-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti pozitifdir. Farklı püskürtme güçlerinde elde edilen n-tipi ZnO ince filmlerin elektriksel özellikleri Çizelge 6. 11' de gösterilmiştir.

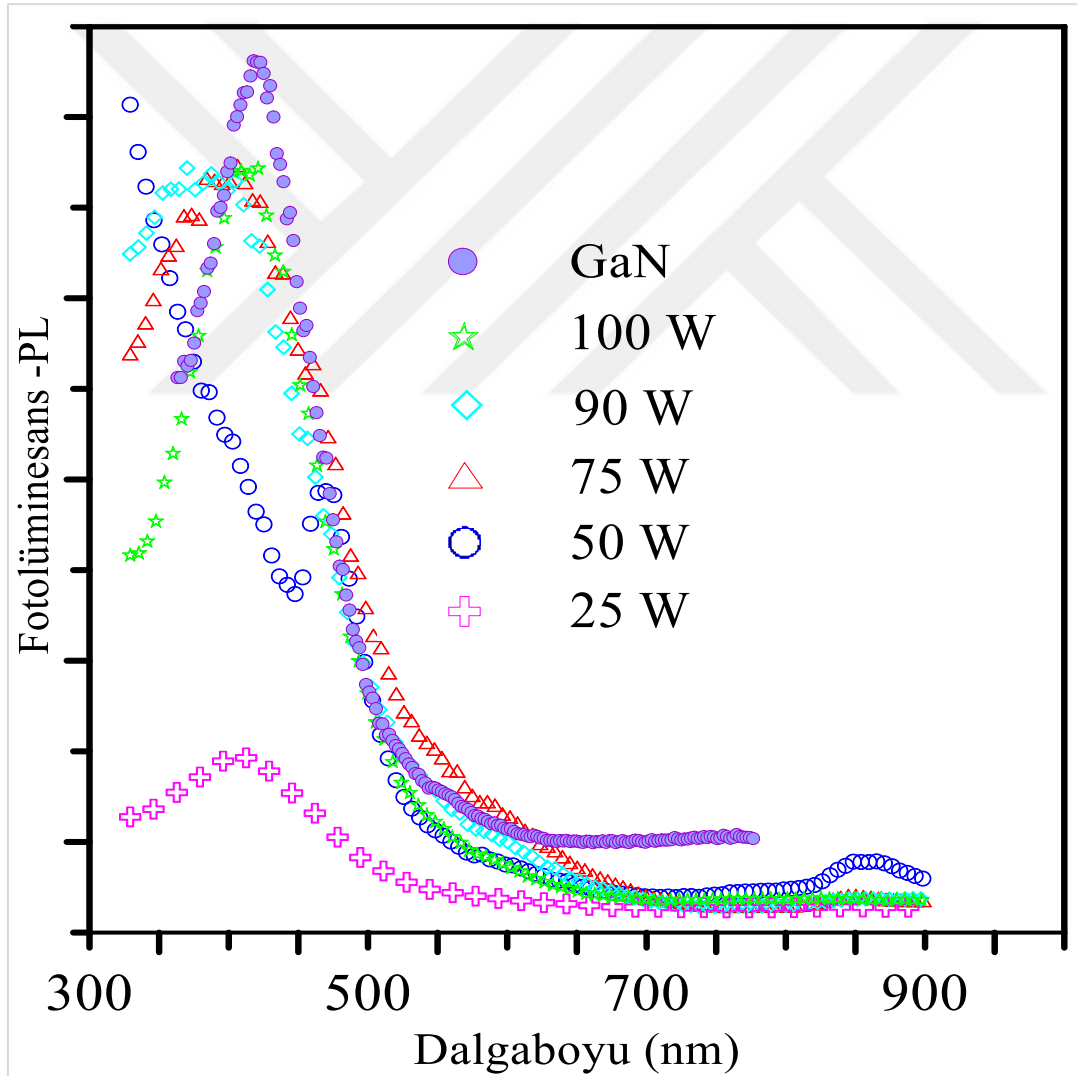
Çizelge 6.11. p-tip GaN ve n-tipi ZnO ince filmlerin elektriksel özellikleri

Film Adı	Püskürtme Gücü (W)	Hall Mobilitesi (cm <sup>2</sup> /Vs)	Taşıyıcı Konsantrasyonu (1/cm <sup>3</sup> )	Özdirenc (Ω cm)	Taşıyıcı Tipi
GaN	-		2,18 x10 <sup>17</sup> (e <sup>+</sup> )	0,74	p
GaN-ZnO 25W	25	17,0	1,5x10 <sup>18</sup> (e <sup>-</sup> )	0,245	n
GaN-ZnO 50W	50	21,0	1,57x10 <sup>18</sup> (e <sup>-</sup> )	0,189	n
GaN-ZnO 75W	75	24,3	1,69x10 <sup>18</sup> (e <sup>-</sup> )	0,153	n
GaN-ZnO 90W	90	24,6	1,71x10 <sup>18</sup> (e <sup>-</sup> )	0,148	n
GaN-ZnO 100W	100	25,0	1,78x10 <sup>18</sup> (e <sup>-</sup> )	0,140	n

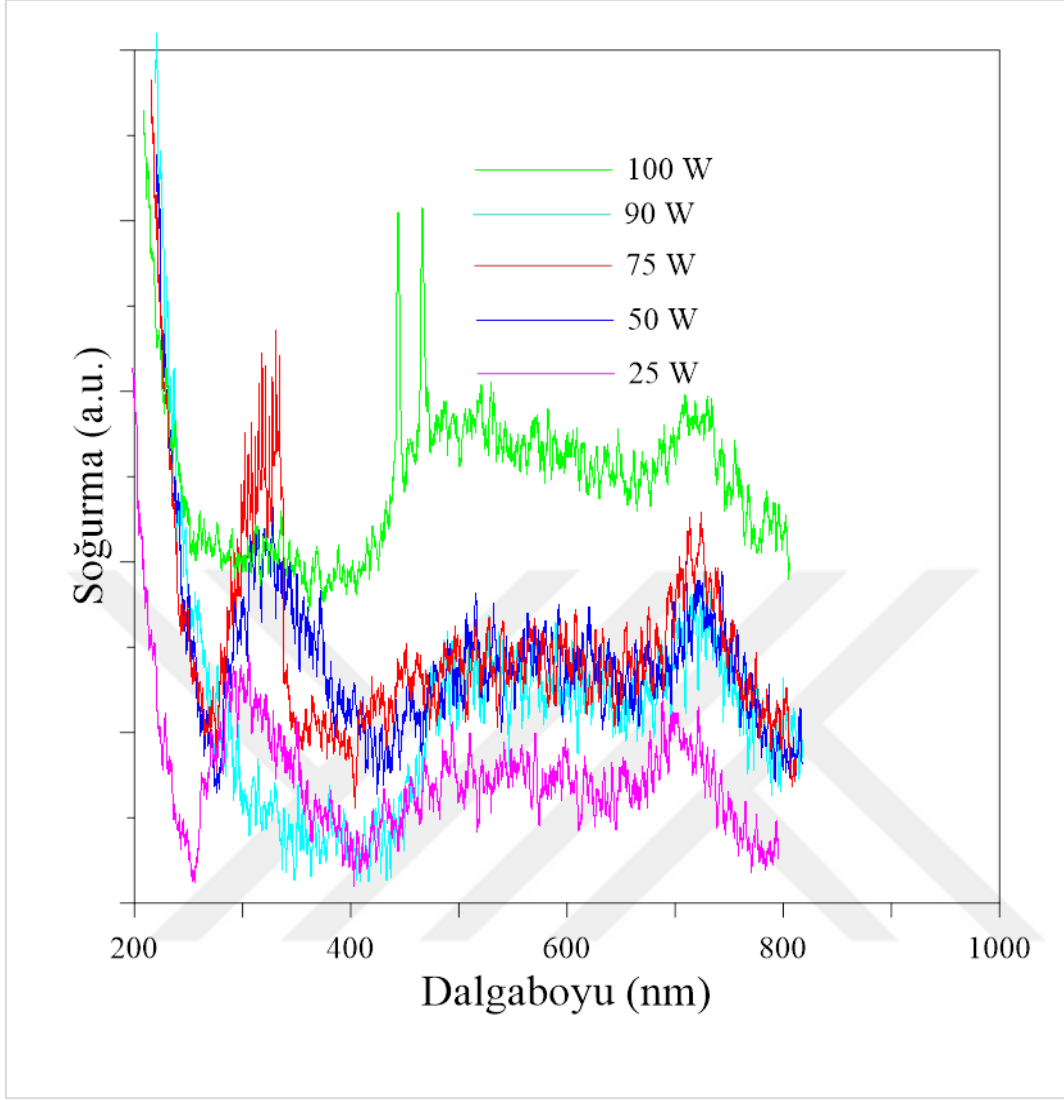
Çizelge 6. 11'den de görüldüğü gibi püskürtme gücü arttıkça taşıyıcı konsantrasyonu da artmıştır. Elektron taşıyıcıları ZnO filmlerin yapısal kusurlarının ve oksijen boşlukları miktarının artışıyla uyarılırlar. Zn ara yer atomları veya oksijen boşlukları sayısının azalması, taşıyıcı konsantrasyonunun düşmesine sebep olmaktadır. İyonize safsızlık saçılmalarından ve tane-sınır saçılmalarından dolayı Hall mobilitesi değerleri artmaktadır. Oksijen basıncının artmasıyla, oksijen boşluklarının konsantrasyonunun azalmasının ve XRD sonuçlarına göre, tanecik büyüklüğünün artması tanecik sınır saçılma etkisini azalttığından filmlerin öz direncinin düşmesine sebep olmaktadır.

### 6.2.3. Fotolüminesans (PL) –soğurma analizleri

Beş adet (25 W, 50 W, 75 W, 90 W, 100 W) ZnO filmi ve GaN için oda sıcaklığındaki PL emisyon spektrası şekil 6.5’te göstermektedir. ZnO emisyon pikleri sırasıyla, 422 nm, 465 nm, 425 nm, 420 nm, 421 nm, GaN emisyon piki 423 nm civarında görüldü. ZnO filmlerinin yakın bant kenarı emisyonuna (NBE) katkıda bulunur. Ayrıca taşıyıcıların derin donör seviyesinden Mg ile ilgili alıcı seviyesine geçişlerine atfedilen p-GaN film için pik 423 nm’de görülmektedir. 400 nm civarında merkezlenmiş zayıf band emisyonu vardır. Yaklaşık 400 nm çıktığı için mavi-mor ışık yayılımı vardır.



Şekil 6.5. Fotolüminesans (PL) spektrumu



Şekil 6.6. Soğurma spektrumu

İnce filmlerde yapı kusurları bulunur. Bunları dislokasyonlar, kırılan bağlar ve sitokiyometrik yapı olarak sıralanabilir. Biriktirme şartlarına bağlı olarak bu kusurların türleri ve miktarı değişir. Düşük plazma güçlerinde kusurların yoğunluğu azalır. İnce filmlerin emisyon özelliklerinin kalitesi iyileşir. Bu bilgiler ışığında plazma gücünün yeterince yüksek ve emisyon özelliğinin iyi olduğu sonucunu çıkarabiliriz. UV emisyonun dışında herhangi güçlü bir pik gözlenmemesi büyütülen yapıda pik yapısal kusurların ve kusur merkezlerinin olmadığını ya da çok zayıf olduğunu göstermektedir. Bu kusurlar oksijen boşlukları, çinko boşluklarıdır [88].

25 W rf gücü altında büyütülen numunenin PL spektrumu 422 nm çıkmıştır. Bu değer çivit mavi ışığın dalga boyu ( $\sim 420\text{--}450$  nm) değeri arasında yer almaktadır. Bu numunenin

şiddetinin düşük olması ışık yayma yatkınlığının diğer numunelere göre daha az olduğunu göstermektedir.

50 W rf gücü altında büyütülen numunenin PL spektrumu 465 nm çıkmıştır. Bu değer mavi ışığın dalga boyu (~ 450–485 nm) değeri arasında yer almaktadır. Şiddetinde önce bir düşüş gerçekleşip daha sonra tekrar yükseliş göstermiştir. Şiddet değerinde dalgalanma vardır. Bu dalgalanma yapısal kusurdan meydana gelmiş olabilir.

75 W rf gücü altında büyütülen numunenin PL spektrumu 425 nm çıkmıştır. Bu değer çivit mavi ışığın dalga boyu (~ 420–450 nm) değeri arasında yer almaktadır. Bu dalga boyuna karşılık gelen şiddet değerinin yüksek çıkması ışık yayma kapasitesine yatkın bir malzeme olduğunu gösterir.

90 W rf gücü altında büyütülen numunenin PL spektrumu 420 nm çıkmıştır. Bu değer çivit mavi ışığın dalga boyu (~ 420–450 nm) değeri arasında yer almaktadır. Bu dalga boyuna karşılık gelen şiddet değerinin 75 W rf gücünde büyütülen numune gibi yüksek çıkması ışık yayma kapasitelerinin birbirlerine yakın olduğunu gösterir.

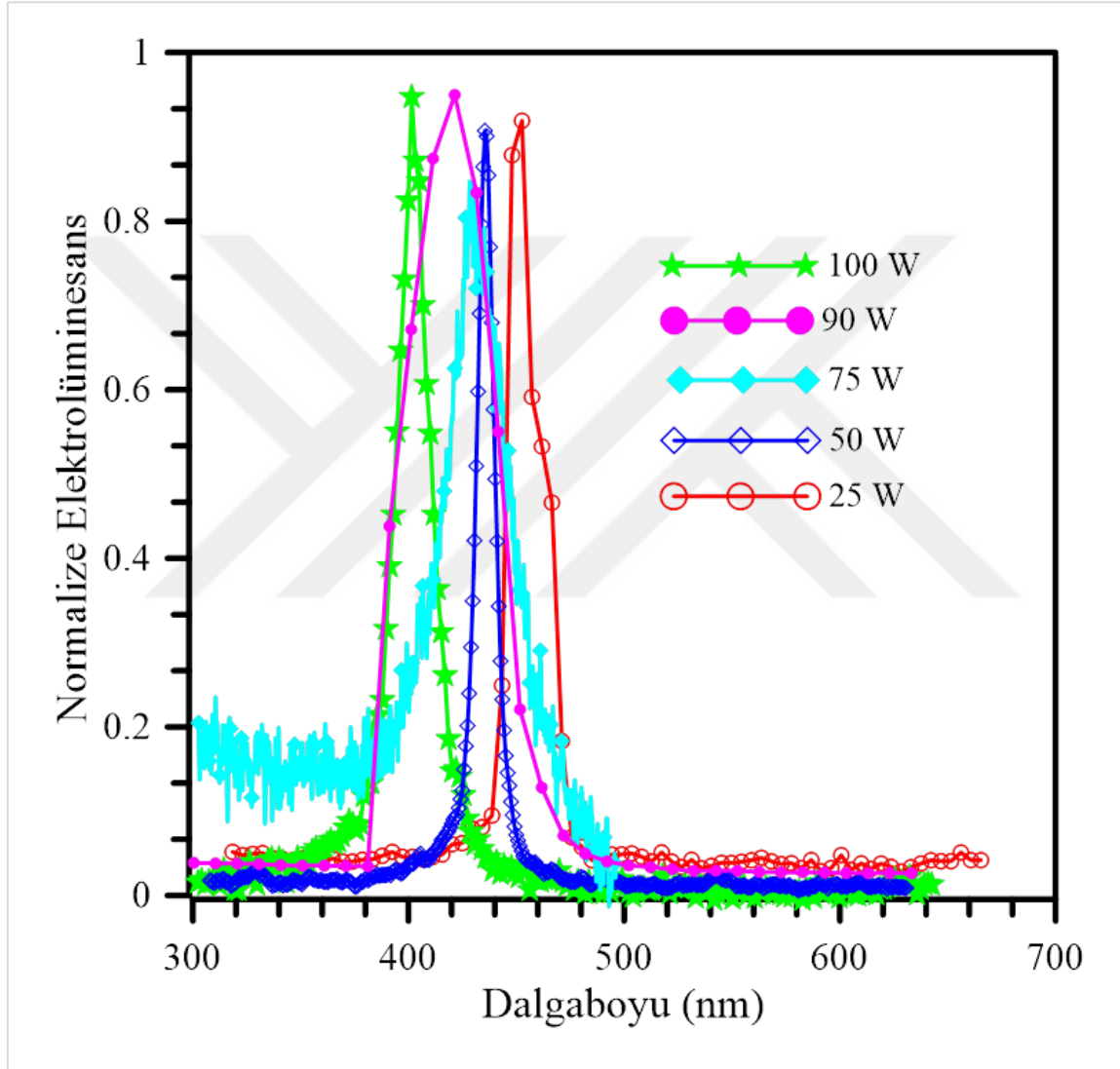
100 W rf gücü altında büyütülen numunenin PL spektrumu 421 nm çıkmıştır. Bu değer de çivit mavi ışığın dalga boyu (~ 420–450 nm) değeri arasında yer almaktadır. 75W, 90W, 100W gücünde büyütülen numunelerin ışık yayma kapasiteleri yüksek ve birbirlerine benzer çıkmıştır. Bu durumda ışığın daha verimli ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

ZnO'nun kristal kalitesini daha da belirtmek için oda sıcaklığında alınan bu fotoluminesans (PL) spektrum ölçümleri daha önce yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir [89].

Fotoluminesans sonuçlarını desteklemek amacıyla alınan soğurma grafiğindedir. Görüldüğü gibi beş farklı püskürtme gücünde üretilen ZnO ince filmine ait soğurma grafiği fotoluminesans pikleriyle uyumlu olarak yine yakın uv-mavi bölgede soğurma gerçekleştiğini göstermektedir.

#### 6.2.4. Elektrolüminesans (EL) analizleri

Sırasıyla 25 W, 50 W, 75 W, 90 W ve 100 W püskürtme güçlerinde biriktirilmiş ZnO ince filmler için 455 nm, 442 nm, 430 nm, 420 nm ve 395 nm'de bulunan Gauss fonksiyonu ile 6,4 mA akım altında elde edilen EL spektrumları grafiği şekil 6. 7'te gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Elektrolüminesans (EL) spektrumları grafiği

Fotolüminesans ile karşılaştırıldığında elektrolüminesans ışınımı p-GaN katmanındaki derin seviye taşıyıcı rekombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'i karşılaştırarak, ZnO / AlN / p-GaN LEed'in EL'sinin hem ZnO hem de GaN tarafından kaynaklandığı sonucuna varılabilir. Sonuç olarak, Anderson modeli kullanılarak oluşturulan bu heteroeklemin enerji bandı diyagramı ile desteklenmektedir. Bu modele

göre  $\chi_{\text{ZnO}}$ ,  $\chi_{\text{AlN}}$  ve  $\chi_{\text{GaN}}$  elektron afinitesi sırasıyla 4,35 eV, 2,05 eV ve 4,20 eV olarak alınmıştır. ZnO, AlN ve GaN'nin bant aralığı 3,37 eV, 6,2 eV ve 3,40 eV'dir. Sırasıyla ZnO / AlN ve GaN / AlN ara yüzündeki elektronlar  $\Delta E_C$  ve delikler  $\Delta E_V$  için enerji bariyeri aşağıdaki gibidir.

$$\Delta E_C = \chi_{\text{ZnO}} - \chi_{\text{AlN}} \quad (6.5)$$

$$\Delta E_V = E_{g \text{ AlN}} + \chi_{\text{AlN}} - E_{g \text{ GaN}} - \chi_{\text{GaN}} \quad (6.6)$$

Bu nedenle,  $\sim 2,30$  eV elektronların enerji bariyeri, deşiklerinkinden (0,65 eV) çok daha yüksektir. Bu bilgi bize GaN ve ZnO arasında bir AlN tampon katmanı oluşturulması gerektiğini gösterir. Böylece, AlN, iletim bandı bariyerinin yüksekliğini etkili bir şekilde artırabilir ve böylece elektronların GaN tarafına kaçmasını önleyebilir (2,05 eV'lik küçük elektron afinitesi ve 6,2 eV'lik geniş bant aralığı ile). Elektrolüminesans (EL) sonuçları ayrıca ZnO emisyonuna ulaşmanın ve hatta gün ışığı altında mavi emisyonu gerçekleştirmenin mümkün olduğunu doğrular. Bunun aksine, basit ZnO / GaN p-n heteroeklem için ( $\Delta E_C = 0,15$  eV ve  $\Delta E_V = 0,13$  eV), elektronlar ve deşikler için bariyer yüksekliği hemen hemen aynıdır [90]. Bu yüzden, ZnO emisyonunu ayırt etmek çok zordur. İleri sapma altında voltajın çoğu AlN bandı kıvrımları ve AlN tampon katmanına uygulanır. GaN tünellerinden gelen deşikler AlN tabakası boyunca ve ZnO tarafına enjekte edilerek radyasyon birleşimi meydana gelir. n-ZnO'daki taşıyıcı konsantrasyonu ve hareketliliği, p-GaN'deki deşikten daha büyüktür, bu da elektronların GaN tabakasına tünellemesiyle sonuçlanır. Sonuçta, radyasyon birleşimi hem ZnO hem de GaN tarafında ileri sapma altında meydana gelir. n-ZnO / p-GaN heteroeklem Led'lerinin elektrolüminesansı (EL), n-ZnO'dan elektron injeksiyonu p-GaN'den gelen deşik injeksiyonunu kazanacağından, esas olarak p-GaN'deki düşük taşıyıcı konsantrasyonundan dolayı n-ZnO yerine p-GaN'den yayılır.

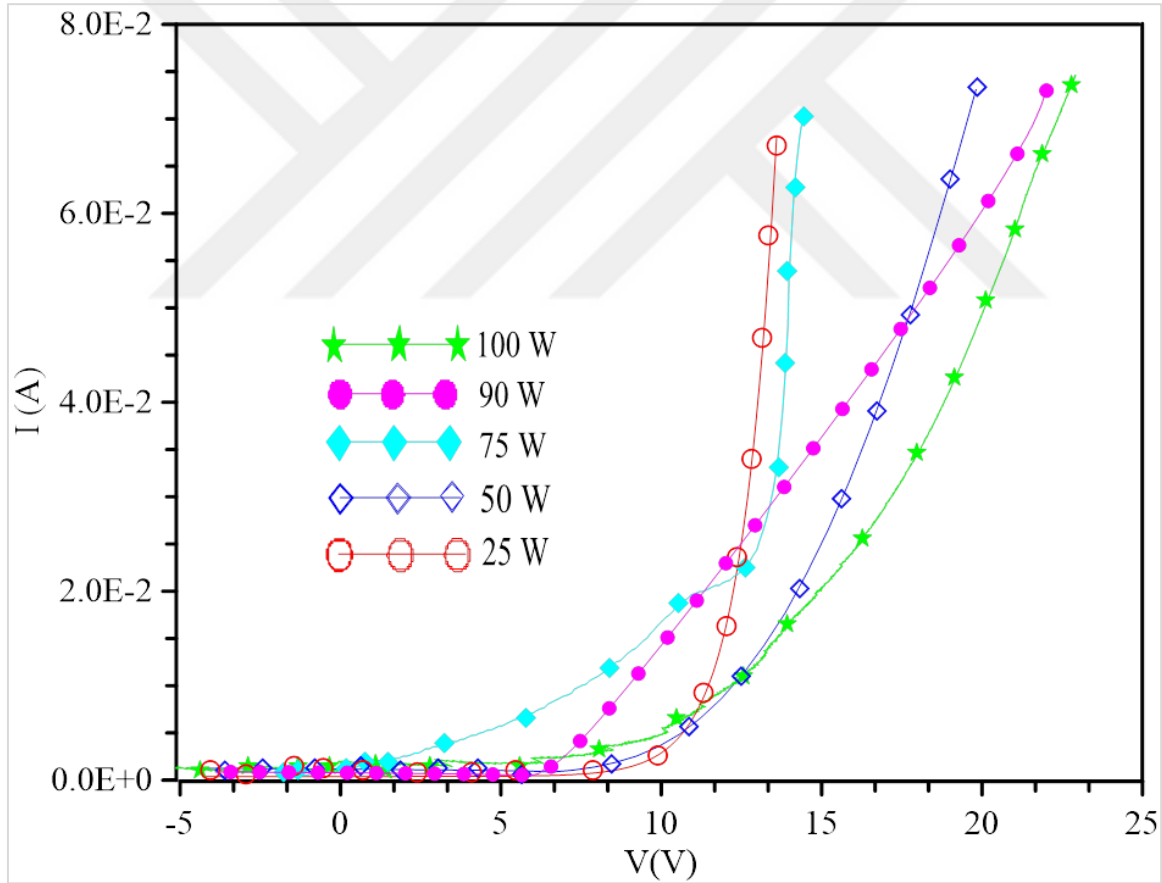
Püskürtme gücünün artmasıyla (455 nm (2,73 eV), 442 nm (2,81 eV) 430 nm (2,88 eV) 420 nm ( 2,95 eV ) 395 (3,14 eV) ) enerji bant aralığı değerleri artmıştır. Bu sonuçlar taşıyıcı konsantrasyonunun artmasından kaynaklanabilir (Çizelge 6.11). Bant aralığı genişlemesi (BGW) genellikle iletim bandının yüksek depolama konsantrasyonunda büyük ölçüde dolu olması ile Burstein-Moss (BM) etkisi ile açıklanmaktadır. BM etkisi taşıyıcı

konsantrasyonunun artmasıyla iletim bandına fermi seviyesinin birleştiği yerde bant kenarının maviye kayması olayıdır.

### 6.2.5. Akım Gerilim (I-V) analizleri

Led'in akım voltaj (I-V) özellikleri p-n bağlantı özelliği ve ışımaya olasılığı gösteren bir düzeltme etkisine sahiptir.

25 W, 50 W, 75 W, 90 W ve 100 W güç değişkenleri altında büyütülen ledlerin I-V eğrileri şekil 6.8 'de gösterilmektedir. Yapıların eşik voltaj değerleri 6,8 V, 6,4 V, 5,5 V, 3,3V, 5,2 V tur.



Şekil 6.8. I-V karakterizasyon eğrisi

Ara yüzeyde, bir elektron ve deşğin rekombinasyonu, nispeten daha küçük enerjiye sahip bir foton üretir. Bu, uygulanan ön gerilimin küçük olduğu durumdur. Üretilen ledler için ileri ön gerilim eşik değerleri 3,3 V- 6,8 V aralığında olup 455 nm (2,73 eV), 442 nm (2,81 eV), 430 nm (2,88 eV), 420 nm (2,95) ve 395 nm (3,14 eV) 'ye karşılık gelmektedir.

Dışarıdan uygulanan voltaj, ileri ön gerilimde bir eşik değerinden daha büyükse, taşıyıcılar daha yüksek enerjiye sahip olabilir ve ara yüzdeki bariyer daha ince hale gelir ve nihayetinde ZnO'nun iletim bandındaki elektronlar ve GaN'nin değerlik bandındaki deşikler rekombinasyon olmadan doğrudan arayüz boyunca sürüklenme olasılığına sahiptir. Bu elektronlar, GaN'nin (423 nm) bant kenarı emisyonuna yol açacak, deşikler ise 25 W, 50 W, 75 W, 90W ve 100 W püskürtme güçlerinde büyütülen ZnO için (422 nm, 465 nm, 425 nm, 420 nm ve 421 nm, bant kenarı emisyonuna yol açacaktır (Şekil 6.5). Bu arada, ara yüzdeki rekombinasyon ışık emisyonuna katkıda bulunmaya devam edecektir. Buna göre en fonksiyonel led 90 W'da üretilen cihazdır. Düşük voltaj değerinde akım iletimine geçmiştir. EL ve I-V sonuçları bunu desteklemektedir. Üretilen ledde yüksek verimde olan akım, elektrolüminesans ölçümlerinden de görüldüğü üzere ledin emisyonuna yansımaktadır. Bu durum üretilen ledin veriminin ve performansının yüksek olduğunu gösterir.



## 7. SONUÇ

Bu çalışmada ilk olarak MOCVD yöntemi kullanılarak c-(0001) düzlemlili safir alttaş üzerine 20 nm kalınlığında AlN çekirdekleşme tabakası epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Bu tabakanın üzerine yine MOCVD tekniği ile p- tipi malzeme elde etmek amacıyla 575 nm kalınlığında Mg katkılı GaN büyütmesi yapılmıştır. Alttaş ile GaN tabakası arasında AlN çekirdekleşme tabakası büyütmenin amacı dengeli bir akım iletimi sağlamak, örgü uyumsuzluğunu minimize etmek ve olası GaO<sub>x</sub> arafanın oluşmasını engellemek içindir. Ayrıca GaN ve ZnO arasında büyütülen AlN katmanı, hem GaN'ın daha iyi çekirdeklenmesini sağlar hem de ara katman olur. Bu durum tüm aktif alan üzerinde güçlü akım yayılmasına yol açar, geleneksel bir Led'den daha yüksek verim sağlar ve daha güçlü ışık yayar. GaN büyütmesinden sonra GaN tabakası üzerine tampon tabaka denilen, yapıdaki stres oluşumunu minimize etmek ve bantların göreceli hizalamasını sağlamak amacıyla 400 nm kalınlığında AlN tabakası büyütülmüştür. ZnO ve GaN arasında AlN tampon katmanının eklenmesi iletim ve valans bandında değişikliklere yol açar. AlN katmanı bir merdiven görevi görür. AlN ve GaN arasındaki valans band hizalaması ZnO ve GaN arasındakinden küçüktür. Bu durum AlN vasıtasıyla GaN'dan ZnO'ya deşik geçişini daha kolay hale getirir. Daha da önemlisi, bu deşiklerin ZnO'ya girmek için yalnızca 0,34 eV bariyerini aşması gereklidir. Öte yandan, AlN ve ZnO arasındaki iletim bandı hizalaması (3,28 eV kadar büyük), elektronların ZnO'dan p-GaN'a akışını engelleyebilir. Bu nedenle, elektron deşik rekombinasyonu ZnO katmanında meydana gelir ve oda sıcaklığında yeterli injeksiyon akımları altında yapıda UV EL gözlemlenebilir [90].

En üst tabakaya rf magnetron püskürtme yöntemi kullanılarak 5 farklı püskürtme güçleri altında (25W, 50W, 75W, 90W, 100W) 200 nm kalınlığında ZnO büyütmesi yapılmıştır. 100 W kadar yüksek bir değerın daha iyi bir ZnO filmi ve dolayısıyla daha iyi kristalize bir n-tabakasının oluşumuna izin verdiği sonucuna varılmıştır. Aşındırma işlemi yapılarak p-n eklemi oluşturulup kontak yapımıyla malzeme tamamlanmıştır. Yapının elektriksel, yapısal, optik ve morfolojik özellikleri incelenmiştir.

XRD ölçümlerinden farklı rf güçlerinde büyütülen filmlerin (002) yönelime sahip olduğu görülmüştür. (002) yönelimine sahip olan ince filmlerin 2θ değerleri 32.46<sup>0</sup>, 34.32<sup>0</sup>, 34.41<sup>0</sup>, 34.47<sup>0</sup>, 34.58<sup>0</sup> dir. JCPDS: 00-036-1451 ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürde benzer piklerin oluştuğu çalışmalar mevcuttur [87]. Pik

şiddetlerinde bir dalgalanma görülmüştür. Püskürtme gücü 25 W'dan 100 W'a yükseldikçe, FWHM 0,014'ten 0,008'e düştüğü ve parçacık boyutları 10,31 nm'den 18,23 nm'ye yükseldiği gözlemlendi. Ancak, 75 W güçte büyütülen film en şiddetli pike sahip olmaktadır. Yapıda keskin pikler görülmesi yapının iyi kristalleşme olduğunu gösterir. Rf gücü arttıkça piklerin ortalama yarı genişlik değerinde (FWHM) daralma görülmektedir. Bu durum ZnO'nun püskürtme gücü arttıkça arayüz boyunca basınç geriliminden kurtulduğunu gösterir. Ayrıca püskürtme gücünün artmasıyla dislokasyon yoğunluğu ( $\delta=1/D^2$ ) düşmektedir, bu da malzemenin yüksek mukavemete sahip olması dolayısıyla esnekliğin düşmesi anlamına gelmektedir. Ledin çalışma performansını olumsuz yönde etkileyecek bir faktör değildir.

Rf güç değişkenlerinin numunenin morfolojisine olan etkisini incelemek için AFM analizi yapılmıştır. AFM ölçümlerinde yüzey kalitesi püskürtme gücüyle orantılı olarak arttığı görülmüştür. Püskürtme gücünün artmasıyla boşluk azaldığı için yapı daha sıkı olmuştur. XRD sonuçlarına göre filmlerin (002) yönelimine sahip oldukları gösterilmiştir. Bu, AFM görüntülerinden de görüldüğü üzere, ZnO tabakalarının yüzeye dik büyüdüğünü ve sütunlu büyümenin belirginleştiği anlamına gelmektedir. Tanelerin büyümesi atomların enerjisiyle ilişkilidir. Yüksek plazma gücünün altında saçırılan atomlar büyük tane oluşturmak için gerekli yüzey difüzyon enerjisine sahiptirler. Bu nedenle artan tane boyutu ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün artması beklenen bir sonuçtur. Püskürtme gücü arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinde çok belirgin bir artış meydana gelmiştir ve XRD'den elde edilen parçacık boyut değerleri de bunu desteklemektedir. Hall ölçümleri yapılarak üretilen yapının elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir. Hall mobilitesi, öz direnci ve iletkenlikleri hesaplanmıştır. Püskürtme gücü arttıkça taşıyıcı konsantrasyonu artmıştır. Elektron taşıyıcıları ZnO filmlerin yapısal kusurlarının ve oksijen boşlukları miktarının artışıyla uyarılırlar. Zn ara yer atomları veya oksijen boşlukları sayısının azalması, taşıyıcı konsantrasyonunun düşmesine sebep olmaktadır. İyonize safsızlık saçılmalarından ve tane-sınır saçılmalarından dolayı Hall mobilitesi değerleri artmaktadır. Oksijen basıncının artmasıyla, oksijen boşluklarının konsantrasyonunun azalmasının ve XRD sonuçlarına göre, tanecik büyüklüğünün artması tanecik sınır saçılma etkisini azalttığından filmlerin direncinin düşmesine sebep olduğu görülmektedir. Püskürtme gücü arttıkça taşıyıcı konsantrasyonunda artış, öz dirençte azalma görülmektedir. Taşıyıcıların hareketini engelleyecek faktörlerin azaldığı, ortalama hızlarının arttığı, hareket kabiliyetlerindeki bu artış ile mobilitelerinin arttığı gözlenmektedir.

Farklı rf güçlerinde büyütülen yapıların fotolüminesans ve elektrolüminesans özellikleri de incelenmiştir. n-ZnO / AlN / p-GaN yapısı, derin seviyede emisyon olmadan güçlü mavi emisyonu sergiler. Bu pik, ZnO bazlı Led'lerin EL spektrumlarından sıklıkla gözlemlenmiştir ve ZnO'da rekombinasyonu oluşturur. ZnO / GaN heteroyapı Led'lerinin performansı arayüz katmanla güçlü bir şekilde ilişkilidir [90].

n-ZnO/p-GaN tabanlı heteroeklem Led'lerin elektrolüminesansı (EL), arayüzdeki büyük zorlamalara neden olan düşük kaliteli heteroeklemlere bağlıdır. İnce film yapısının yanı sıra Fresnel katsayıları ve toplam iç ışık yansımaları verimliliği azaltır. Led'ler bir GaN alttaş üzerinde ZnO nanoçubuk şeklinde üretilirse bu etkiler en aza indirilebilir. Nano ölçekli heteroeklemler, arayüzdeki zorlanmadan daha az etkilenir ve uyumsuzluğu azaltır. Aynı şekilde, nanoçubuk kullanılarak ışık yayma özelliği iyileştirilir [91].

EL yoğunluğunun, AlN ara tabakanın artmasıyla kademeli olarak artmasının literatürde ne oranda gerçekleştiğine bakıldığında etkileyici sonuçlarla karşılaşılmıştır. Nano-ZnO tabanlı heteroeklem cihazlarından saf ultraviyole elektrolüminesans için arayüz kontrolü çalışmasında AlN kalınlığının artırılmasıyla EL emisyon pikleri 394 nm, 387 nm, 413 nm'de ölçülmüştür. Ara yüzey katman kalınlığının artmasıyla rekombinasyonun artması dolayısıyla cihaz performansında artış gözlemlenmiştir [92]. Literatürde yapılan çalışma ile bu tez çalışması karşılaştırıldığında AlN ara tabakanın üretilen her bir numune için 400 nm kalınlığında büyütülmesi rekombinasyonu artırdığı ve led performansının istenen düzeyde olduğunu göstermektedir.

EL spektrumu, PL spektrumlarından biraz farklıdır. EL spektrumlarının şekilleri farklı olsa da, tepe konumları PL spektrumları ile oldukça benzerdir. Hem fotolüminesans hem de elektrolüminesans spektrasında iç soğurmanın ideal olduğu gözlenmiştir. Rf güç değişkeninin artışıyla gittikçe artan mavi ışık emisyonu görülmektedir. Püskürtme gücünün artmasıyla (455 nm (2,73 eV), 442 nm (2,81 eV) 430 nm (2,88 eV) 420 nm (2,95) 395 (3.14 eV) enerji bant aralığı değerleri artmıştır. Bu sonuçlar taşıyıcı konsantrasyonunun artmasından kaynaklanabilmektedir.

Farklı püskürtme güçleri altında eşik voltaj değerleri 6,8 V ile 3,3 V arasında çıkmıştır ve literatürle uyum içindedir [91]. Ayrıca, farklı püskürtme güçleri altında üretilen bu hibrit

cihazların I-V eğrileri, ileri ön gerilim altında hızla artan ve ters ön gerilim altında akım akışını bloke eden bir akımla verimli bir diyot gibi davrandığını göstermektedir.

Üretilen ledin performansı hakkında değerlendirme yapabilmek için EL ölçüm sonuçları I-V ölçüm sonuçları ile birlikte ele alınmalıdır. İdeal yük dengesi sağlanıp rekombinasyon olayı ne kadar çok artırılırsa ledin performansında o kadar artış gözlemlenir. Düşük voltaj değerinde akım iletimine başladığı I-V grafiğinden görülmektedir. Elde edilen bu akımın ledin ışık yayma kapasitesine yansıdığı, EL grafiğinde yüksek şiddette ışık emisyonu sergilediği bu iki ölçümün birbirini desteklediği görülmektedir.

Ayrıca, yüksek akım yoğunlukları ve yüksek EL değerleri elde edildiğinden, AlN katmanlarının doğru konumlandırılması ve katman kalınlıkları yapının performans değerlerine olumlu yansımıştır. Aynı zamanda, 90 W'lık yüksek püskürtme gücüyle akımda önemli bir artış elde edilebileceği bulunmuştur.

## KAYNAKLAR

1. Erol, A. ve Balkan, N. (2013). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*. (Birinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi, 296.
2. Choi, Y-S., Kang, J-W., Hwang, D-K. and Park, S-J. (2010). Recent advances in ZnO-based light-emitting diodes, *IEEE Translation Electronic Device*, 57, 26-41.
3. Huang, M.H., Mao, S., Feick, H., Yan, H., Wu, Y., Kind, H., Weber, E., Russo R. and Yang, P. (2001). Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers, *Science*, 292, 1897.
4. Lupan, O., Pauprt'e, T. and Viana, B. (2010). Low-temperature growth of ZnO nanowirearrays on p-silicon (111) for visible-light-emitting diode fabrication, *Advanced Materials*, 22, 3298.
5. Bayram, C., Teherani, F.H., Rogers, D.J. and Razeghi, M. (2008). A hybrid green light emitting diode comprised of n-ZnO/ (InGaN/GaN) multi-quantum-wells/p-GaN, *Applied Physics Letter*, 93, 081111.
6. Alivov, Y.I., Van Nostrand, J.E., Look, D.C., Chukichev, M.V. and Ataev, B.M. (2003). Observation of 430 nm Electroluminescence from ZnO/GaN Heterojunction Light-Emitting Diodes, *Applied Physics Letter*, (83, 14), 2943.
7. Gómez-Pozos, H., Arredondo, E. J. L., Maldonado Álvarez, A., Biswal, R., Kudriavtsev, Y., Pérez, J.V., Casallas-Moreno, Y.L. and Olvera Amador, M.L. (2016). Cu-Doped ZnO Thin Films Deposited by a Sol-Gel Process Using Two Copper Precursors: Gas-Sensing Performance in a Propane Atmosphere. *Materials*, 9, 87.
8. Wang, G., Chu, S., Zhan, N., Lin, Y., Chernyak, L. and Liu, J. (2011). ZnO homojunction photodiodes based on Sb-doped p-type nanowire array and n-type film for ultraviolet detection, *Applied Physics Letter*, 98, 041107.
9. Chen, M.T., Lu M.P., Wu, Y.J., Song, J., Lee, C.Y., Lu, M.Y., Chang, Y.C., Chou, L.J., Wang, Z.L. and Chen, L.J. (2010). Near UV LEDs made with in situ doped p-n homojunction ZnO nanowire arrays, *Nano Letter*, 10, 4387–4393.
10. Sun, X.W., Ling, B., Zhao, J.L., Tan, S.T., Yang, Y., Shen, Y.Q., Dong, Z.L. and Li, X.C. (2009). Ultraviolet emission from a ZnO rod homojunction light-emitting diode, *Applied Physics Letter*, 95, 133124.
11. Chang, S.P., Chuang, R.W., Chang, S.J., Chiou, Y.Z. and Lu, C.Y. (2009). MBE n-ZnO/MOCVD p-GaN heterojunction light-emitting diode. *Thin Solid Films*, 517, 5054–5056.
12. Li, S., Ware, M., Wu, J., Minor, P., Wang, Z., Wu, Z., Jiang, Y. and Salamo, G.J. (2012). Polarization induced pn-junction without dopant in graded AlGaIn coherently strained on GaN, *Applied Physics Letter*, 101, 122103.

13. Li, S., Ware, M.E., Wu, J., Kunets, V.P., Hawkrigde, M., Minor, P., Wang, Z., Wu, Z., Jiang, Y. and Salamo, G.J. (2012). Polarization doping: Reservoir effects of the substrate in AlGaIn graded layers, *Journal Applied Physics*, 112, 053711.
14. Wang, T., Wu, H., Chen, C. and Liu, C. (2012). Growth, optical, and electrical properties of nonpolar m-plane ZnO on p-Si substrates with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layers, *Applied Physics Letter*, 100, 011901.
15. Shih, Y.T., Wu, M.K., Chen, M.J., Cheng, Y.C., Yang, J.R. and Shiojiri, M. (2010). ZnO-based heterojunction light-emitting diodes on p-SiC(4H) grown by atomic layer deposition, *Applied Physics*, 98, 767–772.
16. Lim, J.H., Kang, C.K., Kim, K.K., Park, I.K., Hwang, D.K. and Park, S.J. (2006). UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering, *Advanced Materials*, 18, 2720–2724.
17. Liu, W., Gu, S.L., Ye, J.D., Zhu, S.M., Liu, S.M., Zhou, X., Zhang, R., Shi, Y., Zheng, Y.D., Hang, Y. and Zhang, C.L. (2006). Blue-yellow ZnO homostructural light-emitting diode realized by metal organic chemical vapor deposition technique, *Applied Physics Letter*, 88, 092101.
18. Du, G.T., Liu, W.F., Bian, J.M., Hu, L.Z., Liang, H.W., Wang, X.S., Liu, A.M. and Yang, T.P. (2006). Room temperature defect related electroluminescence from ZnO homojunctions grown by ultrasonic spray pyrolysis, *Applied Physics Letter*, 89, 052113.
19. Abbasi, M.A., Ibupoto, Z.H., Hussain, M., Nur, O. and Willander, M. (2013). The fabrication of white light-emitting diodes using the n-ZnO/NiO/p-GaN heterojunction with enhanced luminescence, *Nanoscale Research Letters*, 8, 320.
20. Sarı, H., (2008). *Yarıiletkenler ve optik özellikler*. Yüksek Lisans Ders Notları, Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
21. Şahin, A.R. (2020). *CdIn<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>,2Te<sub>0,8</sub> yarıiletken ince filmlerinin yapısal ve taşıyım özellikleri üzerine tavlama etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
22. Çavaş, M. (2011). *Nano yapılı metal oksit yarıiletkenler kullanılarak foto diyotların üretilmesi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
23. Gür, E. (2007). *Çinko oksit yarıiletkeninin yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyon teknikleriyle incelenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
24. Sanchez-Juarez, A., Tiburcio-Silver, A., Ortiz, A. Zironid, E.P. and Rickards, J. (1998). Electrical and optical properties of fluorine-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 333, 196-202.
25. Viswanath, R.N., Ramasamy, S.R., Ramamoorthy, R., Jayavel, P. and Nagarajan, T. (1995). *Nano Structured Materials*, 6, 993.

26. Wu, M. S., Azuma, A., Shiosaki, T., and Kawabata, A. (1989). Low-loss ZnO optical waveguides for SAW-AO applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 36(4), 442-445.
27. Cao, H., Wu, J. Y., Ong, H. C., Dai, J. Y., and Chang, R. P. H. (1998). Second harmonic generation in laser ablated zinc oxide thin films. *Applied Physics Letters*, 73(5), 572-574.
28. Samarasekara, P., Nisantha, A.G.K. and Disanayake, A.S. (2002). High Photo-Voltage Zinc Oxide Thin Films Deposited by DC Sputtering, *Chinese Journal of Physics*, (40, 2), 196-199.
29. Janotti, A., Van de Walle, C.G. (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, *Reports on Progress in Physics*, 72, 126501, 1-29.
30. Özgür, Ü., Alivov, C., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S-J. and Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal Applied Physics*, 041301, 39-45.
31. Look, D.C. (2001). Recent advances in ZnO materials and devices. *Materials Science and Engineering*, 80, 383-387.
32. Akın, N. (2015). *ZnO tabanlı UV dedektör geliştirilmesi ve prototip üretimi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
33. Zu, P., Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H. and Segawa, Y. (1997). Ultraviolet spontaneous and stimulated emissions from ZnO microcrystallite thin films at room temperature, *Solid State Communications*, 103, 459-463.
34. Tang, Z.K., Wang, G.K.L., Yu, P., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H. and Segawa, Y. (1998). Room-temperature ultraviolet laser emission from selfassembled ZnO microcrystallite thin films, *Applied Physics Letters*, 72, 3270-3272.
35. Vayssieres, L., Keis, K., Hagfeldt, A. and Linquist, S.E. (2001). Three-dimensional array of highly oriented crystalline ZnO microtubes, *Chemistry of Materials*, 13, 4395-4398.
36. Yu, H.D., Zhang, Z.P., Han, M.Y., Hao, X.T and Zhu, F.R. (2005). A general lowtemperature route for large-scale fabrication of highly oriented ZnO nanorod/nanotube arrays, *Journal of the American Chemical Society*, 127, 2378-2379.
37. Xu, L.F., Liao, Q., Zhang, J.P., Ai, W.C. and Xu, D.S. (2007). Single-crystalline ZnO nanotube arrays on conductive glass substrates by selective dissolution of electrodeposited ZnO nanorods, *Journal Physics Chemical*, 111, 4549-4552.
38. She, G.W., Zhang, X.H., Shi, W.S., Jack, X.F., Chang, C., Lee, C.S., Lee, S.T. and Liu, C.H. (2008). Controlled synthesis of oriented single-crystal ZnO nanotube arrays on transparent conductive substrates, *Applied Physics Letters*, 92, 053111, 1-3.

39. Elias, J., Tena-Zaera, R., Wang, G-Y. and Le'vyCle'ment, C. (2008). Conversion of ZnO nanowires into nanotubes with tailored dimensions, *Chemical Materials*, 20, 6633–6637.
40. Yu, Q.J., Fu, W.Y., Yu, C.L., Yang, H.B., Wei, R.H., Li, M.H., Liu, S.K., Sui, Y.M., Liu, Z.L., Yuan, M.X., Zou, G.T., Wang, G.R., Shao, C.L. and Liu, Y.C. (2007). Fabrication and optical properties of large-scale ZnO nanotube bundles via a simple solution route, *Journal Physical Chemistry*, 111, 17521-17526.
41. Tong, Y.H., Liu, Y.C., Shao, C.L., Liu, Y.X., Xu, C.S., Zhang, J.Y., Lu, Y.M., Shen, D.Z. and Fan, X.W. (2006). Growth and optical properties of faceted hexagonal ZnO nanotubes, *Journal Physical Chemistry*, 110, 14714–14718.
42. Xing, Y.J., Xi, Z.H., Xue, Z.Q., Zhang, X.D. and Song, J.H., Wang, R.M., Xu, J., Song, Y., Zhang, S.L. and Yua, D.P. (2003). Optical properties of the ZnO nanotubes synthesized via vapor phase growth, *Applied Physics Letter*, 83, 1689-1691.
43. Huang, M.H., Mao, S., Feick, H., Yan, H.G., Wu, Y.Y., Kind, H., Weber, E., Russo, R. and Yang, P.D. (2001). Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers, *Science*, 292, 1897-1899.
44. Toplan, H.Ö. (1998). *Kimyasal yöntemle üretilen düşük voltajlı varistörlerin mikro yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
45. Kasapoğlu, A.E. (2014). *Sol-jel spin kaplama metodu ile büyütülen ZnO ve ZnO: Fe ince filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
46. Lin, C.C., Hsiao, C.S., Chen, S.Y. and Cheng, S.Y. (2004). Ultraviolet emission in ZnO films controlled by point defects, *Journal of the Electrochemical Society*, 151 (5), 285-288.
47. Van de Walle, C.G. (2001). Defect analysis and engineering in ZnO. *Physica*, 308-310, 899-903.
48. Reynolds, D.C., Look, D.C., Jogai, B., Litton, C.W., Cantwell, G. and Harsch, W.C. (1999). Valence-band ordering in ZnO, *Physical Review*, 60, 2340-2344.
49. Lambrecht, W.R.L., Rodina, A.V., Limpijumnong, S., Segall, B. and Meyer, B.K. (2002). Valence band ordering and magneto-optic exciton fine structure in ZnO, *Physical. Review*, 65, 075207, 1-12.
50. Thonke, K., Gruber, T., Teofilov, N., Schönfelder, R., Waag, A. and Sauer, R. (2001). Donor-acceptor pair transitions in ZnO substrate material, *Physica Book*, 945, 308–310.
51. Polian, A., Grimsditch, M. and Grzegory, I. (1996). Elastic constants of gallium nitride, *Journal Applied Physics*, 79, 3343-3349.
52. Bateman, T. B. (1962). Elastic Moduli of Single-Crystal Zinc Oxide, *Journal Applied Physics*, 35, 3309-3312.

53. Murnaghan, F.D. (1944). The compressibility of media under extreme pressures, *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 30, 9, 244-247.
54. Dal Corso, A., Posternak, M., Resta, R. and Baldereschi, A. (1994). Ab initio study of piezoelectricity and spontaneous polarization in ZnO, *Physical Review*, 50, 10715-10721.
55. Nye, J. F. (1975). *Physical Properties of Crystals*, Clarendon: Oxford, 1508.
56. Morkoç, H. (1999). *Nitride Semiconductors and Devices*, Berlin: Springer, 32.
57. Ramachandran, S., Tiwari, A. and Narayan, J. (2004). Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O-based diluted magnetic semiconducting thin films, *Applied Physics Letter*, 84, 5255-5257.
58. Garcia, M. A., Merino, J. M., Fernández Pinél, E., Quesada, A., De la Venta, J., Ruiz Gonzalez, M. L., Castro, G., Crespo, P., Llopis, J., González-Calbet, J. M. and Hernando, A. (2007). Magnetic properties of ZnO Nanoparticles, *Nano Letter*. 7(6), 1489-94.
59. Fan, J.C., Chang, S.L. and Xie, Z. (2013). ZnO-Based Light-Emitting Diodes, *Intech Open Science*, 2, 26-50.
60. Minami, T., Sato, H., Nanto, H. and Takata, S. (1985). Optical properties of aluminum doped zinc oxide thin films prepared by Rf magnetron sputtering, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2, 24, 605-607.
61. Kohan, A. F., Ceder, G., Morgan, D. and Van de Walle. Chris G. (2000). First-principles study of native point defects in ZnO, *Physics Review*, 61, 15019-15027.
62. Look, D. C., Reynolds, D. C., Sizelove, J. R., Jones, R. L., Litton, C. W., Cantwell, G. and Harsch, W. C. (1998). Electrical properties of bulk ZnO, *Solid State Community*, 105(6), 399-401.
63. Kato, H., Sano, M., Miyamoto, K. and Yao, T. (2002). Growth and characterization of Ga-doped ZnO layers on *a*-plane sapphire substrates grown by molecular beam epitaxy, *Journal of Crystal Growth*, 237-239.
64. Park, C. H., Zhang, S. B. and Wei, S. H. (2002). Origin of *p*-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective, *Physical Review*, 66, 073202, 1-3.
65. Çil, C. Z. (2014). *Işık yayan diyotlar (LED'ler) ve aydınlatmada kullanımı*, LED Konferans Bildiri. Çankaya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ankara.
66. Tamulaitis, G. (2011). Ultraviolet light emitting diodes, *Lithuanian Journal of Physics*, 51(3), 177-193.
67. Tülek, R. (2010). *Yüksek performanslı Al(In)GaN/AlN/(In)GaN heteroeklem yapıların iletim özellikleri*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

68. Arslan, E. (2018). *Çinko oksit (ZnO) tabanlı ultraviyole (uv) ışık yayan diyotların elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.
69. Haris, W.A. (1980). *Electronic Structure and Properties of Solids*. New York: Dover, 174.
70. Leszczynski, M., Suski, T., Perlin, P., Teisseyre, H., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Porowski, S., Pakula, K., Baranowski, J.M., Foxon, C.T. and Cheng, T.S. (1996). Lattice parameters of gallium nitride. *Applied Physics Letters*, 69, 73.
71. Kasap, S., Capper, P. (2006). *Handbook of Elektronik and Photonic Materials*. New York: Springer, 19-43.
72. Tülek, R. (2010). *Yüksek performanslı Al(In)Gan/Aln/(In)Gan heteroeklem yapılarının iletim özellikleri*. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
73. Tombak, A. (2012). *Al:ZnO ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine gama ışınlarının etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
74. Seshan, K. (1927-1999). *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques, Principles, Methods, Equipment and Applications*, (Second Edition) California: Intel Corporation Santa Clara, 1-9.
75. Altun, D. (2018). *Safir alttaş üzerine mocvd ile büyütülen mavi led yapısının elektriksel karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
76. Cash, J. H., Richardson, Jr and James, A. (1967). Rf Sputtering Method and System, Ser. No. 643,613 Ent, C, C23cc 15/00.
77. Dönmez, M. (2015). *V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
78. Altuntaş, İ. (2018). *Safir alttaş üzerine mavi led yapısının büyütülmesi ve yapısal karakterizasyonu* Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
79. Kittel C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş* (Çev. B. Karaoğlu). İstanbul: Bilgi Tek Yayıncılık, 22, 434.
80. Kurtuluş, G. (2014). *p-Si, GaAs ve Ge alttaşlar üzerine Al:Zno filmlerin büyütülmesi; yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
81. Çelik, A. (2015). *In dereceli ve derecesiz In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N güneş pili yapılarının mozaik kusurlarının karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

82. Perkowitz, S. (1993). *Optical Characterization of Semiconductors: Infrared, Raman and Photoluminescence Spectroscopy*, San Diego: Academic Press, 1-100.
83. Kars Durukan, İ. (2013). *Al:ZnO ince filmlerinin büyütülmesi ve biyo-sensör özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
84. Tanrıöver, Ç. (2021). *Ge katkılı CuInTe<sub>2</sub> yarı iletken ince filminin yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
85. Yıldırım, T., Gür E., Tüzemen, S., Bilgin, V., Köse, S., Atay, F., Akyüz, I. (2005). Wide-bandgap modification of polycrystalline ZnO using Sn component on the basis of developing quantum-well hetero structure. *Physica-E*, 27, 290-295.
86. Arifin, P., Sugianto, Subagio, A., Sutanto, H., Dwiputra, D., Florena, F. F., Keintjem, A.C. and Khaeron, R. (2020). Room-temperature photoluminescence of Mg-doped GaN thin films grown by plasma-assisted MOCVD. *Aip Advances*, 10, 045123.
87. Talam, S., Karumuri, S. R. and Gunnam, N. (2012). Synthesis, characterization and spectroscopic properties of ZnO nanoparticles. *International Scholarly Research Network Isrn Nanotechnology*, 372505, 1-6.
88. Kim, J. H., Shin, T. H., Yang, K. J., Jeong, J. and Choi B. (2012). Abstraction of blue photoluminescence in Al-Doped ZnO nanoparticles prepared by electron beam deposition, *Applied Physics Express*, 5(1), 12603, 1-3.
89. Peng, Y., Que, M., Lee, H. E., Bao, R., Wang, X., Lu, J., Yuan, Z., Li, X., Tao, J., Sun, J., Zhai, J., Lee, K. J., and Pan, C. (2019). Achieving high-resolution pressure mapping via flexible GaN/ ZnO nanowire LEDs array by piezo-phototronic effect. *Nano Energy*, 58, 633-640.
90. You, J. B., Zhang, X. W., Zhang, S. G., Wang, J. X., Yin, Z. G., Tan, H. R., Zhang, W. J., Chu, P. K., Cui, B., Wowchak, A. M., Dabiran, A. M. and Chow, P. P. (2010). Improved electroluminescence from n-ZnO/AlN/p-GaN heterojunction light-emitting diodes. *Applied Physics Letter*, 96, 201102, 1-3.
91. Macaluso, R., Lullo, G., Crupi, I., Sciré, D., Caruso, F., Feltin, E. and Mosca, M. (2020). Progress in violet light-emitting diodes based on ZnO/GaN heterojunction. *Electronics*. 9, 991.
92. You, D., Xu, C., Qin, F., Zhu, Z., Manohari, G., Xu, W., Zhao, J. And Liu, W. (2018). Interface control for pure ultraviolet electroluminescence from nano-ZnO-based heterojunction devices. *Science Bulletin*. 63, 38-45.





*GAZİ GELECEKTİR..*