



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİNKO OKSİT (ZnO) TABANLI ULTRAVİYOLE
(UV) IŞIK YAYAN DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE
OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

Emre ARSLAN

20142108003

Şubat 2018

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİNKO OKSİT (ZnO) TABANLI ULTRAVİYOLE
(UV)IŞIK YAYAN DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE
OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Songül FİAT VAROL

Şubat 2018

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİNKO OKSİT (ZnO) TABANLI ULTRAVİYOLE
(UV) IŞIK YAYAN DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE
OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tez 12/02/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr.
Hande KARADENİZ
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr.
Songül FİAT VAROL
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Necati BAŞMAN
Üye

Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Emre ARSLAN

23/02/2018

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın yürütölmesi ve sonuçların değerlendirilip yorumlanması konularında yaptığı katkılar ve yönlendirici desteğinden dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Songöl FİAT VAROL'a (Giresun Üniversitesi, Mühendislik Faköltesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü); projedeki deneyleri gerçekleştirmemize olanak sağlayan Sayın Prof. Dr. Ziya MERDAN'a (Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Faköltesi, Fizik Bölümü); beni cesaretlendirip bu yola çıkmamı sağlayan Sayın Yrd. Doç. Dr. İlginç KIZILPINAR TEMİZER'e (Giresun Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu) teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emekleri ödenemez aileme teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup yardım ve teşviklerini esirgemeyen canım eşim, hayat arkadaşım Sayın Yrd. Doç. Dr. Özlem ARSLAN'a (Giresun Üniversitesi, Espiye Meslek Yüksekokulu) en içten sevgilerimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Yarıiletkenler ve Özellikleri	4
2.2. Yarıiletken (p-n) Tipleri	5
2.2.1. n- tipi yarıiletken	5
2.2.2. p- tipi yarıiletken	6
2.3. Yarıiletken (p-n) Eklemler	7
2.3.1. Homoeklemler	7
2.3.2. Heteroeklemler	8
2.3.3. Azınlık ve çoğunluk taşıyıcılar	9
2.4. Yarıiletkenlerde Soğurma (Absorbsiyon) Olayı	9
2.5. Optoelektronik Cihazlar	11
2.6. Işık Yayan Diyot (LED)	12
2.7. İnce Film Üretim Yöntemleri	15
2.8. Nitrat Yarıiletkenler	17
2.9. Çinko Oksit	26
2.9.1. Kristal yapısı	26

2.9.2. Örgü parametreleri	27
2.9.3. Elektronik bant yapısı	28
2.9.4. ZnO katkılama	30
2.10. Fotolüminesans (PL)	33
2.11. Akım Voltaj Karakterizasyonu	34
2.12. Magnetron Saçırma (Sputtering) Yöntemi	35
2.13. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) Yöntemi	37
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
3.1. Materyal	39
3.2. Yöntem	40
3.2.1. Aşındırma (etching) işlemleri	40
3.2.1.1. Kuru aşındırma	40
3.2.1.2. Islak aşındırma	42
3.2.2. Nitrat tabakalarının büyütülmesi	42
3.2.3. ZNO üretimi	43
3.2.4. Optik özellikler	43
3.2.4.1. Yapısal karakterizasyon	43
3.2.5. Optik karakterizasyon	45
3.2.5.1. Fotolüminesans (PL) ölçümü	45
3.2.5.2. Elektrolüminesans (EL) ölçümü	46
3.2.6. Elektriksel karakterizasyon	47
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	48
4.1. AFM Görüntülerinin Analizleri	48
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	59

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
Å	: Ångström
Al ₂ O ₃	: Safir
°C	: Santigrat
Ga	: Galliyum
GaAs	: Galliyum Arsenid
Ge	: Germanyum
GPa	: Gigapascal
Hz	: Hertz
In	: Indiyum
°K	: Kelvin Derece
mA	: Mili-amper
mbar	: Mili-bar
meV	: Mili-elektro volt
mW	: Mili-watt
nm	: Nanometre
Rf	: Radyo frekansı
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
V	: Volt
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko Oksit
λ	: Lamda
μ	: Mikro
Ω	: Ohm

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
CCD	: Yükleme İliştirilmiş Araç
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
ÇKK	: Çoklu Kuantum Kuyu
E	: Enerji
E _f	: Fermi enerji seviyesi
E _g	: Yasak enerji bant aralığı
EL	: Elektrolüminesans
eV	: ElektroVolt
FWHM	: Pik Yarı Genişliği
HEMT	: Yüksek Elektron Mobiliteli Transistörler
hν	: Fotonun Enerjisi
HVPE	: Hidrat Buhar Epitaksisi
LD	: Lazer Diyot
LED	: Işık Yayan Diyot
MBE	: Moleküler Demet Epitaksisi
MIS	: Metal YalıtkanYarıiletken
MO	: Metalik Organik
MOBFE	: Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MOVPE	: Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi
MQW	: Çoklu Kuantum Kuyu
NBE	: Yakın Bant Kenar Emisyonu
OE	: Optoelektronik
OMVPE	: Organik Metal Buhar Fazı Epitaksisi
PL	: Fotolüminesans
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
UV	: Ultraviyole
XRD	: X-ışını kırınımı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. n- tipi yarıiletken	6
Şekil 2.2. p- tipi yarıiletken	6
Şekil 2.3. Aynı tür eklem (Homoecklem)	7
Şekil 2.4. Farklı tür eklem (Heteroeklem)	8
Şekil 2.5. Işık-elektrik döngüsü	11
Şekil 2.6. p-n ekleme serbest elektron durumu	12
Şekil 2.7. p-n ekleme elektrik akımı oluşumu	13
Şekil 2.8. LED’de foton oluşumu	13
Şekil 2.9. Işık dalgaboyu frekans aralıkları	14
Şekil 2.10. Renklere göre LED’lerin özellikleri	16
Şekil 2.11. III Grubu nitratların dalgaboyu spektrumu	20
Şekil 2.12. (a) Wurtzite, (b) Zinc-blende, (c) Rock-salt biçimli kristal örgüler	21
Şekil 2.13. Yasak bant aralığı enerjisinin örgü sabiti ile değişimi	22
Şekil 2.14. ZnO’nun kristal yapıları	26
Şekil 2.15. Çinko oksit kristal yapısının iki farklı görünümü	27
Şekil 2.16. Wurtzite yapı	28
Şekil 2.17. ZnO’in bant yapısı	29
Şekil 2.18. ZnO wurtzite yapısının durum yoğunluğu	29
Şekil 2.19. Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 sistemi	34
Şekil 2.20. Magnetron saçtırma işlemi	36
Şekil 2.21. Şematik olarak MOCVD sistemi	38
Şekil 3.1. Al ₂ O ₃ /AlN/GaN/AlN/ZnO ile üretilen numunenin resmi	39
Şekil 3.2. Al ₂ O ₃ üstüne GaN ve ZnO büyütülerek üretilen numunenin resmi	40
Şekil 3.3. ZnO/AlN/p-GaN/n-ZnO ışık yayan diyotun şematik gösterimi	40

Şekil 3.4. ZnO ince filmin XRD kırınım deseni	44
Şekil 3.5. AlN, GaN ve Al ₂ O ₃ 'e ait tabakaların XRD kırınım deseni	44
Şekil 3.6. PL emisyon spektrasi	45
Şekil 3.7. EL emisyon spektrasi	46
Şekil 3.8. Üretilen diyotun I-V karakterizasyon eğrisi	47
Şekil 4.1. 80 W'da üretilen ZnO filmlere ait AFM görüntüleri	48



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Elektronikte yararlanılan yarıiletkenler ve kullanılma yerleri	5
Tablo 2.2. Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi	18
Tablo 2.3. GaN üsttabaka için kullanılan alttaşların parametreleri	19
Tablo 2.4. Nitrat tabanlı üst tabakada kullanılan alttaşların avantaj ve dezavantajları	20
Tablo 2.5. GaN ve AlN için bazı fiziksel özellikler	21
Tablo 2.6. Al ₂ O ₃ 'e ait temel parametreler	24
Tablo 2.7. Hesaplanan en yakın komşu bağ uzunlukları, negatif olarak yüklenen yerdeğiştiren safsızlıklar için kusur enerji seviyeleri (E _i), yerdeğiştiren alıcılardan pozitif yüklü AX merkezini oluşturmak için gerekli enerjiler (ΔE)	32
Tablo 4.1. Üretilen ZnO filminin yüzey parametreleri	48

ÇİNKO OKSİT (ZnO) TABANLI ULTRAVİYOLE (UV) IŞIK YAYAN DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada n-ZnO/p-GaN ışık yayan diyotun (LED) fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Diyotun optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. p- tipi yarıiletken elde etmek amacıyla magnezyum (Mg) katkılı GaN filmleri Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) tekniği ile safir (Al_2O_3) alttaş üzerinde büyütülmüştür.

n- tipi yarıiletken malzeme oluşturmak için katkısız ZnO ince filmler kullanılmıştır. Alttaş üzerine Saçırma Tekniği (Sputter) kullanılarak p-n eklemi elde edilmiştir.

p- tipi GaN ve n- tipi ZnO katmanlar üzerine ışık LED yapımını tamamlamak için altın (Au) kontaklar yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, X-ışınları kırınımı (XRD), ZnO filminin fotolüminesans (PL) eğrilerinin tespiti, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri, LED'in elektrolüminesans (EL) ve akım-voltaj (I-V) analizleri yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: LED, MOCVD, Saçırma Tekniği (Sputter), ZnO.

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZNO BASED ULTRAVIOLET LIGHT EMITTING DIODES

SUMMARY

In this study the fabrication of n-ZnO/p-GaN light emitting diode (LED) was completed. The optical and electrical specifications of diod were analyzed. We expanded magnesium (Mg) doped GaN films over sapphire (Al_2O_3) substratum by using Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) technique to obtain p-type.

n-type semiconductor material was obtained by using unadulterated ZnO thin films. p-n junction was obtained by Sputter technique over this layer.

Gold (Au) contacts were built to complete LED structure over p- type GaN and n- type ZnO layers.

In this study, analysis of X-ray diffraction (XRD), determination of photoluminescence (PL) curves of ZnO, images of atomic force microscopy (AFM), electroluminescent (EL) and current-voltage (I-V) of LED were completed.

Keywords: LED, MOCVD, Sputter, ZnO.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde çoğu elektronik ve optoelektronik cihazlarda p-n eklemler kullanılmaktadır. n- tipi veya p- tipi iletkenlik gösteren metal oksit yarıiletkenlerin iki farklı tipte olma sebepleri içerdikleri oksijen veya metal atomlarının eksikliği ya da fazlalığı nedeniyle. Oksit yarıiletken oluştuktan sonra katkı atomları yardımıyla yeni bir tip yarıiletkeni elde etmek mümkün değildir. Yeni tip oksit yarıiletkenler yalnızca oluşturulma ile üretilmektedirler. Bu sebeple oksit yarıiletkenlerden homoeklem oluşturulamaz, ancak p- tipi metal oksit üzerinde n- tipi oksit yarıiletken büyütülerek p-n tip bir heteroeklem elde edilebilmektedir.

Güncel literatürde çoğunlukla optoelektronik alanlardaki uygulamalarda, özellikle ışık yayan diyotlar (LED) ve mavi/morötesi (UV) lazerkonulu araştırmalara rastlanmaktadır. Araştırmaların birçoğunun konusunu oluşturan katkısız çinko oksit (ZnO) malzemesi, geçirgen iletken elektrot uygulamalarında kullanılmaktadır. Katkısız ZnO'nun kullanıldığı uygulamalara düz panel göstergeleri ve güneş pilleri örnek olarak verilebilir (Baik ve Cho, 1999). Bunlara ek olarak, ZnO ve katkılı ZnO filmler, optoelektronik gösterge aygıtlarında (Chopra ve Das, 1983) kullanıldığı gibi; ultra-yüksek frekanslı elektro-akustik transduserlerde (Hickermell, 1976) ve gaz sensörlerinde (Uozumi ve ark., 1997; Yoon ve ark., 1998; Bae ve Choi, 1999; Choi ve Choi, 2000; Hu ve ark., 2003; Aygün ve Cann, 2005; Mridha ve Basak, 2006) kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan p- tipi yarıiletken galyum nitür (GaN), optoelektronik endüstrisinin yüksek oranda tercih ettiği malzemedir. III-V grubundaki geniş bant aralıklı nitratların içeriği, alüminyum nitür (AlN), indiyum nitür (InN) ve GaN bunların alaşımlarıdır. Tüm bu nitratlar periyodik tabloda V. grupta yer alan azot elementinin bileşikleridir.

III-nitrür materyal sistemleri arasında kuvvetli kimyasal bağların olmasının nedeni, III-V grubu elementlerin elektronegatifliklerinin birbirlerinden oldukça değişik olmasıdır. III-V grubu nitrürler, yüksek bant aralığı enerjisine, yüksek ısı iletkenliğe, yüksek erime sıcaklığına, yüksek kırılma gerilimine ve düşük dielektrik sabitine sahiptirler. Tüm bu özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık ve güçlerde çalışabilen yüksekfrekans transistörlerinde, LED’lerde ve mavi/UV lazer diyotlarda kullanılabilmektedir. Bu durumun tam tersine klasik yarıiletkenler içeren sistemler yüksek sıcaklıkların ve zorlu şartların üstesinden gelemezler. III-Nitrür yarıiletkenlerde durum farklıdır; AlN ve GaN yarıiletken materyaller çeşitli mikroelektronik ve optoelektronik cihazlarda başarı ile uygulandığı için III-Nitrür yarıiletken materyaller birçok araştırmaya konu olmuşlardır (Jin ve ark., 2004; Gonchorek ve ark., 2006). Bu nedenle, III-Nitrür malzemeler yüksek teknoloji elektronik ve optiksel cihazlarda kullanımına ek olarak bileşik yarıiletkenler teknolojisi ve bilim dünyası için de oldukça önemli bir duruma gelmişlerdir (Pankove ve ark., 1971; Nakamura, 1991; Morkoç, 1999; Torabi ve ark., 2002).

Teknolojide GaN tabanlı malzemelere geçilmesinin uzun zaman almasının bazı nedenleri vardır. Bu nedenler baştan sona sıralandığında karşımıza üç ana sorun ortaya çıkmaktadır. GaN’ın tek kristal halinde büyütülmesi, p- tipi GaN filmlerin üretilmesinin oldukça güç olması ve büyütülen GaN tabakaların çoğunlukla n- tipi iletkenlik göstermesidir. Ayrıca GaN’ın büyütüleceği uygun alttaş malzemenin bulunması güçtür. GaN’ın ilk sentezlemesi ile amorf yapı oluşturulmuştur ve malzeme Ga üzerinden sıcak amonyak geçirilmesi ile meydana gelmiştir (Johnson ve ark., 1932). GaN’ın tek kristal olarak büyütülmesinin zorluğu ise yüksek erime sıcaklığına ve yüksek denge buhar basıncına sahip olmasıdır (Johnson ve ark., 1932; Porowski ve Grzegory, 1997; Ambacher, 1998; Jain ve ark., 2000; Jin ve ark., 2004; Gonchorek ve ark., 2006). Kaliteli GaN kristalinin büyütülebilmesi için yüksek azot basıncı ve yüksek büyütme sıcaklığı aynı anda gerekmektedir. Bununla birlikte GaN alttaşları temin etmek güç olduğu için GaN’ın diğer alttaşlar üzerine büyütülmesi ile ilgili gerekli inceleme ve araştırmalar yapılmıştır (Manasevit ve Simpson, 1969; Manasevit ve ark., 1971) ve araştırmalar sonucunda mekaniksel ve kimyasal dayanıklılığa sahip

hem de maliyeti düşük olan safir (Al_2O_3)'in alttaş olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Bu tez kapsamında Al_2O_3 alttaş üzerine günümüzde enyaygın olarak kullanılan Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) tekniği ile ilk önce AlN ekirdek tabakası daha sonra p- tip malzeme elde etmek amacıyla Mg katkılanarak GaN katman bytlmştir. Yine sputter tekniği kullanılarak GaN temelli mavi LED elde edilmesine çalışılmıştır. İlk yapıda homojen bir p- tipi iletkenlik elde etmek için daha kalın tabakalar kullanılmıştır. Bu yöntemler ile kirlilik ve kusurlardan arındırılmış bir malzeme ile yüksek kaliteli mavi LED-diyot elde edilmesi amaçlanmıştır.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler ve Özellikleri

Yarıiletken maddeler elektrik akımının eşik değerine kadar akmasını engelleyen ancak eşik değerinden sonra sonsuz küçük direnç göstermektedir. Yarıiletken maddeler periyodik cetvelde III. ve V. gruba girerler. Bu nedenle son yörüngelerindeki elektronları alıp verme eğilimleri iletken maddelerden fazla yalıtkan maddelerden ise azdır.

İletkenler: Pt (Platin), Ni (Nikel), Au (Altın), Cu (Bakır), Fe (Demir)...

Yalıtkan: Ebonit, Cam, Tahta, Su...

Yarıiletkenler: Si (Silisyum), Ge (Germanyum), Al (Alüminyum), In (İndiyum)...

Yarıiletkenlerin karakteristik özelliklerinden başlıcaları şu şekilde sıralayabiliriz (www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm):

- 1- İletkenlik bakımından yalıtkanlar ile iletkenler arasında yer alırlar;
- 2- Normal durumda yalıtkanlardır;
- 3- Işık, ısı ve manyetik etki altında kaldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar değerlik elektronu serbest duruma geçer, böylece iletkenlik özelliği kazanır.
- 4- İletkenlik özelliğini kazanması geçicidir, dış etkenler ortadan kalkınca elektronlar tekrar atomlarına dönerler.
- 5- Doğada saf halinde bulunduğu halde laboratuvarında bileşik madde olarak elde edilebilir.
- 6- Yarıiletkenler atomlarının kübik kafes sistemi ile belirli bir düzende sıralandığı kristal yapıya sahiptirler.

- 7- Kristal yapıya sahip yarı iletkenler, dış etmenler sayesinde iletkenlik kazanmalarının yanı sıra, yapılarına bazı özel maddeler katılarak da iletkenlikleri arttırılmaktadır.

Katkı maddeleri eklenerek iletkenlikleri arttırılan yarı iletkenler, özellikle Ge ve Si, elektroniğin iki temel elemanı olan diyot ve transistörlerin üretiminde kullanıldığından bu yarıiletkenlerin elektronikte oldukça önemli bir yeri vardır. Tablo 2.1.'de elektronikte yararlanılan yarıiletkenler ve kullanım yerlerine ait bazı bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.1. Elektronikte yararlanılan yarıiletkenler ve kullanılma yerleri.

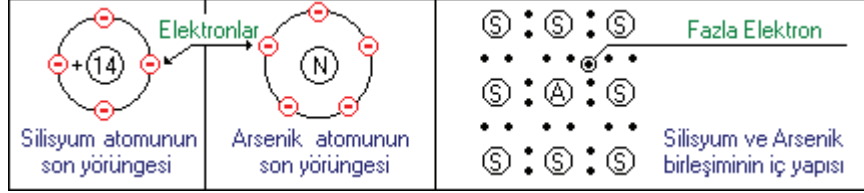
ADI	KULLANIM YERİ
Germanyum (Ge) (Basit)	Diyot, transistör, entegre devre
Silisyum (Si) (Basit)	Diyot, transistör, entegre devre
Selenyum (Se) (Basit)	Diyot
Bakır oksit (CuO) (Bileşik)	Diyot
Galliyum Arsenik (Ga As) (Bileşik)	Tünel diyot, lazer, fotodiyot, LED
İndiyum Fosfor (In P) (Bileşik)	Diyot, transistör
Kurşun Sülfür (Pb S) (Bileşik)	Güneş pili (Fotosel)

2.2. Yarıiletken (p-n) Tipleri

2.2.1. n- tipi yarıiletken

Arsenik (As) içerisinde bulunan atomların değerlik yörüngelerinde beş adet elektron bulunmaktadır. As ve Si atomları birleştirilirse, kurdukları kovalent bağdan As atomunun bir elektronu açıkta kalır. Şekil 2.1.'de As ve Si atomlarının birleşmesi ile oluşan n- tipi yarıiletken gösterilmiştir. Bu yüzden birleşimde çok sayıda elektron serbest kalmış olur. Birleşim olayında madde "Negatif Madde" özelliği kazanmaktadır.

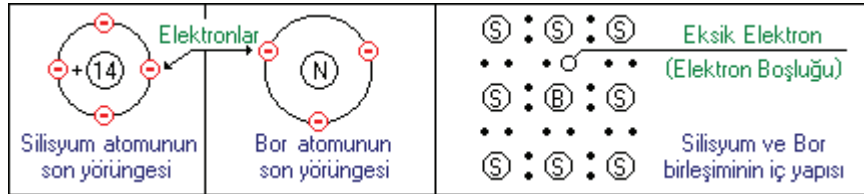
n- tipi madde eğer gerilim kaynağına bağlanırsa, üzerindeki serbest elektronlar kaynağın negatif kutbundan itilip pozitif kutbundan çekilirler ve gerilim kaynağının negatif kutbundan pozitif kutbuna doğru bir elektron akışı başlar (www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm).



Şekil 2.1. n- tipi yarıiletken (http://www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm).

2.2.2. p- tipi yarıiletken

Bor maddesinin valans yörüngesinde üç adet elektron bulunmaktadır. Silisyuma bor maddesi eklendiğinde atomların oluşturduğu kovalent bağlarda bir elektronluk açık kalır. Bu açıklığa "Boşluk" adı verilir. Elektron boşluğu, silisyum bor karışımına "Pozitif Madde" özelliği kazandırır. p- tipi maddeye bir gerilim kaynağı bağlandığında kaynağın negatif kutbundaki elektronlar p- tipi maddeki boşlukları doldurarak kaynağın pozitif kutbuna doğru ilerlerler (Şekil 2.2.). Elektronlar pozitif kutba doğru ilerlerken boşluklarda elektronların ters yönünde hareket etmiş olurlar. Bu durumda boşluk hareketi maddenin pozitif kutbundan negatif kutbuna doğru gerçekleşmektedir (www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm).

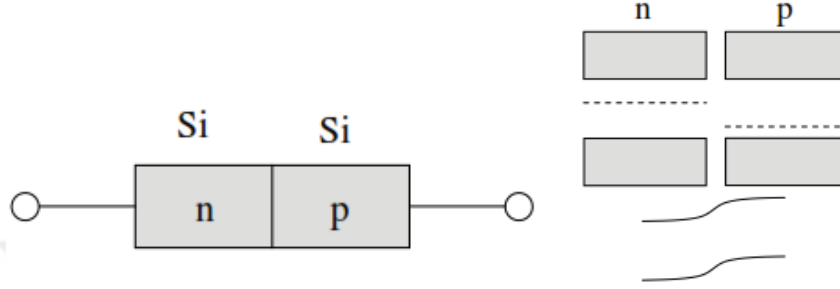


Şekil 2.2. p- tipi yarıiletken (http://www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm).

2.3. Yarıiletken (p-n) Eklemler

2.3.1. Homoeiklemler

Aynı tür yarıiletkenden oluşturulmuş n- ve p-tipi yarıiletkeni birleştirerek oluşturulan eklemler Şekil 2.3.'de gösterilmiştir (örneğin Si:Si, Ge:Ge).



Şekil 2.3. Aynı tür eklem (Homoecklem) (Sarı, 2009).

Aynı türden yapılmış p- tipi ve n- tipi katkılanmış yarıiletken malzemeyi düşünürsek, malzemeler aynı olduğu için (Si) n- ve p- tipi malzemenin bant aralığı da aynı olacaktır. n- tarafta, iletkenlik bandında serbest hareket eden elektronlar, p- tarafta da değerlik bandında serbest olarak dolaşan elektron holler bulunur.

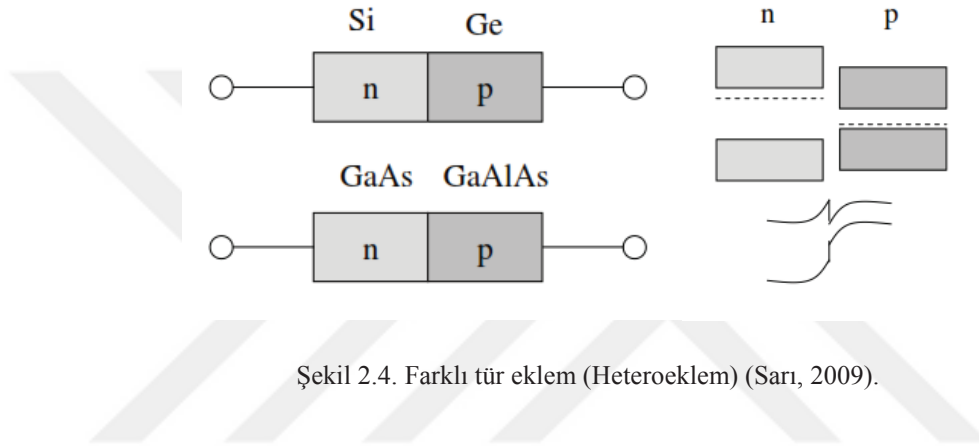
Her iki tarafta da net yük yoğunluğu sıfır olacak şekilde oluşturulan p-n ekleminde, p- ve n- taraftaki yük yoğunlukları farklı olduğundan, Fermi (E_f) seviyesi farklıdır. Yük dağılımı denge durumuna ulaşmaya kadar yani E_f seviyesi eşitleninceye kadar n- taraftaki elektronlar p- tarafına geçerek buradaki hollerle birleşir. n- tarafından ayrılan holler arkalarında pozitif hareketsiz iyonlar bırakır. Benzer şekilde p- tarafından ayrılan holler arkalarında negatif hareketsiz iyonlar bırakır. Hareketli yüklerden arınan bu bölgede (tüketim bölgesi) oluşan yapısal elektrik alan daha fazla elektronların n (p) tarafından p (n) tarafına geçmesini engeller ve denge durumu oluşur.

Bir p-n ekleminde ters beslem olarak adlandırılan ve akımın yok denecek kadar az olduğu gerilim uygulaması, p- tipi bölgeye negatif ve n- tipi bölgeye pozitif gerilim uygulanmasıyla gerçekleşmektedir, bu durumda oluşan elektriksel alan yüklerin hareketini büyük oranda engeller. Pozitif ve negatif gerilimler ters beslemin zıttı

şeklinde uygulandığında, p- tipi bölgeye pozitif ve n- tipi bölgeye negatif, düz beslem gerilim uygulaması ile akımın büyük miktarda geçtiği durum gerçekleşmektedir (Yanış, 2008).

2.3.2. Heteroeklemler

Farklı tür yarıiletkenleri birleştirerek oluşturulan eklemler Şekil 2.4.'de gösterilmiştir (örneğin Si:Ge,GaAs:GaAlAs).



Şekil 2.4. Farklı tür eklem (Heteroeklem) (Sarı, 2009).

Farklı yarıiletkenden yapılmış n- tipi ve p- tipi katkılanmış yarıiletken malzemeyi düşünelim. Malzemeler farklı olduğu için bant aralıkları da farklı olacaktır. Bir heteroyapı, kimyasal bileşim miktarının konuma göre değiştiği bir yarıiletken yapı olarak tanımlanır. En basit heteroyapı, iki farklı yarıiletken arasındaki ara yüzeydir. Örneğin; GaSb ve $Al_xGa_{1-x}As$, InAs ve GaAs yarıiletkenleri arasındaki heteroeklem. Birçok deneysel cihaz ya da numune birden çok heteroeklem içerir. İdeal bir heteroeklem, içinde özdeş atomların yayıldığı aniden değişen bir düzleme sahip yarıiletken kristalden ibarettir. Pratikte de bazı sistemlerde yaklaşık olarak ideal yapıya ulaşılmıştır. Yüksek kaliteli bile olsa birçok heteroeklemde ara yüzey keskindir (Fiat, 2012).

Heteroeklemin akım iletim mekanizması için ara yüzey etrafındaki enerji bant profili oldukça büyük rol oynar. Bir heteroeklemin enerjisi ve profili, ara yüzey gerçekleşmediğinde, heteroeklemi oluşturan iki yarıiletkenin elektron ilgisine, yasak enerji aralığına ve iş fonksiyonuna bağlıdır. Yarı iletkenlerin elektron ilgisi, iletim

bandının en alt seviyesinde bulunan elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı iken, yasak enerji Fermi seviyesinde bulunan elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Bir yarıiletkenin temel özellikleri olan elektron ilgisi ve yasak enerji bant aralığıdır ve katkılama bağımsızdır. Katkılama ile değişen parametre iş fonksiyonudur. İki yarıiletkenin de E_f seviyeleri termal dengede eşitlenene kadar, p- tipi yarıiletkenin ekleme yakın alandaki elektronları n- tipi yarıiletkene doğru, n- tipi yarıiletkenin ekleme yakın alandaki deşikleri p- tipi yarıiletkene doğru hareket ederler. Elektronlar p-tipi yarıiletkene hareket ederken geride pozitif verici iyonları, deşikler ise n- tipi yarıiletkene hareket ederken geride negatif alıcı iyonları bırakırlar (Kuş, 2010).

2.3.3. Azınlık ve çoğunluk taşıyıcılar

Ge ve Si maddeleri doğadan saf olarak elde edilememektedir. Safsızlığın meydana gelme nedeni, maddenin son yörüngesinde beş ve üç elektron bulunduran atomların olmasıdır. Bu durum p- tipi maddede elektron, n- tipi maddede boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Bununla beraber, p- tipi maddede istenmeyen boşluk sayısı, istenmeyen elektron sayısından fazladır. Diğer bir taraftan, n- tipi maddede de istenmeyen elektron sayısı, istenmeyen boşluk sayısından fazladır. Fazla olan boşluk ve elektronlara "Çoğunluk Taşıyıcılar" denirken, az olan boşluk ve elektronlara "Azınlık Taşıyıcıları" ismi verilmektedir. Azınlık taşıyıcılar yarı iletkenli elektronik devre elemanlarında sızıntı akımına sebep olmaktadır. İçeriğinde çok sayıda yarı iletkenli devre elemanı bulunduran cihazlarda fazladan gereksiz akım çekimine yol açar ve cihazın ısınmasına, hatta zarar görmesine neden olur (www.katihhal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm).

2.4. Yarıiletkenlerde Soğurma (Absorbsiyon) Olayı

Foton-yarıiletken etkileşmesinde birçok farklı durum ortaya çıkabilmektedir. Örneğin, fotonlar yarıiletken ile etkileştikten sonra ısıya dönüşebilmektedirler. Fotonlar donör veya akseptör kirlilik atomlarıyla ya da yarıiletken içindeki başka unsurlarla etkileşme

girebilirler. Bu sebeple, temel foton etkileşmesi değerlik bandındaki elektron ile olmaktadır.

Yarıiletken bir madde ışık ile etkileşime geçtiğinde foton soğurulabilir veya soğurulmayabilir. Bu durum gelen ışığın enerjisine veya yarıiletkenin yasak enerjisine bağlı olarak değişir. Ayrıca ışığın bir kısmı yarıiletkenin yüzeyinden saçılmaktadır. Gelen fotonun sahip olduğu enerji yarıiletkenin yasak enerji aralığından küçük ise ($E=h\nu < E_g$) foton yarıiletken tarafından soğurulmaz ve foton için bu yarıiletken geçirgendir. Diğer bir taraftan, fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük ise ($E=h\nu > E_g$), foton bir değerlik elektronu ile etkileşir ve gelen fotonun enerjisini alarak iletkenlik bandına geçer. İletkenlik bandı yüksek miktarda boş enerji seviyesi ve değerlik bandı çok sayıda elektron içerdiğinden $h\nu > E_g$ olduğu zaman bu etkileşme oldukça yüksektir. Bu etkileşme sonunda iletkenlik bandında bir elektron değerlik bandında bir boşluk, yani bir elektron-hol çifti meydana gelir. Bu da fazladan taşıyıcıların oluşumuna neden olmaktadır (Gökgöz, 2010).

Bütün optoelektronik aygıtların çalışması, elektron-hol çifti oluşumuna veya yok olmasına (rekombinasyona) dayanır. Çift oluşumu, elektronun enerji bakımından değerlik bandından iletkenlik bandına çıkarılmasıyla olur. Prensip olarak, yarıiletkene gelen herhangi bir enerjili parçacık, değerlik bandında bulunan bir elektrona en az yasak enerji aralığı kadar bir enerji aktarırsa çift oluşacaktır. Örgüdeki bağlanmaya göre bu durum kovalent bağın kırılması anlamına gelir. Elektron-hol çifti oluşturmanın en basit yolu yarıiletkeni aydınlatmaktır. Yeterli enerjiye sahip fotonlar soğurulur ve değerlik bandındaki elektronlara bu enerjinin aktarılmasıyla elektronları iletkenlik bandına çıkarır. Bu işlem soğurma olarak adlandırılır. Bunun tersi olan işlem, yani elektron-hol rekombinasyonu çiftin fazla enerjisini bırakmasıyla ilişkilidir. Rekombinasyon ışıklı veya ışısız olabilir. Işımsız geçişte rekombinasyondan dolayı fazla enerji genellikle fotonlara aktarılır ve ısı olarak açığa çıkar.

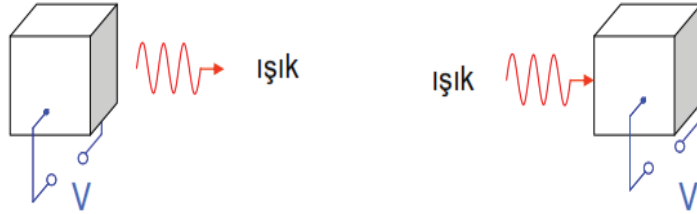
Işımsız geçişte ise fazla enerji genellikle bant aralığına eşit enerjiye sahip foton olarak açığa çıkar. Bu bir ışık yayınlama işlemidir ve elektron-hol çiftinin üretilme metoduna göre sınıflandırılır. Fotolüminesans foton gönderilerek üretilen elektron-hol çiftinin

ışıklı rekombinasyonun içerir. Katodoluminesans elektron bombardımanı ile üretilen elektron-hol çiftinin ışıklı rekombinasyon işlemidir. Elektrolüminesans p-n eklemi veya benzer bir aygıtta elektrik alan ile ışıklı rekombinasyon işlemidir (Bhattacharya, 1996).

2.5. Optoelektronik Cihazlar

Optoelektronik (OE), ışıkla etkileşen elektronik aletlerin incelenmesi ve bu aletlerin pratiğe uygulamasıdır. Burada kastedilen ışık, elektromanyetik spektrumun görünür bölge de dahil olmak üzere, kızıl ötesi ve mor ötesi bölgesidir. Alternatif bir tanım ise: elektriği ışığa (elektronu fotona) veya ışığı elektriğe (fotonu elektrona) dönüştürme işlevini gerçekleştiren herhangi bir alettir.

OE, ışığın yarıiletken malzeme içerisinde ve çoğunlukla da elektrik alanının varlığında kuantum mekaniksel özelliği temeline dayanır. Yarıiletken lazerler, LED, Yüklenme iliştirilmiş araç (CCD), foton detektörleri optoelektronik özellik gösteren aletlerdir. Şekil 2.5.'de optoelektronik malzemeler de elektriğin ışığa (elektronu fotona) veya ışığı elektriğe (fotonu elektrona) dönüştürme işlevi gösterilmiştir (Sarı, 2009).



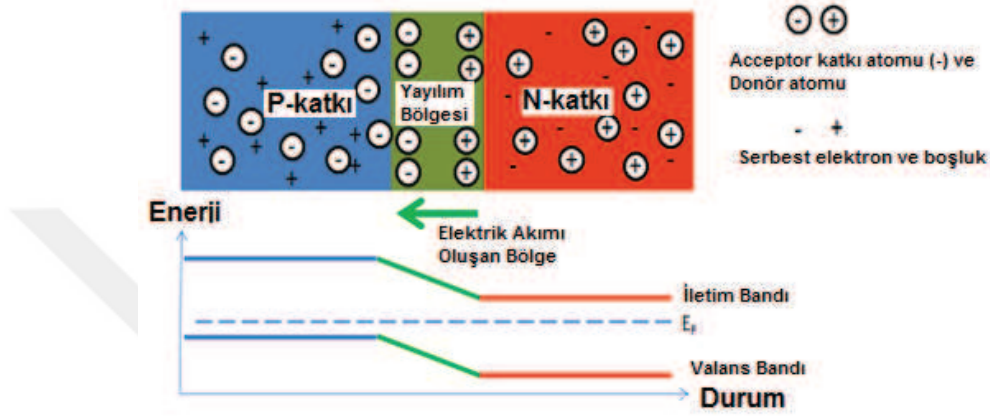
Şekil 2.5. Işık-elektrik döngüsü (Sarı, 2009).

Sinyal kalitesi olarak düşünülürse lazerlerle birlikte (tek renkli ışık) optik sinyalin bozunmadan optik fiberler içerisinde uzun mesafeler katetmesi mümkündür.

Yüksek bant genişliği olarak değerlendirirsek optik fiberler içinden ışık dalgası (10¹⁴ Hz) ile metal tellere göre daha fazla bilgi iletilebilirler. Optik fiberler yaklaşık GHz mertebesinde (yüksek bant aralığı) bilgi taşıma kapasitesine sahiptirler ve metalik telefon hatlarına göre 100 milyon kez daha fazla bilgi taşıyabilmektedirler (Sarı, 2009).

2.6. Işık Yayan Diyot (LED)

LED yarı-iletken bir ışık kaynağıdır. Gerilim uygulanarak elektronları harekete geçirilen LED ışın yaymaya başlar. Bu etki “elektroışınım” ya da “elektrolüminans” olarak adlandırılır. Diyot da olduğu gibi LED’de de küçük değerinde bir eşik gerilimi vardır. Bu eşik gerilimi aşıldığında eklemün direnci düşer ve akım iletmeye başlar.

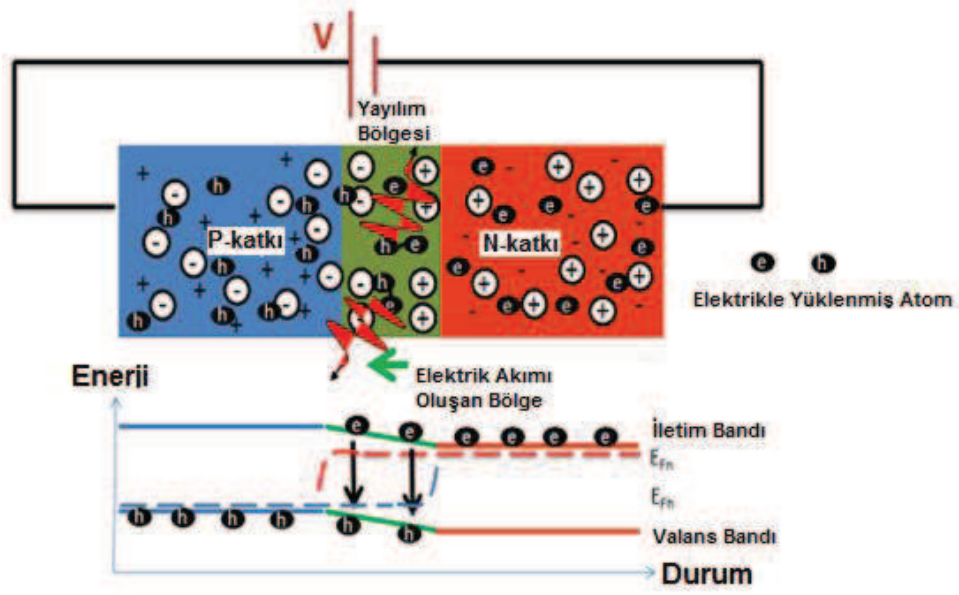


Şekil 2.6. p-n eklemde serbest elektron durumu.

n- tipi yarıiletkendeki serbest elektronlar p- tipi yarıiletken içindeki boşluklar ile birleşmek üzere harekete geçerler. Bu birleşme p- ve n- tipi yarıiletkenlerinin birleşme yüzeyi civarında olur. Çünkü oluşan elektrik alanı en kenardaki serbest elektronlar p- tipi yarı iletkenin en dışındaki boşlukların birleşmesini sağlayacak kadar güçlü değildir. Şekil 2.6.’da p-n eklemdeki serbest elektron durumu gösterilmiştir.

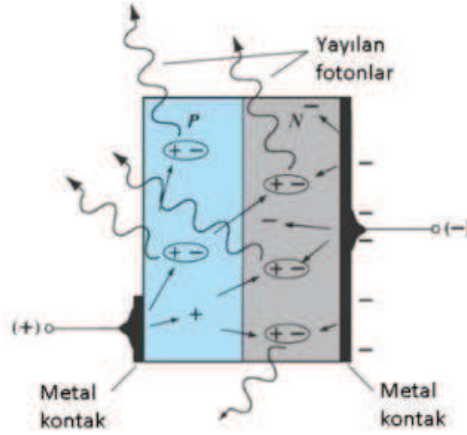
Birleşmeden sonra yayılım bölgesindeki (Depletion Region) akseptör atomları negatif iyon, donör atomları ise pozitif iyon dönüşür. Yayılım bölgesinde artık elektriksel bir alan yoktur.

Bir p-n diyota, doğru polarmalı bir besleme kaynağı bağlandığı zaman, n- bölgesinde ki serbest haldeki elektronlar ve bağlarını koparan elektronlar p- bölgesine doğru akın eder. Bilindiği gibi elektronları atomdan ayırabilmek için, belirli bir enerji verilmesi gerekmektedir. Bu enerjinin miktarı iletkenlerde daha az, yarı iletkenlerde daha büyük olmaktadır.



Şekil 2.7. p-n eklemde elektrik akımı oluşumu.

Şekil 2.7.'de bir p-n eklemdeki elektrik akımı oluşumu gösterilmektedir. Elektron bir atomla birleşirken de aldığı enerjiyi geri vermektedir. Bu enerji de maddenin yapısına göre ısı ve ışık enerjisi şeklinde etrafa yayılmaktadır (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. LED'de foton oluşumu (Avcı ve İstanbullu, 2017).

Eğer bir yarıiletken doğrudan geçiş bant aralığına sahipse (GaAs gibi) hol ve elektronlar momentumlarında bir değişiklik olmadan birleşir ve bir foton (ışığın kuantumlu hali) yayarlar. Yarıiletken doğrudan geçişli bant aralığına sahip değilse (Si

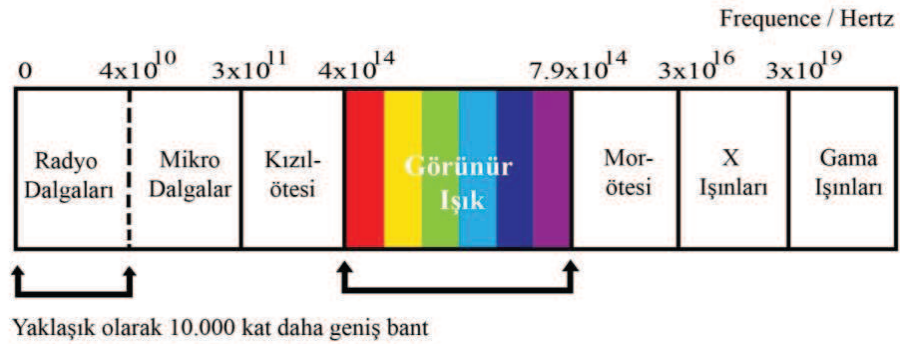
gibi) hol ve elektron birleşiminde momentum değişimi olur ve foton meydana gelmez. Bu nedenle LED'ler GaAs gibi bileşik yarıiletkenlerden oluşur. LED için diyot akımı yarıiletkende meydana gelen rekombinasyon oranına bağlıdır. Bununla birlikte LED'den yayılan foton yoğunluğu da diyot akımıyla doğru orantılıdır (Avcı ve İstanbullu, 2017). Bir LED'in üretimi sırasında kullanılan değişik katkı maddesine göre verdiği ışığın rengi değişmektedir. Katkı maddesinin cinsine göre şu ışıklar oluşur:

- GaAs (GalliyumArsenid) : Kırmızı ötesi (görülmeyen ışık)
- GaAsP (GalliyumArsenid Fosfat) : Kırmızıdan - yeşile kadar (görülür)
- GaP (Galliyum Fosfat) : Kırmızı (görülür)
- GaP (Nitrojenli) : Yeşil ve Sarı (görülür)
- ZnO(Çinko oksit) UV-görünür.

LED'ler yaydıkları ışığın spektrumuna ve dalga boyuna göre iki sınıfa ayrılır:

- 1-Görünen ışık veren LED'ler
- 2- Kızıl ötesi ışık veren LED'ler

Şekil 2.9.'da ışık dalga frekanslarına göre bant aralıkları ve renk dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Işık dalgaboyu frekans aralıkları (www.emo.org.tr).


LED'ler çeşitli inorganik yarıiletken malzemelerden yapılırlar. Şekil 2.10.'da piyasada bulunabilen renkler için dalga uzunluğu aralığı, gerilim düşümü değeri ve malzeme bilgileri verilmektedir (www.emo.org.tr).

Diyot kristali gibi iki parçalı yapıldığında uygulanacak gerilimin büyüklüğüne göre yeşil, kırmızı veya sarı renklerden birini vermektedir. LED ısındıkça ışık yayma özelliği azalmaktadır. Bazı hallerde fazla ısınmayı önlemek için bir soğutucu üzerine monte edilir. Ayrıca LED'in aşırı ısınmasına yol açmamak için belirtilen akımı aşmamak gerekir. Bunun için devresine seri olarak bir direnç (R) eklenir. Bu R'nin büyüklüğü LED'in dayanma gerilimi ile besleme kaynağı gerilimine göre hesaplanır.

2.7. İnce Film Üretim Yöntemleri

İnce film yapımında uygun kaplama tekniğinin belirlenmesini sağlayan belirli etkenler vardır. Bu etkenler sırasıyla; depolanacak ince filmlerin özellikleri, filmlerin kullanım alanları, kaynak ve alttaş malzemelerin sıcaklık optimizasyonu, düzensellik ve kalınlığın homojenliği, biriktirme hızı ve ticari maliyetlerdir. Tüm bu etkenler nedeniyle, ince filmlerin istenilen bileşimi ve mikro yapısı, ancak kaynak ve alttaş malzemelerin neden olduğu kısıtlanmalar göz önüne dikkate alınarak uygun biriktirme tekniğinin seçilmesi ile elde edilebilir.

Kaliteli bir ince filmin yapılabilmesi için, ortamın vakum etkisinde olması gerekmektedir. Vakumlu ortamda kullanılan en yaygın yöntem, fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği, malzemelerin buharlaştırılarak çeşitli yüzeyler üzerine biriktirilmesinde kullanılan birçok vakum biriktirme yöntemini kapsayan genel bir tekniktir. Vakum biriktirme, yüksek sıcaklık ve plazma püskürtme bombardımanı gibi kimyasal reaksiyon içeren kaplama yöntemlerinin aksine, PVD yöntemi yüzeyde kimyasal reaksiyon içermez (Tombak, 2012).



Renk	Dalgaboyu (nm)	Gerilim (V)	Yarıiletken Malzeme
Kızılötesi	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Galyum arsenik (GaAs); Alüminyum galyum arsenik (AlGaAs)
Kırmızı	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Alüminyum galyum arsenik (AlGaAs); Galyum arsenik fosfat (GaAsP); Alüminyum galyum indiyum fosfat (AlGaInP)
Oran	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Galyum(III) fosfat (GaP); Galyum arsenik fosfat (GaAsP); Alüminyum galyum indiyum fosfat (AlGaInP)
Sarı	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Galyum(III)fosfat (GaP); Galyum arsenik fosfat (AlGaInP); Alüminyum galyum indiyum fosfat (AlGaInP); Galyum(III)fosfat
Yeşil	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	İndiyum galyum nitrit (InGaN) / Galyum(III) nitrit (GaN); Galyum(III) fosfat (AlGaInP); Alüminyum galyum indiyum fosfat (AlGaInP); Alüminyum galyum fosfat (AlGaP)
Mavi	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Çinko selenyum (ZnSe); İndiyum galyum nitrit (InGaN) Silisyum karbür (SiC) alttaç olarak kullanılan Silisyum (Si)
Menekşe	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	İndiyum galyum nitrit (InGaN)
Mor	Çoklu Tipler	$2.48 < \Delta V < 3.7$	İkili mavi/kırmızı LED, mavi ile kırmızı fosfor ya da beyaz ile mor
Mor Ötesi	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Elmas (235 nm); Boron nitrit (215 nm); Alüminyum nitrit (AlN) (210 nm); Alüminyum galyum nitrit (AlGaInN); Alüminyum galyum indiyum nitrit (AlGaInN) - 210 nm'ye kadar olanlar
Beyaz	Geniş Spektrum	$\Delta V = 3.5$	Mavi / UV diyet ile sarı fosfor

Şekil 2.10. Renklere göre LED'lerin özellikleri (www.emo.org.tr).

2.8. Nitrat Yarıiletkenler

360 nm altı dalga boylarında yüksek verimli ve parlak UV-LED ışık kaynakları tıbbi ve kısa mesafe gizli taktiksel iletişim cihazlar ile biyolojik-kimyasal ajan tespiti (Sakai, 2010), sterilizasyon ve saflaştırma, yüksek kapasiteli veri depolama sistemleri vekatı hal beyaz aydınlatmagibi birçok uygulama alanında kullanılan sistemlerde başarı ile uygulanmaktadır. Geleneksel UV-ışık kaynaklarına göre düşük ısı üretimleri, kompakt tasarımları, yüksek performansları, yüksek verimleri ve düşük güç tüketimi nedeniyle oldukça çekici bir alternatiftir. Bu sebeple bu bölgede ışımaya yapacak yüksek performanslı UV-LED yapılarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Nitrat temelli üçlü bileşiklerden olan $Al_xGa_{1-x}N$ genişbant aralığı enerjisi sayesinde (3.4 eV-6.2eV) 360 nm altında UV-ışımaya verebilecek bir malzemedir. Geleneksel GaN/InGaN temelli görünür bölge LED ışık kaynaklarında olduğu gibi $Al_xGa_{1-x}N / Al_yGa_{1-y}N$ çoklu kuantum kuyu (ÇKK) temelli UV-LED yapılarında Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOBFE) yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bu amaçla GaN/AlGaN (<360 nm) (Bai, 2006; Airey, 2008; Wang, 2008; Nagata, 2010), $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ (<300nm) (Sumiya, 2008), InGaN/AlInGaN (370 nm< λ <390nm) (Crawford, 2000; Taniyasu, 2002) tipinde kuantum kuyu yapıları geliştirilmiştir. Bir diğer çalışmada da (Horn, 2007) yüzeyi patern edilmiş ve edilmemiş safir üzerine InGaN/AlGaN kuantum kuyu yapıları LED elde ederek dışsal kuantum veriminde patern edilmiş safir üzerinde ~ %35 gibi bir artış gözlemlenmiştir (Fujikawa, 2008). $In_{x1}Al_{y1}Ga_{1-x1-y1}N / In_{x2}Al_{y2}Ga_{1-x2-y2}N$ tipinde kuantum kutu yapıları (MQW) yapıları ile 346 nm’de 8.4mW gibi yüksek bir çıkış gücü elde etmişlerdir. $Al_xGa_{1-x}N / AlN$ tipindeki çoklu kuantum kuyu yapılarından da 280-290 nm aralığında ışımaya alındığı (Gautier, 2008) rapor edilmiştir.

Safir üzerine GaN büyütülmesine yönelik çalışmalar ilk olarak 1969 yılında “Hidrat Buhar Epitaksisi” (HVPE) yöntemi ile başlamıştır (Tablo 2.2.). 1971’de ilk metalyalıtkan-yarıiletken (MIS) ışık yayan diyot yapısı gösterildi. Ancak 1989 yılına kadar GaN üzerine çok az sayıda araştırma yayınlanabilmiştir. 1992’den bu yana III grubu nitratları üzerine yapılan çalışmalar hızlı bir yükseliş göstermiştir. Çiftli heteroyapılı LED’lerden, yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMT) kadar birçok yapı bu nitratlı bileşikler ile elde edilmiştir. GaN malzemesi elde etmede zaman

içerisinde birden 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

Tablo 2.2. Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi (Öztürk, 2011).

Yıl	Gelişme	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 aratabaka (MBE yöntemi ile)	Yoshida ve ark.
1986	Safir üzerine AlN tampon kullanılarak çok düzgün yüzeyli GaN elde edildi (MOCVD)	Amano ve ark.
1989	p-tipi GaN, Mg katkılı GaN, GaN p-n birleşimli LED (MOCVD)	Amano 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) İlk mavi renkli lazer diyot	Khan ve ark. Nakamura ve ark.
1997	Piezoelektrik etkinin deneysel sonuçları SiC üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı LiAlO ₂ üzerine GaN (MBE yöntemi ile) LiAlO ₂ üzerine GaN (MOCVD yöntemi ile)	Asbeck ve ark. Binari ve ark. Hellman ve ark. Kryliouk ve ark.
1998	GaN/Al _{0.15} Ga _{0.85} 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 ₂ 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/GaN DBR üzerine mavi LED	Ishikawa ve ark.
2008	150 mm (001) Si üzerine InGaIn/GaN mavi LED	Schulze ve ark.
2004	ELO AlGaIn üzerine UV-LED	Amano ve ark.
2005	LiAlO ₂ 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.

elde etmede kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Moleküler Demet Epitaksisi (MBE), Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi (MOVPE), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Hidrat Buhar Fazı epitaksisi (HVPE), “Sublimation Sandwich Tekniği”dir. MOVPE tekniği Metal Organik Kimyasal Buhar biriktirme (MOCVD) ve Organik Metal Buhar Fazı Epitaksisi (OMVPE) adlandırmaları ile aynı anlamda kullanılmaktadır (Öztürk, 2011).

GaN üsttabaka için kullanılan alttaşların bazı parametreleri ile örgü uyumu olmayan yapılar için örgü sabiti, termal genleşme katsayısı, termal iletkenlik katsayısı ve örgü uyumsuzluğu yüzdeleri Tablo 2.3.’de gösterilmektedir. Tüm bunlara ek olarak, nitrat tabanlı üst tabakada yaygın olarak kullanılan alttaşların bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Tablo 2.4.).

Tablo 2.3. GaN üsttabaka için kullanılan alttaşların parametreleri (Dikme, 2006).

Alttaş	$a(\text{Å})$	$f(\%)$	$\alpha(10^{-6} K^{-1})$	$\kappa(Wcm^{-1}K^{-1})$	(S)
GaN(0001)	3,1876	0	5,59	1,3	3000
Al ₂ O ₃ (0001)	4,758(2,747)	+33(-13,8)	7,5	0,4	50
Si(111)	3,8396	+20,4	3,59	1,5	20
SiC(0001)	3,0806	-3,4	3,2	4,9	1000
SI-SiC(0001)	3,0806	-3,4	3,2	4,9	2000

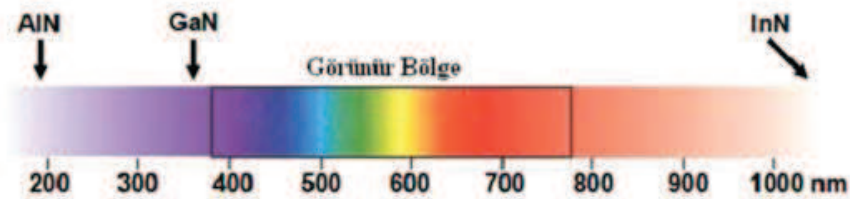
1990’lı yılların başından itibaren bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler büyük ölçüde yarıiletken malzemeler ve bu malzemeler ile uygulama bulmuş yarıiletken aygıtların geliştirilmesi ile paralellik göstermiştir. Günümüze kadar geçen süreçte GaN, Si’den sonra muhtemelen en önemli yarıiletkenlerden biridir. Bu süreçte aynı zamanda GaN ve GaN ile ilişkili geniş bant aralıklı malzemelerinde araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde hızlı bir artış olmuştur. Geleneksel Si ve kullanılagelen III-V grubu yarıiletkenleri ile karşılaştırıldığında III grubu nitrat bileşikleri özgün optik ve elektronik özellikler sunmaktadır. En popüler GaN tabanlı aygıtlar ultraviyole-mavi arası lazer diyotları (LD) ve Ultraviyole-yeşil arası ışık yayan diyotlardır (LED).

HEMT ve güneş körü ultraviyole sensörlerde ticarileşmek için sırada bekleyen diğer aygıtlardır (Öztürk, 2011).

Tablo 2.4. Nitrat tabanlı üst tabakada kullanılan altaşların avantaj ve dezavantajları (Taşlı,2010).

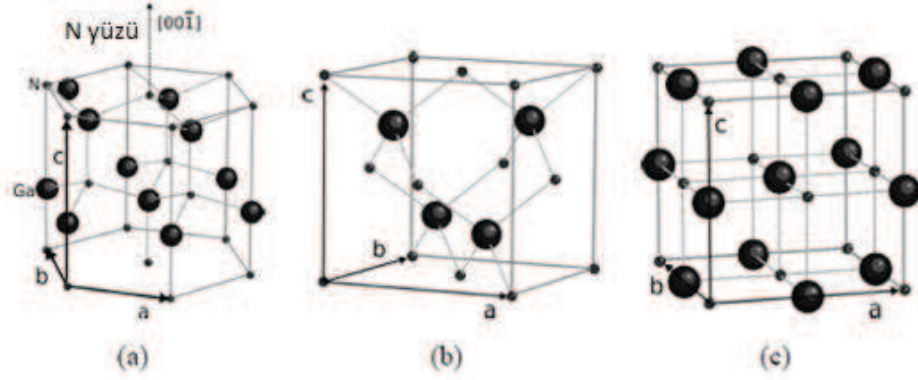
Altaş	Avantajları	Dezavantajları
Si	-Düşük maliyet -Yaygın olarak bulunur -Si elektroniklerle entegrasyon	-GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu -GaN ile yüksek termal uyumsuzluk -Zayıf termal iletkenlik
SiC	-Yüksek termal iletkenlik -GaN ile düşük örgü uyumsuzluğu	-Yüksek maliyet -Yüksek kusur yoğunluğu (mikroborular ve vida türü bozukluk)
Al ₂ O ₃ (safir)	-Çok düşük maliyet -Yaygın biçimde bulunuyor -Yüksek sıcaklıklarda kararlılık -Kolay temizleme	-Çok zayıf termal iletkenlik -GaN ile yüksek örgü uyumsuzluğu

Nitrat tabanlı bu bileşiklerdeki wurtzite kristal modifikasyonu genişbant aralıklarını kapsar. AlN için 6.2 eV, GaN için 3.4 eV olan bu değer InN'da 0.7-1.0 eV'a kadar düşer. Genişbant aralıklarından dolayı GaN gibi bu tip yarıiletken malzemeler güçlü bağ yapılarından dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılırlar (Öztürk, 2011). Şekil 2.11.'de nitrat yarıiletkenlerin dalga boyu spektrum dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.11. III Grubu nitratların dalgaboyu spektrumu (Dikme, 2006).

GaN temelli kristaller üç farklı kristal örgüsünde bulunabilir. Bunlar wurtzite, rock-salt ve Zinc blende biçimli kristal örgülerdir. Şekil 2.12.'de GaN temelli kristallere ait kristal örgüler gösterilmektedir.



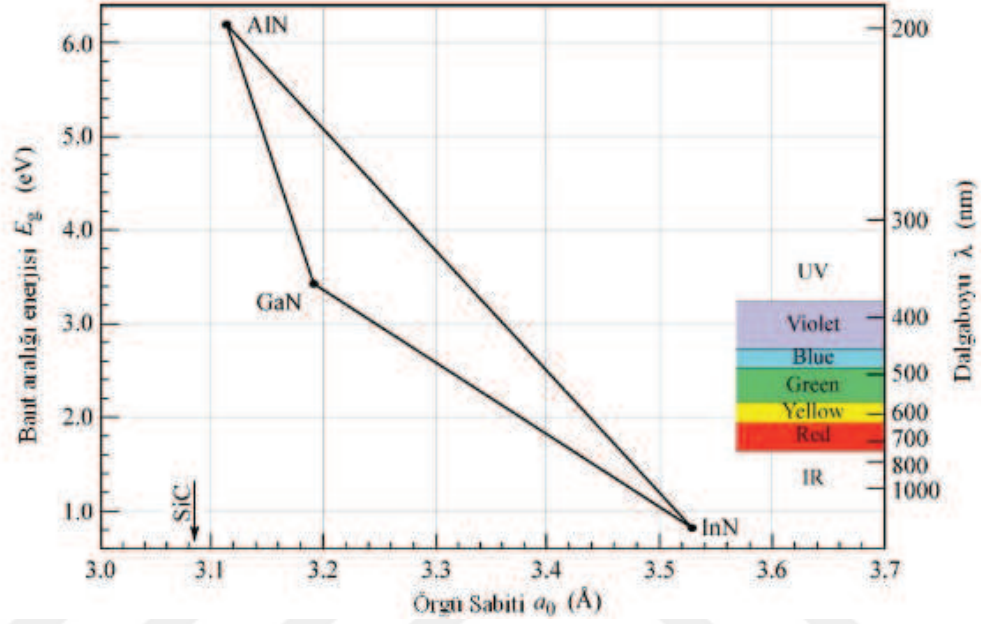
Şekil 2.12. (a) Wurtzite, (b) Zinc-blende, (c) Rock-salt biçimli kristal örgüler (Grzegorzcyk, 2006).

GaN ve diğer bir III-V bileşiği olan AlN'in karşılaştırmalı olarak verilen fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 2.5.'de verilmiştir. GaN çok sert, mekanik dayanımı yüksek ve geniş bir ışık kapasitesine sahiptir. Saf halde iken kolay kırılabilir değildir. Safir ve SiC gibi alttaşlar üzerine ince film olarak depozit edilebilir. Si ile katkılandırılarak n-tipi katkılı GaN elde etmek mümkündür ayrıca magnezyum ile de katkılanarak p-tipi katkılı bir GaN da elde edilebilir. Bununla birlikte GaN'a silisyum veya magnezyum ile katkılama yapmak farklı GaN elde etme yöntemleri gerektirebilir. Katkılama örgü yapısında kusurlara neden olabileceğinden oluşabilecek gerilme zorlanımları GaN'ı kırılabilir hale getirebilir (Öztürk, 2011).

Tablo 2.5. GaN ve AlN için bazı fiziksel özellikler (Ambacher, 1998; Manasreh, 2003).

Fiziksel Özellik	GaN	AlN
Kristal Yapısı	Wurtzite	Wurtzite
Enerji bant aralığı	3.39 eV	6.2 eV
Örgü sabiti a_0 (c_0) (300K)	3.189 (5.185) 10^{-10} m	3.112(4.982) 10^{-10} m
Erime noktası	2791 K	3487 K
Dekompozisyon sıcaklığı	800 °C (Ar + 5% H ₂ , 1000 hPa)	1250 °C Vakumda
Isıl genişleme katsayısı (α_a)	$5.59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$4.15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Isıl iletkenlik (300K)*	4.1 (1.3) $\text{Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	5.9 (3.19) $\text{Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Statik dielektrik sabiti	8.9	8.5

GaN'ın örgü sabiti ve ısıl iletkenliği gibi özellikleri safir, SiC ve Si gibi farklı altaşlar kullanılarak ince film halinde büyütülmesine olanak verir. Şekil 2.13.'de bazı nitrat bileşiklerin örgü sabiti ile bant aralığı enerjisinin değişimi gösterilmektedir. GaN'ın yukarıda belirtilen altaşlar ile örgü uyumu %100 değildir.



Şekil 2.13. Yasak bant aralığı enerjisinin örgü sabiti ile değişimi (Öztürk, 2011).

III-V grubu geniş bant aralıklı nitratlar, periyodik tablonun V. grubuna ait N elementinin bileşikleri olan, AIN, GaN, InN ve bunların alaşımlarını içerir. III-nitrür materyal sistemleri arasında kuvvetli kimyasal bağların olmasının nedeni, III-V grubu elementlerin elektro negatifliklerinin birbirlerinden oldukça değişik olmasıdır. III-V grubu nitrürler, yüksek bant aralığı enerjisine, yüksek ısıl iletkenliğe, yüksek erime sıcaklığına, yüksek kırılma gerilimine ve düşük dielektrik sabitine sahiptirler. Tüm bu özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklık ve güçlerde çalışabilen yüksekfrekans transistörlerinde, LED'lerde ve mavi/UV lazer diyotlarda kullanılabilir (Jin ve ark., 2004; Gonchorek ve ark., 2006).

Yüksek bant aralığı enerjisi, yüksek kırılma gerilimine, yüksek erime sıcaklığı, yüksek ısıl iletkenlik ve düşük dielektrik sabitine sahip olmaları sebebiyle, III-V grubu nitrürler yüksek güç ve sıcaklıklar da çalışabilen yüksek frekans transistörler, ışık

yayan diyotlarda (LED) ve mavi/UV aralığında çalışabilen lazer diyotlarda kullanılabilir (Jin ve ark., 2004; Gonchorek ve ark., 2006).

Kısa dalga boylarında faaliyet gösteren optoelektronik cihazların fabrikasyonu için Si ve GaAs gibi klasik yarıiletkenlerin kullanılması uygun olmamaktadır. Bu yarıiletkenleri içeren cihazlar yüksek sıcaklıkların ve zorlu şartların üstesinden gelemezler. III-Nitrür yarıiletkenlerde durum farklıdır; AlN ve GaN yarıiletken materyaller çeşitli mikroelektronik ve optoelektronik cihazlarda başarı ile uygulandığı için III-Nitrür yarıiletken materyaller birçok araştırmaya konu olmuşlardır (Ambacher, 1998; Jain ve ark., 2000). Bu nedenle, III-Nitrür malzemeler yüksek teknoloji elektronik ve optiksel cihazlarda kullanımına ek olarak bileşik yarıiletkenler teknolojisi ve bilim dünyası için de oldukça önemli bir duruma gelmişlerdir (Nakamura ve Fasol, 1997; Ambacher, 1998; Pankove ve Moustakas, 1998; Jain ve ark., 2000).

Teknolojide GaN tabanlı malzemelere geçilmesinin uzun zaman almasının bazı nedenleri vardır. Bu nedenler baştan sona sıralandığında karşımıza üç ana sorun ortaya çıkmaktadır. GaN'ın tek kristal halinde büyütülmesi, p-tipi GaN filmlerin üretilmesinin oldukça güç olması ve büyütülen GaN tabakaların çoğunlukla n-tipi iletkenlik göstermesidir. Ayrıca GaN'ın büyütüleceği uygun alttaş malzemenin bulunması güçtür. GaN'ın ilk sentezlemesi ile amorf yapı oluşturulmuştur ve malzeme Ga üzerinden sıcak amonyak geçirilmesi ile meydana gelmiştir (Johnson ve ark., 1932). GaN'ın tek kristal olarak büyütülmesinin zorluğu ise yüksek erime sıcaklığına ve yüksek denge buhar basıncına sahip olmasıdır (Amano ve ark., 1986; Porowski ve Grzegory, 1997). Kaliteli GaN kristalinin büyütülebilmesi için yüksek azot basıncı ve yüksek büyütme sıcaklığı aynı anda gerekmektedir. Bununla birlikte GaN alttaşları temin etmek güç olduğu için GaN'ın diğer alttaşlar üzerine büyütülmesi ile ilgili gerekli inceleme ve araştırmalar yapılmıştır (Manasevit ve Simpson, 1969; Manasevit ve ark., 1971) ve araştırmalar sonucunda mekaniksel ve kimyasal dayanıklılığa sahip hem de maliyeti düşük olan Al₂O₃'ün alttaş olarak kullanılabileceği belirlenmiştir (Tablo 2.6.).

Tablo 2.6. Al₂O₃'e ait temel parametreler (Thielsch ve ark., 2002; Ching ve Xu, 2005).

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

Tüm bunlara ek olarak, oluşan bazı olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla, GaN ve Al₂O₃ alttaş arasına AlN tampon tabaka düşük sıcaklıklarda büyütülmektedir. AlN tampon tabaka oluşturulmasındaki amaçlardan biri GaN ve Al₂O₃ arasındaki örgü uyumsuzluğunu ve ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkı gidermek, diğeri ise ZnO ve GaN arasındaki olası GaO_x oksit tabakalarının oluşumunu engellemektir. Ayrıca AlN tampon tabaka uygulamasının GaN'ın yüzey yapısını düzenlemeye katkı sağladığı belirlenmiştir (Nakamura ve Fasol, 1997).

AlN/GaN heteroyapılar taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerleri bakımından birçok avantajı içermektedir. Bu heteroyapılarda güçlü polarizasyon yüksek taşıyıcı yoğunluğu değerlerine ve alaşım saçılmasının yokluğu yüksek mobilite değerlerine erişmesini sağlar. Yapılan simülasyon deneylerinde AlN/GaN heteroyapıların 10nm'den kalın bariyerler için 5×10¹³cm⁻²'lik taşıyıcı doyum değerine ulaştığı belirlenmiştir (Shen, 2004). Aslında, simülasyon dışındaki deneylerde yüksek taşıyıcı yoğunluğuna erişmek oldukça zordur ve bu zorluğun temel nedeni AlN büyütülmesindeki problemlerdir. Ek olarak, AlN tabakada oldukça güçlü çekme gerilmesi meydana geldiğinden, 5 nm'den fazla olan kalınlıklarda, AlN filmlerinde çatlak oluşum olasılıkları daha büyüktür ve dolayısıyla oluşan çatlaklar mobilitadaki

azalmanın da önemli nedenlerindendir (Shen, 2004). Literatürdeki araştırmalar, oda sıcaklıkları ve düşük sıcaklıklarda AlN bariyerin mobiliteyi geliştirdiğini belirlemiştir (Smorchkova ve ark., 2001; Shen, 2004). AlN/GaN heteroyapılar için yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve yüksek mobilite değerlerinin bu yapılar için önemli avantajlar oluşturmalarına rağmen, 5 nm'den fazla olan kalınlıklarda çatlak oluşum olasılıklarının fazla olması sebebiyle heteroyapılarda zorunlu olarak ince AlN tabakalar büyütülmesi bu yapılar için dezavantajdır.

Son zamanlarda optoelektronik cihazların çoğu ince film teknolojisi kullanılarak üretilmektedir ve böylelikle hem malzeme sarfiyatı engellenerek maliyeti düşmektedir hem de daha ergonomik, taşınabilir cihazlar üretilebilmektedir. Çok kristalli ince film heteroeklemlerle yapılan araştırmaların yoğun olmasının önemli nedenleri kolay ve ucuz olmalarıdır. İnce filmler birbirlerinden farklı birçok teknik ile birçok alt tabaka üzerinde büyütülmüşlerdir. İnce film büyütmede kullanılan tekniklerden bazılarısputterma (sputtering), lazer biriktirme (PLD), püskürtme (spray pyrolysis), buharlaştırma (evaporation) ve sol-jel (sol-gel) teknikleridir. Büyütülme sırasında oluşan bazı olumsuzluklar (boşluk, tane sınırı, safsızlık v.b.) nedeniyle ince film heteroeklemlerin fiziği oldukça karmaşıktır.

Heteroeklemi oluşturan yarıiletkenlerin termal yayılım katsayısındaki farklar ve örgü uyumsuzluğu heteroeklemde tuzaklar veya yeniden birleşme merkezleri gibi ara yüzey olaylarını meydana getirir. Ara yüzey olaylarının tane sınırlarına ve büyüklüğüne bağlı olarak heteroeklemde taşıyıcı iletimine karşı direnç oluşabilmektedir. Ara yüzeyde yeniden birleşme işlemi, film direncive tanecik sınırları ince film heteroeklemlerin performansını etkilemektedir.

Heteroeklemlerde meydana gelen iletim halen tam aydınlatılamamıştır. Bu anlaşılama durumu çok kristalli heteroeklem ince filmlerin elektriksel özelliklerinin oldukça karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır. Bu karmaşıklık nedenleri ise, çok kristalli heteroeklem ince filmlerinin enerji süreksizlikleri, arayüzey durumları ve tane sınırlarının bulunmasıdır (Kuş, 2010).

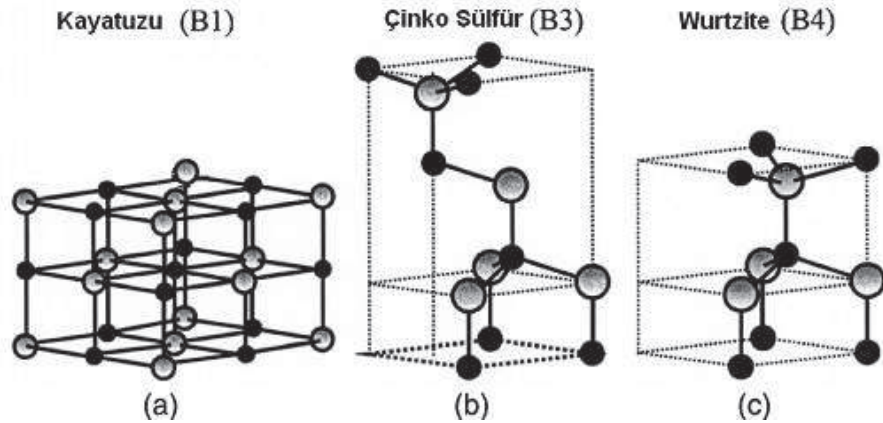
2.9. Çinko Oksit

2.9.1. Kristal yapısı

Çinko minerali, 1810 yılında Bruce İn Franklin tarafından keşfedilmiştir (New Jersey, USA). New Jersey'deki Zn madeni USA için önemli bir Zn kaynağıdır. Çinko içinde bulunan manganez safsızlıklarla çoğunlukla kırmızı veya turuncudur. Çinko oksit kristalleri birçok tip yüzey yönelimi sergiler. En önemli yüzey yönelimleri (0001) ve (000 $\bar{1}$) temel düzlem, (10 $\bar{1}$ 0) ve (11 $\bar{2}$ 0) prizma düzlemleri, (11 $\bar{2}$ 1) piramit düzlemleri kristal yüzeyleridir.

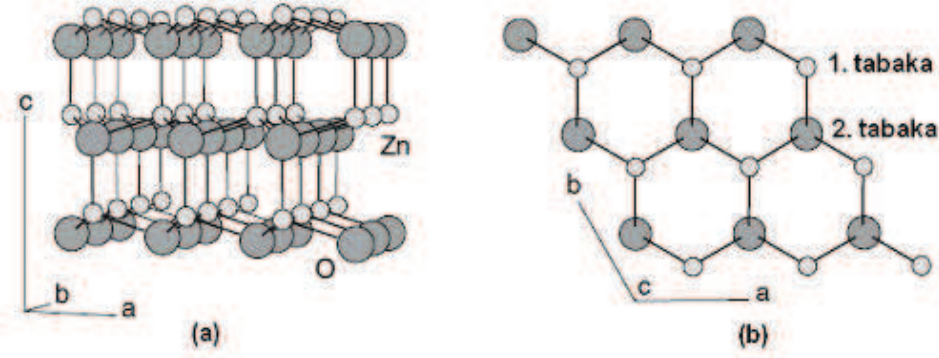
ZnO, II-VI grubu ikili bileşik yarıiletken kristaldir. ZnO'nun Şekil 2.14.'de gösterilen yapıları, ya kübik çinko sülfür ya da her anyonun bir tetrahedron'un köşesinde dört kation ile çevrilen hegzagonal vurtzittir. Tetrahedral koordinasyon tipik kovalent bağlı sp^3 'tür, fakat bu materyaller aynı zamanda önemli bir iyonik karaktere de sahiptir. ZnO iyonik karakteri, kovalent ve iyonik yarıiletkenler arasında bulunan bir II-VI grubu bileşik yarıiletkenidir. Çevre şartlarındaki termodinamik fazı vurtzittir. Çinko sülfür ve ZnO yapı sadece kübik alt tabanlar üstüne büyütülmeye olur. Yüksek basınçta ise kaya tuzu özelliklerini gösterir.

X-ray kırınımının keşfinden sonra 1914 yılında, Bragg X-ray kırınımı ile ZnO'nun vurtzit kristal yapısı açıklanarak 1920 yılında yayımlandı (Ellmer ve Klein, 2008).



Şekil 2.14. ZnO'nun kristal yapıları. (a) Kayatuzu (B1), (b) Çinko Sülfür (B3), (c) Vurtzite (B4). Gri ve siyah küreler sırasıyla Zn ve O atomlarını gösterir (Ellmer ve Klein, 2008).

Şekil 2.15’de görülen iki molekül içeren ZnO’nun hegzagonal birim hücreleri $a= 0.325$ nm ve $c= 0.52066$ nm’dir. Çinko atomları oksijen atomları tarafından çevrelenmiş yaklaşık tetrahedral şeklindedir. c eksenine boyunca Zn-O mesafesi ($d_{Zn-O}[1]=0.190$ nm) diğer üç komşu oksijen atomundan ($d_{Zn-O}[2]=0.198$ nm) biraz küçüktür.



Şekil 2.15. Çinko oksit kristal yapısının iki farklı görünümü. (a) c eksenine dik perspektif görünümü. üst düzlem (0001) düzlemiyle çinko ile sonlanmış, alt düzlem ise (000) oksijen ile sonlanmış. (b) Çinko üzerinde c eksenine boyundaki görünüm (0001) düzlemi ile sonlandı (Ellmer ve Klein, 2008).

Hegzagonal vurtzit fazının yanında kayatuzu yapısı ile kararsız kübik faz ayrıca bilinir. 300°K de 9.8 GPa basınçta ZnO’in kübik faza geçişi kayatuzu (NaCl) yapı oluşumunu sergiler. Sıcaklığa bağlı olarak, hidrostatik basınç arttığı zaman bu faz geçişi 2-6 GPa basınç aralığında tersinirdir. Bunun anlamı yüksek basınç fazı, normal basınçta kararlı değildir (Decremps ve ark., 2000).

2.9.2. Örgü parametreleri

Herhangi bir kristal metalin örgü parametreleri yaygın olarak ve de en iyi kesinlikle Bond metodu kullanılarak, Yüksek çözünürlüklü X-Ray Kırınımı ile simetrik ve asimetrik yansımalarla ölçülür (Şenadım, 2007). Bir yarıiletkenin örgü parametreleri genellikle aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

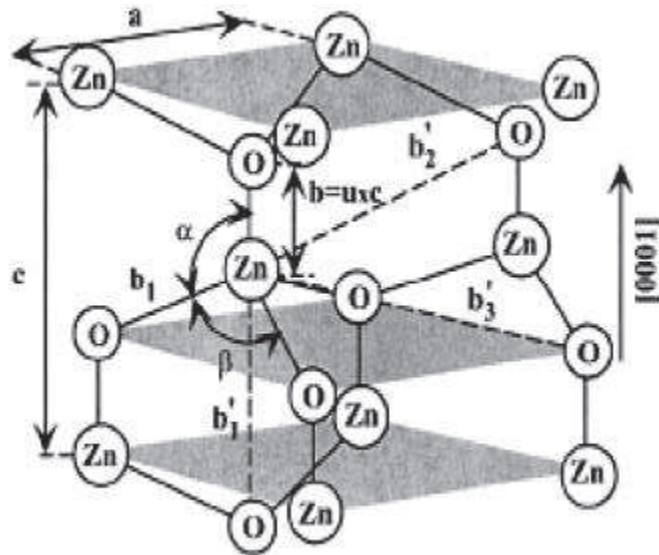
1. Serbest elektronlar tarafından kuşatılan minimum bir iletkenlik bandının deformasyon potansiyel yoluyla ortaya çıkan serbest elektron konsantrasyonu,
2. Yabancı atom ve kusurların konsantrasyonu,
3. Dış gerilmeler (örneğin alt taban tarafından indüklenme),
4. Sıcaklık (Bond, 1960).

Hegzagonal birim hücrenin örgü parametreleri farklı metodlarla belirlenebilir (Sundaram ve Khan, 1997). Oda sıcaklığında a değeri 3.32475 nm ile -0.32501 nm arasında değer alırken, c parametresi ise 0.52042nm ile -0.52075 nm aralığında değer alır. Genellikle kullanılan sabit değerler $a=0.32495$ nm and $c=0.52069$ nm'dir. Yoğunluk ise 5.605 g/cm³'dir.

İdeal vurtzit yapı iki örgü parametresi (a ve c) ile hegzagonal yapıdır ve bunların oranı $c/a \approx 1.633$. Gerçek bir ZnO kristali vurtzit yapısı değişen c/a oranı ile ideal düzenden sapar (Sundaram ve Khan, 1997). İdeal vurtzit kristal yapıdan sapma örgü kararlılığı ve iyonikliğine bağlıdır. Nokta kusurlar ve genişleyen kusurlar örgü sabitinin değerini arttırlar.

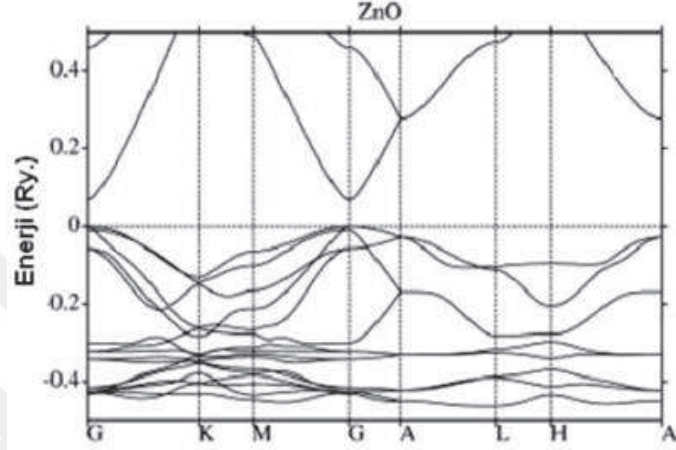
2.9.3. Elektronik bant yapısı

ZnO vurtzit kristal yapısındadır. Vurtzit yapı a ve c olan iki örgü parametreleri ile hegzagonal birim hücreye sahiptir. Şekil 2.16.'da gösterildiği gibi ABAB hegzagonal sıkı paket yapısıdır. ZnO'nun bant yapı diyagramı Şekil 2.17.'de verilmiştir. Bant yapısı hegzagonal brillon bölgesi içinde oldukça yüksek simetri düzlemleri boyunca gösterilmiştir.



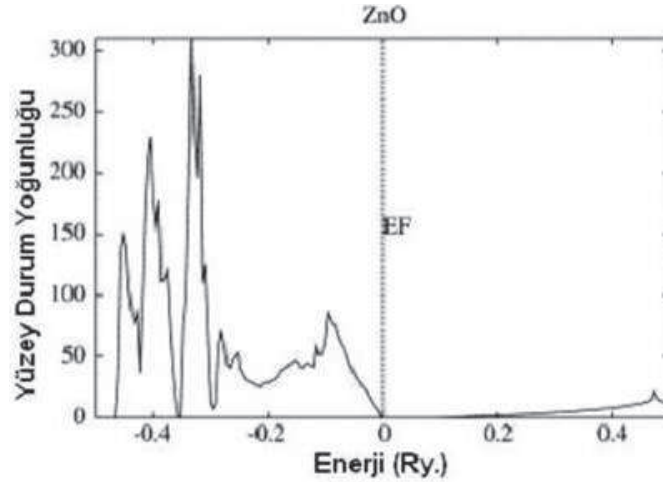
Şekil 2.16. Vurtzit yapı (Şenadım, 2007).

Geçirgenlik bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu Γ noktasında oluşur. $k=0$ noktası ZnO'nun direk bant aralıklı yarıiletken olduğunu gösterir. Şekil 2.17.'de ZnO'nun elektronik yapısının vurtzit olduğu görüldü. Hesaplamalardan ZnO'nun bant yapı değerinin (0.067 Ryd) 0.91 eV [$0 K'$ de] olduğu belirlendi ve sonuçlar literatürle uyum içindedir. ZnO'nun diğer değerlerle uyum içinde olan denge örgü parametre değerleri $a=0.3227$ nm ve $c=0.5189$ nm'dir.



Şekil 2.17. ZnO'nun bant yapısı (Thangavel ve ark., 2006).

Elektronların çoğu valans bandı kenarına yerleşir. Sonuçlar, valans ve iletkenlik bandının büyük bir kısmının Zn için sp^3d^5 ve O için p^3 olarak oluşturulur. Genel elektronik yapıya atomik orbital katkıları yüzey durum yoğunluğunun analizi ile anlaşılabilir. Bu durum Şekil 2.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. ZnO vurtzit yapısının durum yoğunluğu (Thangavel ve ark., 2006).

Yüzey durum yoğunluğunun üst bölmeleri çinkonun s, p ve d orbitallerinden gelirken, alt bölmeler oksijenin s ve p orbitallerinden gelir. Fakat, bu durumlar Zn'nin p ve durumlarının önemli karışımına sahiptir.

2.9.4. ZnO katkılama

ZnO farklı kısa dalgaboylu optoelektronik aygıt uygulamaları için güçlü bir potansiyele sahiptir. ZnO'daki bu potansiyeli açığa çıkarabilmek için yüksek kaliteli p- ve n- tipi katkılama kaçınılmazdır. Fakat çift kutuplu taşıyıcı katkılama (hem p- hem n-) diğer geniş bant aralıklı yarıiletkenler gibi GaN ve II-IV bileşik yarıiletkenler ZnS ve ZnSe, ZnTe büyük bir engeldir. Tek kutup katkılama geniş bant aralıklı yarıiletkenler için şaşırtıcı bir konu değildir. ZnO, GaN ve ZnS kolaylıkla n- tipi katkılanırken, p- tipi katkılamak zordur. ZnTe için durum tam tersidir; p- tipi katkılama kolay elde edilirken, n- tipi katkılama zor elde edilir.

n- tipi katkılama; vurtzit yapı olan ZnO doğal olarak n- tipi yarıiletkenidir. O boşlukları (V_O) ve Zn ara atomları (Zn_i) gibi kusurların varlığı nedeniyle stokiyoimetriden sapar. Katkısız ZnO 10^{21} cm^{-3} çok yüksek elektron yoğunluğu ile n- tipi yarıiletkenidir. İstenmeden katkılanan ZnO'nun n- tipi yarıiletken olduğu deneysel olarak bilinmesine rağmen, vericilerin Zn_i ve V_O olup olmadığı hala tartışılmaktadır.

Doğal kusurların hiçbiri yüksek konsantrasyon sığ donör karakteristiği sergilemez. Fakat Zn_i V_O 'dan ziyade 3430-50 meV iyonizasyon enerjisi ile ZnO içinde baskın doğal vericidir. İstenmeden katkılanan ZnO filmlerinin n- tipi iletkenliği sadece hidrojen nedeniyle, 30 meV iyonizasyon enerjisi ile sığ donör olarak davranır (Kohan ve ark., 2000; Cox ve ark., 2001; Van de Walle, 2001; Strzhemechny ve ark., 2004). Bu varsayım geçerlidir çünkü hidrojen bütün büyütme metodlarında vardır ve yüksek mobilitesi nedeniyle geniş miktarda ZnO içine nüfuz eder. Hidrojen bileşiği iletkenlik kaynağı olarak etki eder ve ZnO içinde sığ verici olarak davranır.

n- tipi katkılanan ZnO ile p- tipi katkılama kolay karşılaştırılır. Grup III elementleri Al, Ga, In elementleri Zn atomu ile yerdeğiştiren elementlerdir ve Grup VII

elementleri Cl ve I elementleri O atomu ile yerdeğiştiren elementlerdir, n- tipi katkılamada kullanabilirler (Kato ve ark., 2002). Al, Ga ve In ile katkılamaya birçok grup teşebbüs etti, yüksek kaliteli, yüksek iletken n- tipi ZnO filmlerle sonuçlandı (Minami ve ark., 1984; Ataev ve ark., 1995; Myong ve ark., 1997; Ko ve ark., 2000; Assuncao ve ark., 2003; Liu ve ark., 2003). MOCVD tekniği ile büyütölen Al katkılı ZnO filmler, $6.2 \cdot 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ dirence sahip oldukça yüksek iletken filmler elde edildi (Myong ve ark., 1997). CVP ile büyütölen Ga katkılı ZnO daha küçük direnç $1.2 \cdot 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ elde edildi (Ataev ve ark., 1995) Böylece n- tipi ZnO çok iyi geliştirildi. Filmler başarılı bir şekilde farklı uygulamalarda kullanıldı.

p- tipi katkılama; geniş bant aralıklı yarıiletkenlerde örneğin GaN ve ZnSe gibi p -tipi katkılama çok zordur. Zorluklar çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Katkılar düşük enerjili doğal kusurlar örneğin Z_{ni} ve V_O veya arkaplan safsızlıkları (H) ile telafi edilebilir (Walukiewicz, 1994). Ana materyal içinde katkının düşük çözünürlüğü bir diğer olasılıktır (Van de Walle ve ark., 1993). Derin safsızlık seviyesi katkılama probleminin kaynağı olabilir, sığ alıcı seviye oluşumuna karşı önemli bir dirence sebep olur.

ZnO içindeki bilinen alıcılar Grup I elementleri örneğin; Li, Na, K, Cu, Ag ve Zn boşlukları ve grup V elementleri örneğin; N, P ve As elementlerini içerir (Schirmer, 1968; Valentini ve ark., 1991; Kanai, 1991a; Kanai, 1991b). Fakat bunların çoğu derin alıcılar oluştururlar ve p- tipi iletkenliğe önemli bir katkısı yoktur. En iyi p- tipi katkılamayı sığ seviye alıcısını başarmak zor olmasına rağmen grup V elementleri oluşturur (Park ve ark., 2002).

Bir dizi teorik çalışma geniş bant aralıklı yarıiletkenler içinde katkılamanın temel mikroskopik görüntüsünü ele almıştır. Bu çalışmaların çoğu katkı çözünürlüğünü ve doğal kusurları değerlendirmiştir (Laks ve ark., 1991; Garcia ve Northrup, 1995). Son zamanlarda, ZnO içindeki p- tipi katkılamayı oluşturan farklı safsızlıklar temel prensip psödo potansiyel metod kullanılarak incelenmiştir (Ihm ve ark., 1979; Cohen, 1982; Laks ve ark., 1991; Garcia ve Northrup, 1995; Park ve ark., 2002).

ZnO içinde p- tipi katkılama ya Zn atomuyla yer değiştiren Grup elementleri (Li, Na ve K) veya O atomuyla yer değiştiren grup V elementleri (N, P ve As). Grup I elementleri p- tipi katkılamada Grup V elementlerinden Tablo 2.7.'de görüldüğü gibi alıcı seviyelerin sıklığı nedeniyle daha iyidir (Park ve ark., 2002). Fakat grup I elementleri ara atom durumlarını işgal etme eğilimindedir, kısmen onların küçük atomik yarıçapları azalır, yerine geçme durumlarından ziyade böylece verici olarak etki eder (Ihm ve ark., 1979).

Dahası Na ve K Tablo 2.7.'de bağ uzunluğu ideal Zn-O bağ uzunluğundan (1.93 Å) daha geniştir. Bağ uzunluğu örgü strainine neden olur, boşluk gibi doğal kusurların oluşumu artar. Bunlar p- tipi ZnO elde etmede karşılaşılan zorluklar arasındadır. Benzer durum N hariç grup V elementleri için gözlenmiştir. P ve As ayrıca geniş bağ uzunluğuna sahip ve bu yüzden örgü satraininden kaçınmak için antisite oluşturmak muhtemeldir. Ansiteler, A_{Zn} verici gibidir ve compensating alıcılar için istenmeyen mümkün mekanizmaları sağlar. ZnO'yu p- tipi katkılamak için en iyi aday N 'dir. Çünkü grup V safsızlıkları arasındadır, N en küçük iyonizasyon enerjisine sahiptir. NZn antisite oluşmaz ve N nin AX merkezi kararsızdır (Park ve ark., 2002).

Tablo 2.7. Hesaplanan en yakın komşu bağ uzunlukları, negatif olarak yüklenen yerdeğiştiren safsızlıklar için kusur enerji seviyeleri (E_i), yerdeğiştiren alıcılardan pozitif yüklü AX merkezini oluşturmak için gerekli enerjiler (ΔE) (Park ve ark., 2002).

	Element	Bağ uzunluğu (Å)	E_i (eV)	ΔE
Grup I	Li	2.03	0.09	0.21
	Na	2.10	0.17	1.04
	K	2.42	0.32	1.38
Grup V	N	1.88	0.40	0.13
	P	2.18	0.93	-0.46
	As	2.23	1.15	-0.18

ZnO içinde çok iyi çözülememesine rağmen, ZnO içinde sığ p- tipi katkı için N iyi bir adaydır (Kobayashi ve ark., 1983). n- katkılama iyon eklemeyele başarılabilir. PL ölçümleri kullanılarak N+ eklenen ZnSe içinde sığ N alıcıları oluşturuldu (Wu ve ark., 1982). GaN tabanlı diyot lazerler yerine geçmeden önce reaktif N lazer diyot

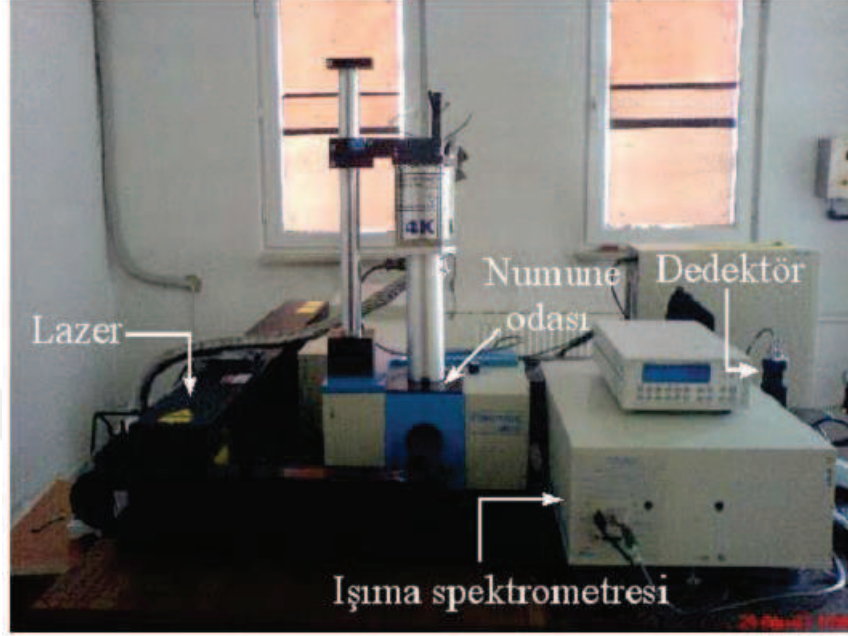
oluşturmaya yol açan p- tipi ZnSe üretildi. N₂ plazma kaynağı kullanılarak ZnSe için alıcı konsantrasyonu elde edilmesine rağmen, saf nitrojen kaynağı kullanılarak p- tipi ZnO başarılı olamadı (Park ve ark., 1990).

2.10. Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans, yarıiletken malzemenin elektronik yapısının ve optik özelliklerini araştırmak için kullanılan ve numuneye zarar vermeyen bir tekniktir. Fotolüminesans kısaca, optik uyarma altında bir materyalden ışığın kendi kendine yayılması olayıdır. Malzeme üzerine ışık gönderildiğinde, ışığın bir kısmı yüzeyden geri yansır ve geri kalan kısmı ise ortama iletilir. Ortama giren ışının bir kısmı ortam içinde soğurulabilir veya saçılır. Kalan kısmı ortamın içinden geçer. Soğurulan ışığın bir kısmı ise ısı olarak açığa çıkar veya farklı bir frekansta foton olarak tekrar yayınlanır. Bu olay fotolüminesanstır. Bu olayın gerçekleşebilmesi için malzeme üzerine gelen fotonların enerjisinin, malzemenin yasak bant aralığına eşit ya da daha yüksek olması gerekir. Fotolüminesans olayında numune uygun bir kaynak ile aydınlatılır. Daha sonra numuneden çıkan ışık (foton), ışım spektrometresi tarafından toplanarak dedektöre aktarılır. Dedektördeki optik sinyal elektrik sinyaline çevrilir. Daha sonra bilgisayar tarafından değerlendirilir. Işık şiddetinin dalgaboyuna ya da foton enerjisine karşı grafiği çizilerek analiz edilir. Fotolüminesans tekniği ile yasak enerji aralığı, malzeme kalitesi, katkı ve safsızlık atomlarını türü bilgisi elde edilebilir. Fotolüminesans tekniği sağladığı pek çok avantaj nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik ile numuneye ve numune yüzeyine zarar verilmez. Ölçüm için hazırlanan numunenin boyutunda ve kalınlığında bir sınırlama olmadığından ölçüm öncesi hazırlık gerektirmez. Ölçümler sıcaklığa karşı duyarlıdır, basınç değişimlerine karşı duyarlı değildir.

Düşük ve yüksek sıcaklıklarda ölçüm yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda ölçüm yapılırsa fonon ve saçılma etkileri daha az olacağından daha iyi bir spektrum elde edilebilir. Yüksek sıcaklıkta ölçüm yapılırsa, numunenin ısınmaya karşı nasıl performans göstereceği anlaşılabilir. Ölçümler çoğunlukla oda sıcaklığında yapılır ve çalışma için yeterlidir (Durukan, 2013). Şekil 2.19.'da numunelerin optik karakterizasyonunda

kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 cihazının resmi görülmektedir. Bilgisayar, dedektör, 325 nm dalgaboylu 50 mW güç çıkışlı He-Cd lazer ve ışına spektrometresi sistemin temel elemanlarıdır (Durukan, 2013).



Şekil 2.19. Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 sistemi (Durukan,2013).

2.11. Akım Voltaj Karakterizasyonu

Optoelektronik veya elektronik bir cihaz üretildiğinde cihazın performansının ilk göstergesi I-V davranışından elde edilir. Temel olarak cihazın bağlantı noktaları arasına sabit akım uygulayarak gerilim ölçülmesi olduğu gibi bağlantı noktaları arasına gerilim uygulayarak bu noktalar arasından geçen akımda ölçülebilir. Ölçüm tek bir akım veya gerilim değerinde yapmak yerine belli bir akım ve gerilim aralıklarında taranması ile cihazın doğrusal olmayan davranışı da görülebilir.

Fotodedektörler gibi optoelektronik aygıtların I-V ölçümlerinde ise farklı ölçüm şekilleri vardır. Bir fotodedektörün üzerine ışık düşürüldüğünde yapılan ölçüm ise aydınlatılmış I-V ölçümüdür ve aygıtın ışığa tepkisinin türetilebilmesi için bu ölçüm belli koşullar altında yapılır. Cihaz üzerine fotocevap verebileceği bir dalgaboyunda ışık kullanılarak cihaz aydınlatılır. Cihaz üzerine düşürülen ışığın optik gücü ölçülür

ve oluşturduğu akım değişimi I-V ölçümünden elde edilir. Fotoakımın optik güce oranı fotodedektörün fotocevabını verir. Fotodedektörün üzerine ışık düşürülmediği durumda yapılan I-V ölçümü karanlık akım ölçümüdür.

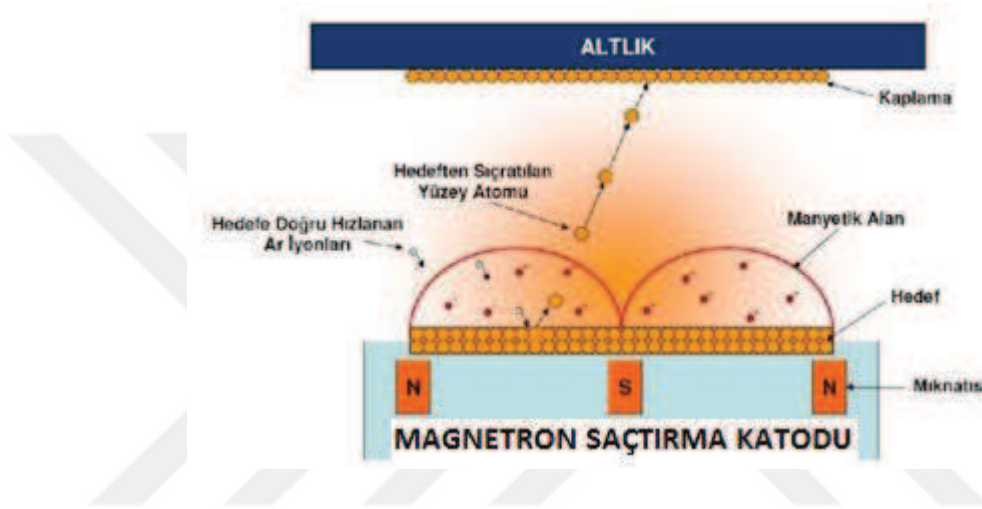
Çip formundaki aygıtların I-V ölçümlerini yapabilmek için sonda istasyonları ve aygıtların mikro boyutlardaki bağlantı noktalarına elektriksel bağlantı yapılabilmesi için mikro sondalar kullanılır. Fotocevap ölçümleri için genellikle fiber ışık sondaları kullanılır ki bu sondalar genellikle 10 – 20 µm çaplı alanlara ışık düşürebilecek kadar küçük bölgeleri aydınlatarak çok küçük boyutlardaki aygıtların ölçümüne imkan sağlar (Çalışkan, 2014).

2.12. Magnetron Saçtırma (Sputtering) Yöntemi

Günümüzde, bir parçanın yüzeyinin aşınmasını ve sürtünmesini kontrol etmek üzere o yüzey üzerine tribolojik kaplama uygulama işlemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda amaç hem aşınmayı hem de sürtünmeyi azaltmaktır. Ancak kavrama elemanları gibi yüksek sürtünme katsayısının istenen bir özellik olduğu örnekler de bulunmaktadır (Sproul, 2009).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) v.b. pek çok yöntem ile tribolojik kaplamaların üretimi yapılmaktadır. Hızlı bir şekilde gelişmiş ve endüstriyel olarak önemli bir PVD kaplama yöntemlerinden olan magnetron saçtırma, büyük bir kısmının biriktirilmesi için bir seçenek haline gelmiştir. Bu gelişmenin arkasındaki itici güç olarak, çeşitli sektörlerde, çok kaliteli, fonksiyonel filmler için artan bir talebin olması görülmektedir. Magnetron saçtırma ile biriktirilen filmler genellikle diğer PVD işlemleri tarafından biriktirilen filmlerden üstün gelmektedirler. Diğer yüzey kaplama teknikleri tarafından üretilen daha kalın filmler ile aynı işlevi görmektedirler. Sonuç olarak, düşük sürtünme katsayılı kaplamalar, aşınmaya dirençli ve sert kaplamalar, dekoratif kaplamalar, korozyona dirençli kaplamalar ve elektriksel özelliği olan ya da özel optik kaplamaları içine alan uygulama alanlarında magnetron saçtırma metodu önemli bir etkiye sahiptir (Rossnagel, 1995).

Temel saçtırma işleminde, bir hedef (ya da katot) plakanın önünde bulunan bir plazma içerisinde oluşturulan enerjik iyonlar, bu plakayı bombardıman etmektedir. Bombardıman işlemi ile hedef atomları sıçratılmaktadır veya kopartılmaktadır. Daha sonra bu atomlar ince bir film olarak kaplanacak yüzey (altlık) üzerinde birikmektedirler (Şekil 2.20.) (Rossnagel, 1995). İyon bombardımanının bir sonucu olarak ayrıca ikincil elektronlar hedef yüzeyinden yayılmaktadır ve bu elektronlar, plazmanın sürdürülmesinde büyük rol oynamaktadır (Kelly ve Arnel, 2000).



Şekil 2.20. Magnetron saçtırma işlemi (Rossnagel, 1995).

Magnetronlarda temel prensip olarak, hedef yüzeyine paralel olarak düzenlenmiş bir manyetik alan tarafından, ikincil elektron hareketi hedef etrafına doğru zorlanmaktadır. Mıknatısların bir kutbu hedefin merkezine yerleştirilmiş, ikinci kutbu ise, bir mıknatıslar halkası oluşturacak şekilde hedefin dış kenarı etrafında dizilmişlerdir. Bu şekilde elektronlar tuzağa düşürülerek, iyonlaşma için elektron-atom çarpışması olayının olasılığı büyük ölçüde artırılmaktadır.

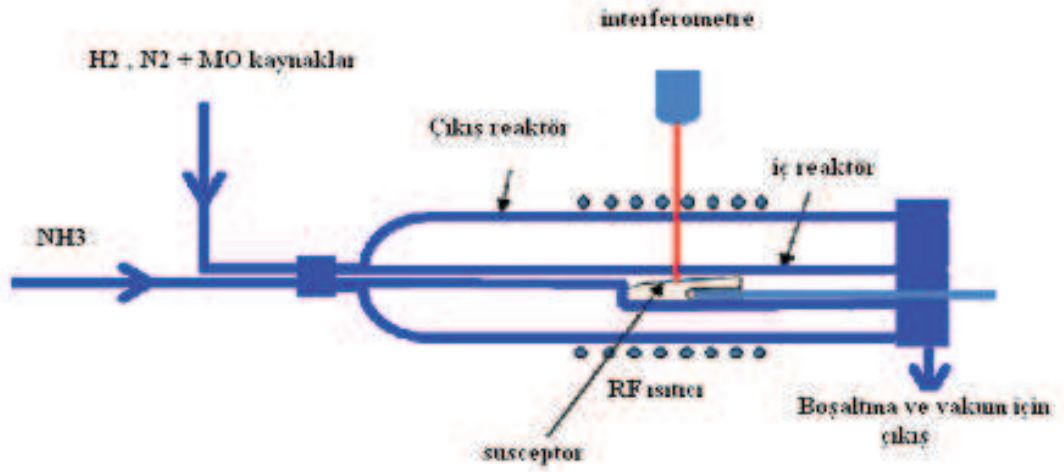
Bir magnetronun iyonlaşma verimliliği arttığında, hedef bölgesinde sonuç olarak yoğun bir plazma oluşmaktadır. Böylece, daha yüksek saçtırma oranları ile hedefiniyon bombardımanı artmakta ve bu yüzden altlık üzerinde daha yüksek biriktirme oranlarının elde edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, magnetron saçtırma ile elde edilen artan iyonlaşma verimliliği, daha düşük çalışma voltajlarında (genellikle, -2000/-3000 V yerine -500 V) ve daha düşük çalışma basınçlarında (genellikle, 10-2

mbar yerine 10-3 mbar) ve deşarjın sürdürülmesine izin vermektedir (Kelly ve Arnell, 2000). Fakat magnetron saçırma işlemi, plazmadaki düşük iyonlaşma verimliliği, düşük biriktirme oranı ile yüksek altlık ısıtma etkileri nedeniyle sınırlanmıştır. Bu tekniğin geliştirilmesi ile yaşanan bu engellerin üstesinden gelinmiştir (Kelly ve Arnell, 2000).

2.13. Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) Yöntemi

Bir yarıiletken cihazın modern teknolojide etkili olarak kullanılabilmesinde gerekli olan ilk aşama cihazda kullanılacak yarıiletkenin en iyi kalitede büyütümüş olmasıdır. Yüksek kalitede yarıiletken büyütme için kullanılan en önemli tekniklerden biri de MOCVD yöntemidir. Bu yöntem buhar fazepitaksi sistemidir ve reaksiyon süreci CVD'den daha değişiktir. MOCVD heteroepitaksi wafer büyütülmesi için geliştirilen bir yöntem iken, CVD daha çok homoepitaksiyel tabaka büyütülmesi için kullanılmaktadır. MOCVD yöntemi ile farklı katkı oranlarında (x) ve materyalin farklı katmanlarına sahip kristal yapılar büyütülerek yüksek kaliteli yarıiletken materyal oluşturulur.

Materyallerin sentezinde kullanılan MOCVD tekniği ilk olarak 1960 yıllarında InP ve InSb biriktirmek için kullanılmıştır (Didchenko ve ark., 1960). O zamandan bu yana MOVPE ve MOCVD gibi teknikler kristal büyütme için kullanılmaktadır. MOCVD yöntemi optoelektronik ve yarıiletken uygulamalarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Burgraaf, 1993). Bu yöntemden önce LPE, MBE ve VPE yöntemleri kullanılmaktaydı. MOCVD ile büyütülen materyaller indiyum, galyum, nitrojen, alüminyum, fosfor ve arsenik'in bazı kombinasyonlarını içerir. Büyütme işlemini yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi ve AsH₃ gibi kaynakların bir kısmının oldukça toksik olması nedeniyle bu yöntemin kullanımı sınırlandırılır. MOCVD yönteminin çeşitli avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. Avantajlarını yüksek kaliteli film, yüksek büyütme oranı, orta maliyette büyütme ve büyük alan büyütme yeteneği oluşturmaktadır. III-N'leri gruplarını büyütmede MOCVD yöntemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.21.'de MOCVD yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Şematik olarak MOCVD sistemi (Taşlı,2010).

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

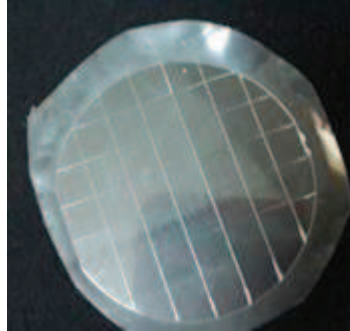
3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında katkısız n-tipi ZnO filmler, AlN alttaş üzerine saçırma sistemi kullanılarak büyütüldü. Filmlerin kristallığı ve kristal yapısı CuK α kaynaklı D8-Advance X-RAY kırınımı ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) ile analiz edildi.

Fotoluminesans ölçümleri oda sıcaklığında 50mW He-Cd lazerli ($\lambda= 325 \text{ nm}$) Jobin Yvon Florang -550 PL sistemi ile yapıldı.

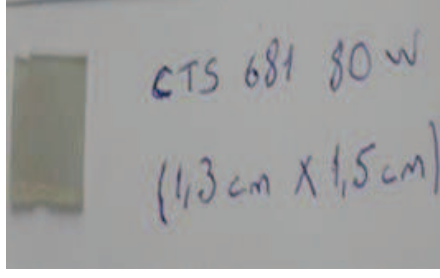
Yüzeyin pürüzlülüğü ve morfolojisi atomik kuvvet mikroskobu (Omicron AFM/STM bileşik sistem) ile analiz edildi.

Şekil 3.1.'de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{ZnO}$ ile üretilen numuneye ait resim görülmektedir.



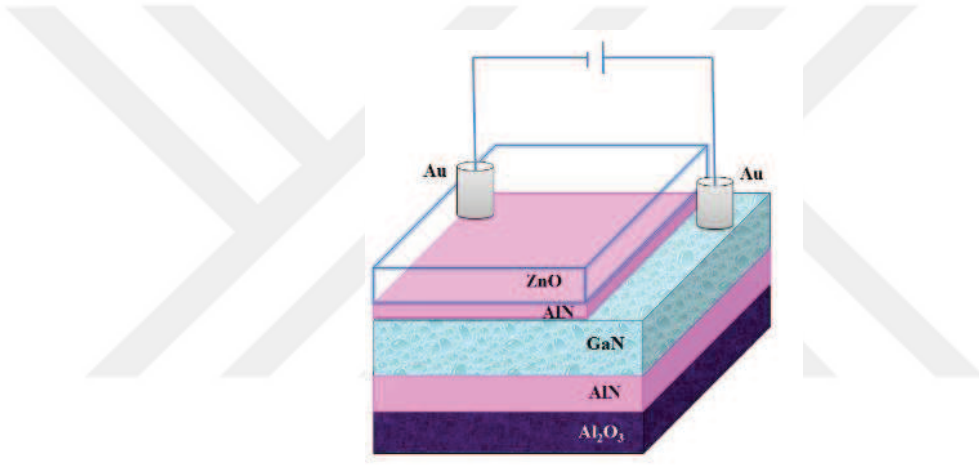
Şekil 3.1. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{AlN}/\text{ZnO}$ ile üretilen numunenin resmi.

Şekil 3.2.'de Safir (Al_2O_3) üstüne GaN ve ZnO büyütülerek üretilen numuneye ait resmi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Al_2O_3 üstüne GaN ve ZnO büyütülerek üretilen numunenin resmi.

Şekil 3.3.'de safir (Al_2O_3) üstüne GaN ve ZnO ile AlN tabakalar yardımıyla büyütülerek üretilen diyotun şematik olarak gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.3. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}/\text{p-GaN}/\text{AlN}/\text{n-ZnO}$ Işık yayan diyotun şematik gösterimi.

3.2. Yöntem

3.2.1. Aşındırma (etching) işlemleri

3.2.1.1. Kuru aşındırma

Kuru aşındırma, bir malzemenin bir maske ile korunan bölgeleri haricinde kalan yerlerdeki maddeyi bir plazmanın iyonlarına maruz bırakarak bulunduğu yerden kaldırıp yok etme işlemidir.

Fiziksel aşındırmada plazmanın içindeki aşındırıcı iyonlar hızlandırılır, aşındırılmak istenen yüzeye çarptırılır ve kinetik enerji aktarımı ile yüzeyden molekül koparılması sağlanır. Bu noktada herhangi bir kimyasal tepkime söz konusu değildir. Demet yöntemine verilebilecek en güzel örnek, odaklanmış iyon litografisidir. Fabry-Perot tipi kaviteli bir fotonik kristal olan bu çalışmada çeşitli avantajlarından ötürü bu yöntem tercih edilmiştir. Alan yönteminde ise iyonların parçacık enerjileri alttaşa aktararak aşındırma sağlanabilmektedir.

Kimyasal aşındırma durumunda, plazma iyonları hızlandırılıp yüzeye çarptırılarak yüzeye fiziksel kuvvet uygulamak için kullanılmaz, sadece gazları iyonlaştırarak daha reaktif hale getirip aktivasyon enerjilerini düşürmek için kullanılır. Reaksiyon sadece kimyasal olduğundan eşyönlüdür. Eşyönlü olduğundan entegre devre üretiminde genelde tercih edilmez.

Kimyasal plazma aşındırma yönteminin en bilinen örneği fotorezistler, polyamidler, ya da diğer organik polimerlerin oksijen plazması kullanılarak ortadan kaldırılmasıdır. Aslen bu ısıveren bir yanma reaksiyonu olduğundan kısaca yakma şeklinde de adlandırılabilir Fiziksel aşındırma, oldukça yönlü bir yöntemdir. Bundan dolayı çalışmamızda üretilen fotonik kristal yapıdaki deliklere ait dik duvarlar gibi ayrıtlar fabrike edilebilir ve yüksek yatay çözünürlük elde edilebilir. Aşındırma terminolojisinde çözünürlük; hedeflenen en küçük kritik ayırıt boyutunu elde edebilmenin bir ölçüsü olarak ifade edilebilmektedir. Seçicilik ise, aşındırılması istenen bölgelerin dışında kalan yerlerde bulunan maskeleyici tabakanınaynı plazma altında birim zamanda aşınma miktarının, gerçekten aşındırılmak istenen bölgelere ait birim zamanda aşınma miktarına oranıdır. Avantajının yanında fiziksel aşındırmanın seçiciliği düşüktür. Böyle olduğu için maskeleme işlemi zorlaşır. Kimyasal aşındırma yüksek seçiciliğe sahiptir ve bu sebeple maske bulmak daha kolaydır fakat kimyasal aşındırma da eşyönlü bir metodudur. Kimyasal aşındırma ile fiziksel aşındırmanın birleşimi bize hem yeterince seçici hem de yeterince yönlü bir aşındırma metodu verir. Fotonik kristalin üretimi için bu yöntem üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Kurt, 2013).

3.2.1.2. Islak aşındırma

Islak aşındırma sıvı bir kimyasal banyonun içinde kimyasal reaksiyon sonucu bir malzemenin yok edilmesidir. Islak aşındırma işlemlerinin çoğu eşyönlü yani izotropiktir. Aşındırma çözeltisindeki konsantrasyon değerleri değiştirilerek ya da sıcaklık gibi değişik parametrelerle oynanarak aşındırma işlemine bir miktar yönlülük (bir yönde başka bir yöne göre daha hızlı aşındırma) kazandırılabilir. Bütün kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi kimyasal ıslak aşındırmada da sıcaklıkla aşındırma hızı değişir. Islak aşındırma eskiden entegre devre üretimindeki baskın aşındırma aracıydı. Fakat zamanla artan çözünürlük yani hat genişliklerinin azalması sonucu ıslak aşındırma eş yönlü olması sebebiyle bu küçük hat genişliklerini sağlayamadığı için kullanılmamaya başladı. Bu sebepten, çalışmasını yaptığımız fotonik kristallerin delik ayrıtlarının nispeten küçük olması ve eş yönlülüğün istenmemesi nedeniyle, bu fotonik kristalin üretiminde de ıslak aşındırma yöntemi tercih edilmemiştir (Kurt, 2013).

3.2.2. Nitrat tabakalarının büyütülmesi

MOCVD yönteminde GaN büyütme prosesi adımları aşağıda sıralanmıştır (Öztürk, 2011):

- 1- Alttaş ve reaktör film büyütme öncesinde hidrojen gazı ortamında 1100 °C'nin üzerine ısıtılarak temizlenir.
- 2- Belirlenen sıcaklık, basınç ve kaynak akış oranlarında TMGa ve NH taşıyıcı gazlar vasıtası ile getirilerek ortama verilir.
- 3- Kaynaklar alttaşa ulaşmadan hemen önce karışırlar ve depozisyon alanına gelirler.
- 4- Depozisyon alanında Metal-Organik (MO) kaynak yüksek sıcaklık nedeniyle bozunur. Diğer gaz fazı reaksiyonları sonucunda oluşan ilk GoN molekülleri alttaş üzerine yapışmaya başlarlar.
- 5- Bu ilk moleküller alttaş yüzey atomları ve örgüsü ile bağlar oluştururlar.
- 6- Devam eden reaksiyon sürecinde oluşan GoN molekülleri alttaş yüzeyi ile bağ yapan bu ilk moleküllere tutunmaya başlarlar ve devamında küçük GoN adacıkları oluşur.

- 7- Bu adacıklar 2 boyutta büyümeye devam ederek ilk tek örgü tabakalarını oluştururlar.
- 8- Oluşan ilk örgülerden sonra 3 boyutta büyüme modu ortama verilen kaynak molekülü miktarı ve sıcaklık artırılarak sürdürülür.
- 9- MOVPE sistemlerinde büyütme anında yapılan reflektans ölçümleri ile elde edilen Fabry-Perot silasyonları yardımıyla kalınlık kontrol edilebilir.

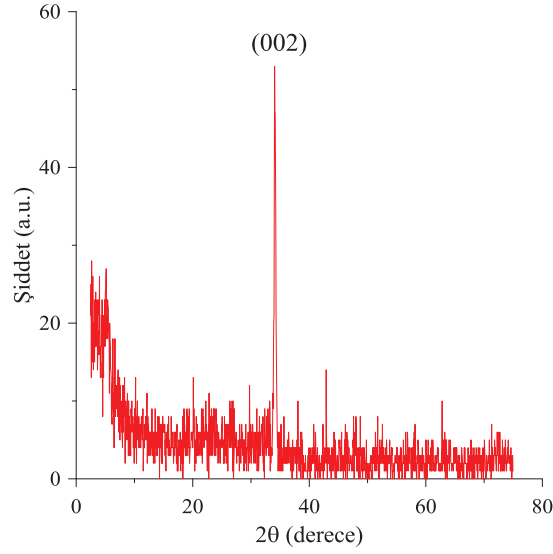
3.2.3. ZNO üretimi

ZnO ince filmi AlN alttaş üzerindeki magnetron saçırma tekniği ile büyütüldü. Büyütme işleminden önce, alttaş üzerindeki kir ve tozu arındırmak için alkol ile kimyasal temizliği yapıldı. Daha sonra azot ile kurutuldu. Biriktirme işleminden önce ortam 4.6×10^{-6} Torr basınçta vakumlandı. Biriktirme işlemi boyunca basınç 8 mtorr civarında tutulurken, kalınlık kalınlık-ölçer ile 200 nm kalınlığında kontrol edildi. RF magnetron saçırma tekniği ile üretilen ZnO ince filmi 500 °C büyütme sıcaklığında biriktirildi. Saçırma gücü 80 W'da sabitlendi. 1 saat boyunca geleneksel tavlama tekniği ile hava ortamında tavlandı.

3.2.4. Optik özellikler

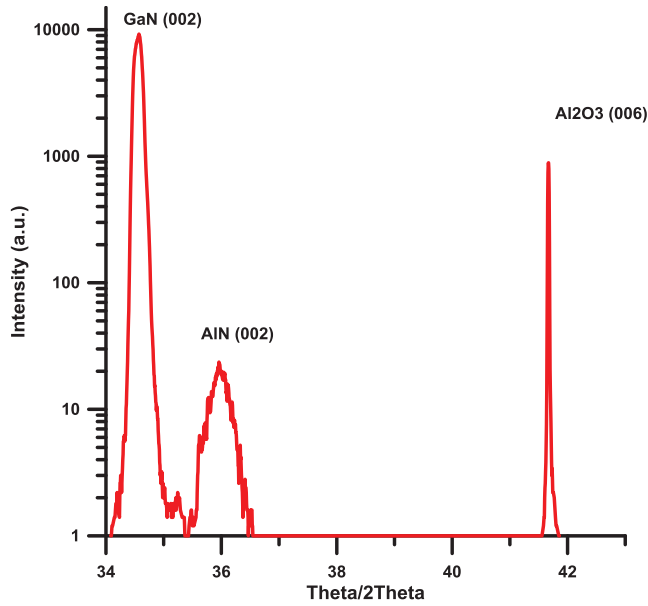
3.2.4.1. Yapısal karakterizasyon

Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'de 80 W'da büyütülen ZnO ince filminin ve Al₂O₃ üzerine büyütülen AlN, GaN tabakalarının XRD kırınım deseni gösterilmektedir. ZnO'nun 34.3° (002) düzleminde hegzagonal yapı sergilediği görülmüştür.



Şekil 3.4. ZnO ince filmin XRD kırınım deseni.

(002), Al_2O_3 'ün 41.67° 'de (006) yöneliminde, GaN'ın 34.68° 'de (002) ve AlN'ın ise 36.04° 'de (002) yöneliminde olduğu gözlenmiştir. Kırınım piklerinin ortalama yarı genişlik değeri (FWHM) ZnO için 0.785° , AlN için 0.30° , GaN için 0.783° olarak biriktirme işleminin pik şiddetinden görüldüğü üzere ideal şartlarda yapıldığı gözlenmiştir. Kırınım deseni ZnO filminin kristal kalitesinin iyi olduğunu ve yapının istenen özellikte elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 3.5. AlN, GaN ve Al_2O_3 'e ait tabakaların XRD kırınım deseni.

Filmlerin ortalama parçacık boyutu denklem 1.1’de gösterilen Scherrer denklemi kullanılarak hesaplandı (Cullity, 1978).

$$d = \frac{0.94\lambda}{B \cos\theta} \quad (1.1)$$

λ =x-ray kaynağının dalgaboyu

θ =Bragg kırınım açısı

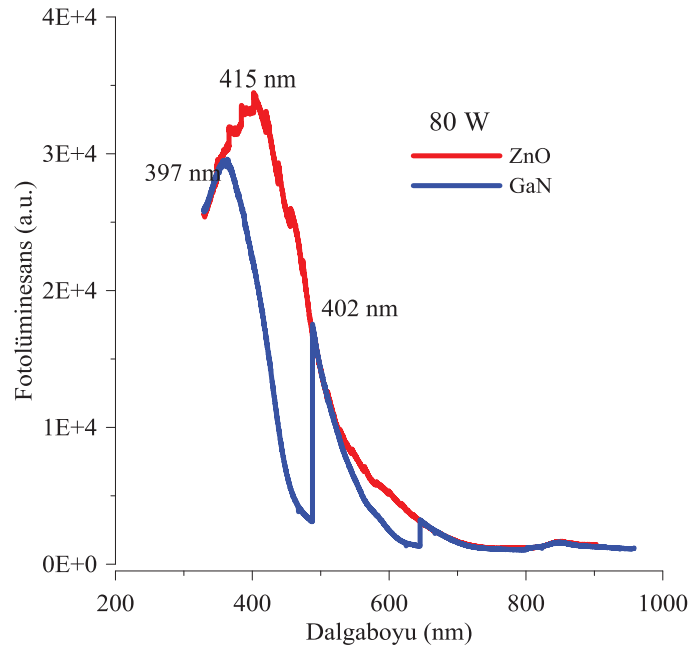
B=Kırınım pikinin ortalama yarı genişlik değeridir.

ZnO filmi için bulunan tane boyutu değeri 26.34 nm olarak hesaplanmıştır.

3.2.5. Optik karakterizasyon

3.2.5.1. Fotolüminesans (PL) ölçümü

Şekil 3.6’da oda sıcaklığındaki PL emisyon spektrası göstermektedir. PL spektrasında UV bölge olmak üzere tek emisyon bölgesi bulundu. Emisyon piki 2.99 eV (415 nm)



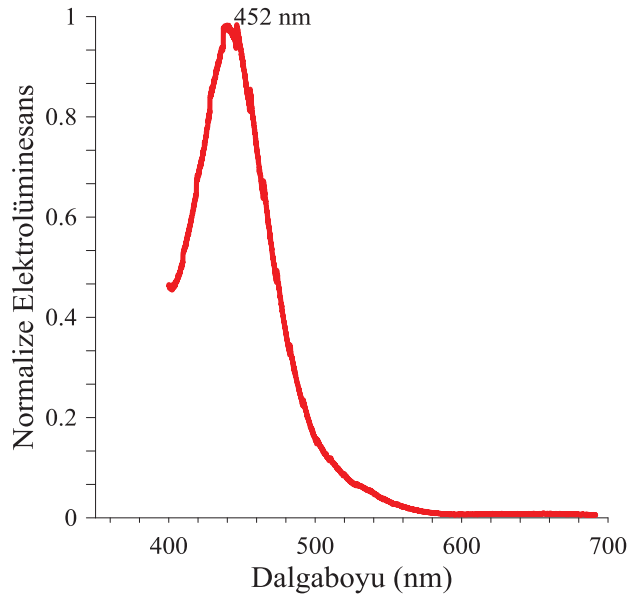
Şekil 3.6. PL emisyon spektrası.

civarında görüldü. ZnO filminin yakın bant kenarı emisyonuna (NBE) katkıda bulunur. Ek olarak p- tabakası olan GaN'ın da 3.13 eV (397 nm) ve 3.09 eV (402 nm) değerlerinde karakteristik pikleri sergilediği gözlemlenmiştir. UV emisyon foton ile üretilen yüklü taşıyıcıların yeniden birleşmesinden türetilmiştir.

İnce filmlerde pek çok yapı kusuru mevcuttur. Bunlar dislokasyonlar, kırılan bağlar ve sitokiyometrik yapıdır. Bu kusurların türleri ve miktarı biriktirme şartlarına bağlı olarak değişir. Düşük plazma güçlerinde kusurların yoğunluğu azalır. İnce filmin emisyon özelliklerinin kalitesi iyileşir. Bu bilgiye göre plazma gücünün yeterince yüksek ve emisyon özelliğinin ise iyi olduğu sonucuna varabiliriz. UV emisyonun dışında herhangi güçlü bir pik gözlenmemesi pik yapısal kusurların ve kusur merkezlerinin yapıda mevcut olmadığı ya da çok zayıf olduğunu göstermektedir. Bu kusurlar oksijen boşlukları, çinko boşlukları, interstitial Zn ve O olarak rapor edilmiştir (Kim ve ark., 2012; Kukreja ve ark., 2012; Pati ve ark., 2012).

3.2.5.2. Elektrolüminesans (EL) ölçümü

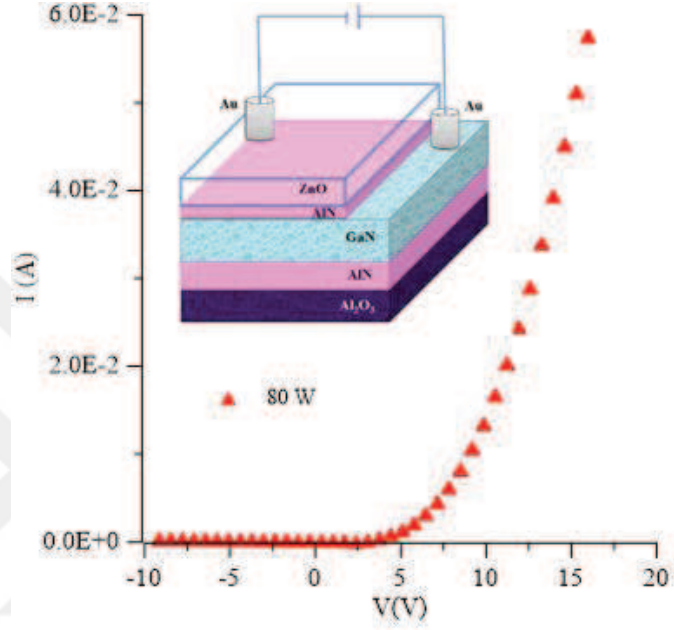
Şekil 3.7.'de EL emisyon spektrası gösterilmiştir. EL spektrasında yine mavi bölge olmak üzere tek emisyon bölgesi görülmüştür. Emisyon piki 452 nm civarında tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. EL emisyon spektrası.

3.2.6. Elektriksel karakterizasyon

Şekil 3.8.'de safır alttaş üzerine GaN ve AlN tabakaları büyütülmüş ve üretilen LED'in I-V karakterizasyonu gösterilmiştir. Elde edilen diyotun $\sim 7.2V$ (turn on voltage) değerinde akımı geçirmeye başladığı görülmüştür.

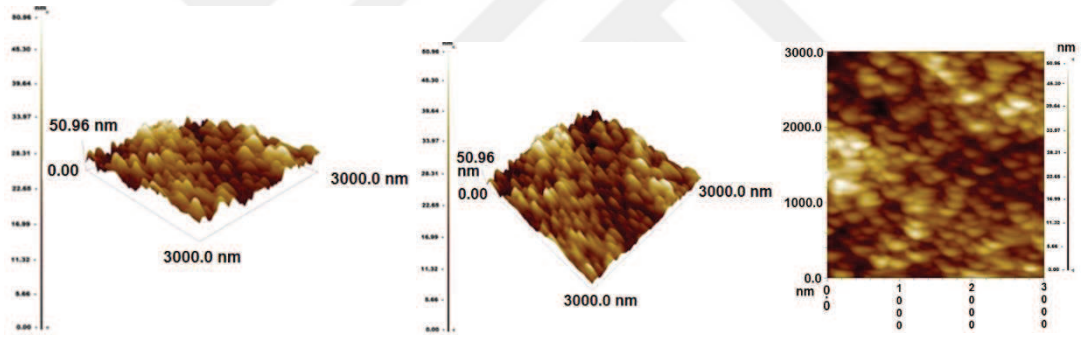


Şekil 3.8. Üretilen diyotun I-V karakterizasyon eğrisi.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. AFM Görüntülerinin Analizleri

Şekil 4.1.'de 80W'da üretilen ZnO filminin AFM görüntüleridir. Şekilde görülen $3\mu\text{x}3\mu$ 'lik üç boyutlu AFM görüntüsü numunenin yüzey haritasıdır. Çalışma basıncının numune morfolojisindeki etkisi incelenmiştir. Tanelerin büyüklüğü atomların enerjisiyle yakından ilişkilidir. Yüksek plazma gücünün varlığında saçtırlan atomlar büyük tane oluşturmak için gerekli yüzey difüzyon enerjisine sahiptir. Bu nedenle tane boyutu ile yüzey pürüzlülüğünün uyumlu olması beklenen bir sonuçtur (Prabakar ve ark., 2005).



Şekil 4.1. 80 W'da üretilen ZnO filmlerine ait AFM görüntüleri.

Tablo 4.1.'de ise oluşan tanelerin pürüzlülük değeri (RMS-Root mean square) gösterilmektedir. RMS değeri ~ 8.14 nm olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. Üretilen ZnO filminin yüzey parametreleri.

Katsayı	Değer	Birim	Tanım
sa	6.456991	nm	Ortalama
sq	8.14684	nm	Karekök
ssk	0.1899245	----	Yüzey pürüzlülüğü
sku	2.932917	----	Yüzey Dikliği

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Öncelikle ilk üretilen malzeme MOCVD (Metal-Organik Kimyasal Buhar Depozisyonu) ince film büyütme tekniği ile c-düzlem safir (Al_2O_3) üzerine 400 nm kalınlıkta AlN çekirdek tabakası ile kaplandı. Bu tabaka üzerine 575 nm kalınlıkta yine MOCVD tekniği ile p-tipi malzeme elde etmek amacıyla Mg katkılanarak GaN katman büyütüldü. GaN katman üzerine, tampon tabaka dediğimiz, yapıdaki stress oluşumunu minimize etmek ve değerlilik bant ofsetini optimize etmek amacıyla 20 nm kalınlığında AlN tabaka ile kaplanmıştır.

Bu durumu kısaca açıklayacak olursak GaN ve safir arasında ki örgü uyumsuzluğunu ve termal genişleme katsayıları arasındaki farkı gidermek için AlN tabakalar kullanıldı. Yine ZnO ve GaN arasındaki olası GaOx tabakalarının oluşumunu engellemek içinde AlN tabakalardan faydalanılmıştır.

Malzememiz temel olarak görünür bölge denilen (400-700 nm) UV aralığındaki spektrumuna odaklanılmıştır. Özellikle GaN temelli mavi-LED yapısı tasarlanarak MOCVD ve sputter teknikleriyle büyütülen tandem olarak literatüre giren çok tabakalı bir LED materyalidir.

Hedeflenen dalgaboyunda ışımaya yapan mavi-LED epitaksiyel yapısının başarılı biçimde büyütüldüğü, yapısal, elektriksel ve optik karakterizasyonlar ile ortaya konulmuştur. Büyütülen ZnO ve Nitrat tabakaları iyi optik kalite göstermektedir.

Ayrıca X-Işını difraksiyonu ile alınan simetrik düzlem sinyali FWHM değerleri literatürle karşılaştırılabilir değerlerdedir. İlk yapıda homojen bir p- tipi iletkenlik elde etmek adına bu tabakaların kalınlıkları yüksek tutulmuştur.

Bununla birlikte bu yapıların hem fotolüminesans (PL) hem de elektrolüminesans (EL) spektrumlarında soğurmanın oldukça ideal olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla yapıda tabakaların kalınlıklarının optimize değerleri üretildiği gibi verilebilir.

Ancak bu durumun her zaman yüksek PL emisyonu şiddetinin yanında yüksek EL şiddetini vereceği anlamını kesin olarak taşımayabilir ve bu yüzden de enjeksiyon akımının artırılması için daha fazla elektron ve deşik taşıyıcılarının n- tipi ve p- tipi tabakalara yüklenmesi gerekebilir.

Sonuç olarak oda sıcaklığında 20 mA akımda 452 nm’de keskin ve yüksek şiddetli bir EL sinyali gözlenmiştir. EL sinyalinin FWHM değeri 11.2 nm olarak belirlenmiştir. Turn-on voltajı yaklaşık ~7.2 V dolayındadır. Yapıda tek pik gözükmesi, pikin şiddetli ve keskin olması yapıdaki tabakaların kirlilik ve kusurlardan uzak bir malzeme olduğu anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

- Airey, R.J. 2008. Temperature dependent behaviour of 340nm light emitting diodes incorporating a gallium nitride interlayer, *Journal of Physics D: Applied Physics*, (41); 094004.
- Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, L., Toyoda, Y. 1986. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer., *Appl. Phys. Lett*, 48 (6): 353-357.
- Ambacher, O. 1998. Growth and applications of group III-nitrides, *J. Phys. D: Appl.Phys*, 31: 2653-2710.
- Assuncao, V., Fortunato, E., Marques, A., Aguas, H., Ferreira, I., Costa, M. E. V., Martins, R. 2003. Influence of the deposition pressure on the properties of transparent and conductive ZnO:Ga thin-film produced by R.F. sputtering at room temperature, *Thin Solid Films*, 427: 401.
- Ataev, B.M. Bagamadova, A. M., Djabrailov, A. M., Mamedov, V. V., Rabadanov, R. A. 1995. Highly conductive and transparent Ga-doped epitaxial ZnO films on sapphire by CVD, *Thin Solid Films*, 260: 19.
- Avcı, M. ve İstanbullu, M. 2017. Temel Yarıiletken Diyot Karakteristikleri, Çukurova Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Elektronik-1 Laboratuvar Deney Föyü.
- Aygün, S. ve Cann, D. 2005. Hydrogen sensitivity of doped CuO/ZnO heterocontact sensors. *Sens. Actuators B106*; 837-842.
- Bae, H.Y. ve Choi, G.M. 1999. Electrical and reducing gas sensing properties of ZnO and ZnO-CuO thin films fabricated by spin coating method. *Sens. Actuators B55*; 45-54.
- Bai, J. 2006. Optical properties of AlGaIn/GaN multiple quantum well structure by using a high-temperature AlN buffer on sapphire substrate, *Journal of Applied Physics* (99); 023513.
- Baik, D.G. ve Cho, S.M. 1999. Application of Sol-Gel Derived Films for ZnO/n-Si Junction Solar Cells. *Thin Solid Films*. 354; 227-231.
- Bhattacharya, P. 1996. *Semiconductor Optoelectronic Devices*. Prentice Hall International, 113 p, NJ, USA.
- Bond, W.L. 1960. Precision lattice constant determination, *Acta Crystallogr.*,13: 814.

- Burgraaf, P. 1993. The Status of MOCVD Technology, *Semiconductor International*, 3: 80-83.
- Ching, W.Y. ve Xu, Y.N. 2005. First-principles calculation of electronic, optical, and structural properties of α -Al₂O₃, *J. Am. Ceram. Soc.*, 77 (2): 404-411.
- Chopra, K.L. ve Das, S.R. 1983. *Thin Films Solar Cells*. Plenum Press, New York, 44-47.
- Choi, J.D. ve Choi, G.M. 2000. Electrical and CO gas sensing properties of layered ZnO-CuO sensor. *Sens. Actuators B* 69; 120-126.
- Cox, S.F.J., Davis, E.A., Cottrell, S. P., King, P. J. C., Lord, J. S., Gil, J.M., Alberto, H.V., Vilão, R.C., Piroto Duarte, J., Ayres de Campos, N., Weidinger, A., Lichti, R.L., Irvine, S.J.C. 2001. Experimental Confirmation of the Predicted Shallow Donor Hydrogen State in Zinc Oxide, *Phys. Rev.Lett.*, 86: 2601.
- Cohen, M.L. 1982, Pseudopotentials and Total Energy Calculations, *Phys. Scr.*, T1:5.
- Crawford, M.H. 2000. Design and Performance of Nitride-based UV LEDs, *Mat. Res. Soc. Symp. Materials Research Society, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, (622); T3.6.1-T3.6.11.*
- Cullity, B.D. 1978. In *Elements of X-Ray Diffractions*, Addison-Wesley Reading, 102.
- Çalışkan, D.M. 2014. Yeni nesil ince filmler ile optoelektronik uygulamaların araştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Decremps, F., Zhang, J., Liebermann, R.C. 2000. New phase boundary and high-pressure thermoelasticity of ZnO, *Europhys. Lett.*, 51: 268.
- Didchenko, R., Alix, J.E., Toeniskoetter, R.H. 1960. Reactions of phosphine with trimethylindium *J. Inorg. Nucl. Chem*, (14) 35-37.
- Dikme, Y. 2006. MOVPE and Characterization of GaN-based Structures on Alternative Substrates, *Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen*, 1,40-44, Doktora Tezi.
- Durukan, K.İ. 2013. Al:ZnO İnce filmlerinin büyütülmesi ve biyo-sensör özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Ellmer, K. ve Klein, A. 2008. ZnO ve Its Application, *Conductive Zinc Oxide Springer Series in Materials Science*, 104: 3.
- Fiat, S. 2012. CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_(1-x)Te_x)₂ İnce filmlerin üretimi, yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin incelenmesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik A.B.D. Doktora Tezi.

- Fujikawa, S. 2008. Realization of 340-nm-Band High-Output-Power ($>7\text{mW}$) InAlGa_N Quantum Well Ultraviolet Light-Emitting Diode with p-Type InAlGa_N, Japanese Journal of Applied Physics 47, (4); 2941–2944.
- Garcia, A. ve Northrup, J.E. 1995. Compensation of p-Type Doping in ZnSe: The Role of Impurity-Native Defect Complexes, Phys. Rev. Lett., 74: 1131.
- Gautier, S. 2008. AlGa_N/AlN multiple quantum wells grown by MOVPE on AlN templates using nitrogen as a carrier gas, Journal of Crystal Growth (310); 4927–4931.
- Gonchorek, M., Carlin, J.F., Feltin, E., Py, Grandjean, M.A. 2006. High electron mobility lattice-matched AlInN/GaN field-effect transistor heterostructures, Appl.Phys. Lett, 89 (6): 062106.
- Gökgöz, E.E. 2010. Renklendirilmiş organik-tio₂ ile kaplanmış camların yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Grzegorzczak, A.P. 2006. GaN grown on sapphire by MOCVD, Radboud Universiteit Nijmegen, Nijmegen, 11-15,34-35, Doktora Tezi.
- Hickermell, F.S. 1976. Zinc-oxide thin-film surface-wave transducer. Proc. IEEE, 64;631.
- Hu, Y., Zhou X., Han, Q., Huang, Y., 2003. Sensing properties of CuO–ZnO heterojunction gas sensors. Materials Science and Engineering B, 99; 4143.
- Horng, R.H. 2007. Growth and characterization of 380-nm InGa_N/AlGa_N LED's grown on patterned sapphire substrates, Journal of Crystal Growth, (298);219–222.
- Ihm, J., Zunger, A., Cohen, M.L. 1979. Momentum-space formalism for the total energy of solids, J. Phys. C, 12: 4409.
- İnternet: www.emo.org.tr
- İnternet: www.katihal.sakarya.edu.tr/kutuphane/iyya.htm
- Jain, S.C., Willander, M., Narayan, J., Overstraeten, R. 2000. III-nitrides: Growth, characterization, and properties, J.Appl.Phys, 87: 965.
- Jin, R.Q., Liu, J.P., Zhang, J.C., Yang, H. 2004. Growth of crack free AlGa_Nb film on thin AlN interlayer by MOCVD, J. Crystal Growth, 268, 35-40.
- Johnson, W.C., Parsons, J.B., Crew, M.C. 1932. Nitro-gen compounds of gallium, HI, J.Phys. Chem, 36 (10): 2561.

- Kanai, Y. 1991a. Admittance Spectroscopy of Cu-Doped ZnO Crystals, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30: 703.
- Kanai, Y. 1991b. Admittance Spectroscopy of ZnO Crystals Containing Ag, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30: 2021.
- Kato, H., Sano, M., Miyamoto, K., Yao, T. 2002. Growth and characterization of Ga-doped ZnO layers on a-plane sapphire substrates grown by molecular beamepitaksi, *J. Cryst. Growth*, 237–239: 538.
- Kelly, P.J. ve Arnell, R.D. 2000. Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications, *Vacuum*, 56, 159-172.
- Kim, J.H., Shin, T.H., Yang, K.J., Jeong, J., Choi B. 2012. Abstraction of Blue Photoluminescence in Al-Doped ZnO Nanoparticles Prepared by Electron Beam Deposition, *Applied Physics Express*, 5: 012603.
- Kohan, A.F., Ceder, G., Morgan, D., Van de Walle, C. G. 2000. First-principles study of native point defects in ZnO, *Phys. Rev. B*, 61: 15019.
- Ko, H.J., Chen, Y. F., Hong, S. K., Wenisch, H., Yao, T., Look, D. C. 2000. Ga-doped ZnO films grown on GaN templates by plasma-assistedmolecular-beamepitaksi, *Appl. Phys. Lett.*,77: 3761.
- Kobayashi, A., Sankey, O. F., Dow, J. D. 1983. Deep energy levels of defects in the wurtzite semiconductors AlN, CdS, CdSe, ZnS, and ZnO, *Phys. Rev. B*,28: 946.
- Kukreja, L.M., Misra, P., Fallert, J., Phase, D. M., Kalt, H. 2012. Correlation of spectral features of photoluminescence with residual native defects of ZnO thin films annealed at different temperatures, *J. Appl. Phys.*, 112: 013525.
- Kurt, G. 2013. Lityum niyobat tabanlı periyodik dielektrik yapıların üretimi ve optik çözümlenmesi Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Kuş, Ö.F. 2010. Bakır oksit/çinko oksit heteroeklem yapıların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Doktora Tezi.
- Laks, D.B., Van de Walle, C.G., Neumark, G.F., Pantelides, S.T. 1991. Role of native defects in wide-band-gap semiconductors, *Phys. Rev. Lett.*, 66:648.
- Liu, Z.F., Shan, F.K., Li, Y.X., Shin, B. C., Yu, Y.S. 2003. Epitaxial growth and properties of Ga-doped ZnO films grown by pulsed laser deposition, *J.Cryst. Growth*, 259: 130.

- Manasevit, H. ve Simpson, W. I. 1969. The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials: I. Epitaxial Gallium-V Compounds, *J. Electrochem. Soc.*, 116(12):1725-1732.
- Manasevit, H., Erdmann, F. M., Simpson, W. I. 1971. The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials: IV. The Nitrides of Aluminum and Gallium, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (11): 1864-1868.
- Manasreh, M.O. 2003. III-V Nitride Semiconductors Applications and Devices, Volume 16, Yu, E.T., Manasreh, M.O., Taylor&Francis, Newyork, London, 529.
- Minami, T., Nanto, H., Takata, S. 1984. Highly Conductive and Transparent Aluminum Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 23: L280.
- Morkoç, H. 1999. Nitride semiconductors and devices, Hull, R., Osgood, Jr., R.M., Sakaki, H., Zunger, A., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1-39, 4580,83-141,163, 332-336.
- Mridha, S. ve Basak, D. 2006. Investigation of a p-CuO/n-ZnO thin film heterojunction for H₂ gas-sensor applications. *Semiconductor Science and Technology.* 21; 928-932.
- Myong, S.Y., Baik, S.J., Lee, C.H., Cho, W.Y., Lim, K.S. 1997. Extremely Transparent and Conductive ZnO:Al Thin Films Prepared by Photo-Assisted Metalorganic Chemical Vapor Deposition (photo-MOCVD) Using AlCl₃(6H₂O) as New Doping Material, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36: L1078.
- Nagata, K. 2010. High-output-power AlGaIn/GaN ultraviolet-light-emitting diodes by activation of Mg-doped p-type AlGaIn in oxygen ambient, *Physica Status Solidi A* 207, (6); 1393–1396.
- Nakamura, S. 1991. GaN growth using GaN buffer layer, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30:L1705.
- Nakamura, S. ve Fasol, G. 1997. The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers, Springer Verlag Berlin, Germany, 77-79.
- Öztürk, M. 2011. AlGaIn Temelli UV-LED yapılarının metal organik buhar fazi epitaksisi yöntemi ile büyütülmesi ve karakterizasyonu, Gazi Üniversitesi, İleri Teknolojiler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Pankove, J.I., Miller, E.A., Berkeyheiser, J.E. 1971. GaN electroluminescent diodes, *RCA Rev.*, 32: 383.
- Pankove, J.I. ve Moustakas, T.D. 1998. Gallium Nitride I, *Semiconductors and Semimetals Academic Pres San Diego*, 50: 431-457.

- Park, R.M., Troffer, M. B., Rouleau, C.M., DePuydt, J. M., Hasse, M. A. 1990. p-type ZnSe by nitrogen atom beam doping during molecular beam epitaxial growth, *Appl. Phys. Lett.*, 57: 2127.
- Park, C.H., Zhang, S. B., Wei, S.H. 2002. Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective, *Phys. Rev. B*, 66: 073202.
- Pati, S., Majumder, S.B., Banerji, P. 2012. Role of oxygen vacancy in optical and gas sensing characteristics of ZnO thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 541: 376–379.
- Porowski, S. ve Grzegory, I. 1997. Thermodynamical properties of III-V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure, *J. Cryst. Growth*, 178(1-2):174- 188.
- Prabakar, K., Kim, C., Lee, C. 2005. UV, violet and blue-green luminescence from RF sputter deposited ZnO:Al thin films, *Cryst. Res. Technol.*, 40: 1152.
- Rosnagel, S.M. 1995. Sputter Deposition, In: *Opportunities of Innovation: Advanced Surface Engineering*. (Sproul, W.D., and Legg, K.O., -eds.), Technomic Publishing Co., Switzerland.
- Sakai, Y. 2010. Demonstration of AlGaIn-Based Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes on High-Quality AlN Templates, *Japanese Journal of Applied Physics* (49); 022102.
- Sarı, H. 2009. Yarıiletken Fizigi: Elektronik ve Optik Özellikler Ders Notları. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü.
- Schirmer, O.F. 1968. The structure of the paramagnetic lithium center in zinc oxide and beryllium oxide, *J. Phys. Chem. Solids*, 29: 1407.
- Shen, L. 2004. Advanced polarization-based design of AlGaIn/GaN HEMTs., University of California, Santa Barbara, 15-37. Doktora Tezi.
- Smorchkova, I.P., Chen, L., Mates, T., Shen, L., Heikman, S., Moran, B., Keller, S., DenBaars, S.P., Speck, J.S., Mishra, U.K. 2001. AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown plasma-assisted molecular-beam epitaxy, *J. Appl. Phys.*, 90 (10): 5196–5201.
- Sproul, W.D. 2009, PVD Processes for Depositing Hard Tribological Coatings, *Bulletin, Society of Vacuum Coaters*, Fall, 36-41.
- Strzhemechny, Y.M., Mosbacker, H.L., Look, D.C., Reynolds, D.C., Litton, C. W., Garces, N.Y. Giles, N.C., Halliburton, L.E. Niki, S. Brillson, L.J. 2004. Remote hydrogen plasma doping of single crystal ZnO, *Appl. Phys. Lett.*, 84: 2545.

- Sumiya, S., 2008. AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Grown on Epitaxial AlN/Sapphire Templates, Japanese Journal of Applied Physics, 47, (1); 4346.
- Sundaram, K.B. ve Khan A. 1997. Characterization and optimization of zinc oxide films by r.f. magnetron sputtering, Thin Solid Films, 295: 87-91.
- Şenadım, T.E. 2007. ZnO İnce filmlerinin eldesi ve aygıt üretimi için parametrelerinin optimizasyonu, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Taniyasu, Y. 2002. Intentional control of n-type conduction for Si doped AlN and Al_xGa_{1-x}N (0.42 ≤ x ≤ 1), Applied Physics Letters 81 (7); 1255.
- Taşlı, T. P. 2010. InAlN/GaN temelli yüksek elektron mobilite transistörlerin (hemt) elektron ve magneto özellikleri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD. Doktor Tezi.
- Thangavel, R., Rajagopalan, M., Kumar, J. 2006. Theoretical investigations on ZnCdO₂ and ZnMgO alloys: A first principle study, Solid State Communications, 137: 508.
- Thielsch, R., Gatto, A., Heber, J., Kaiser, N. 2002. A comparative study of the UV optical and structural properties of SiO₂, Al₂O₃, and HfO₂ single layers deposited by reactive evaporation, ion-assisted deposition and plasma ionassisted deposition, Thin Solid Films, 410 (1-2): 86-93.
- Tombak, A. 2012. Al:ZnO İnce filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine gama ışınlarının etkileri. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Torabi, A., Ericson, P., Yarranton, E. J., Hoke, W. E. 2002. Surface and interface characterization of GaN/AlGaIn high electron mobility transistor structures by x80 ray and atomic force microscopy, J. Vac. Sci. Technol. B., 20 (3): 1234-1237.
- Uozumi, G., Miyayama, M., Yanagida, H. 1997. Fabrication of a CuO-infiltrated ZnO composite and its gas sensing properties. J. Mater. Sci. 32; 2991-2996.
- Walukiewicz, W. 1994. Defect formation and diffusion in heavilydoped semiconductors, Phys. Rev. B, 50: 5221.
- Wang, T. 2008. The 310–340nm ultraviolet light emitting diodes grown using a thin GaN interlayer on a high temperature AlN buffer, Journal of Physics D: Applied Physics, (41); 094003.
- Wu, Z. L.Merz, J.L, Werkhoven, C.J., Fitzpatrick, B.J., Bhargava, R.N. 1982. Shallow N acceptor in N⁺-implanted ZnSe, Appl. Phys. Lett., 40: 345.

Valentini, A., Quaranta, F., Rossi, M., Battaglin, G. 1991. Preparation and characterization of Li-doped ZnO films J. Vac. Sci. Technol. A, 9: 286.

Van de Walle, C.G., Laks, D.B., Neumark, G.F., Pantelides, S.T. 1993. First-principles calculations of solubilities and doping limits: Li, Na, and N in ZnSe, Phys. Rev. B, 47: 9425.

Van de Walle, C. G. 2001. Defect analysis and engineering in ZnO, Physica B, 308–310:899.

Yanış, H. 2008. Atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemiyle p-tipi çinko oksit (Zno) üretimi ve elektriksel özellikleri, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Yoon, D.H., Yu, J.H., Choi, G.M. 1998. CO gas sensing properties of ZnO-CuO composite. Sens. Actuators B 46; 15-23.

ÖZGEÇMİŞ

Emre ARSLAN 1979 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. 1996 yılında Bahçelievler Deneme Lisesi'nden mezun oldu. Dumlupınar Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2006 yılında bitirdi. 2014 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2006 yılında beri Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

